

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الهندسة مدنية والري

Département de génie civil et hydraulique

**Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme**

**Master/ Académique**

**Domaine :** science et technologie

**Filière :** hydraulique

**Spécialité :** hydraulique urbaine

**Thème**

**Synthèse de l'effet de la rugosité impose au lit mineur et majeur sur le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée**

**Présenté par :**

**BEN BRAIK Youcef**

**Soutenue publiquement le 29/09/2024**

**Devant le jury composé de :**

M <sup>me</sup> . BITOUR Selma	MCB	Universit...de.....	Président(e)
Mr. SENNA Lachhab	MCB	Université...	Encadreur
M <sup>me</sup> . DJAANI Meriem	MCB	Université....	Examinateur(trice)

**Année universitaire 2023/2024**







# ❖ Dédicaces ❖

*Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance et de respect:*

- ✳ *À mon père qui m'a tant aidé et encouragé.*
- ✳ *À ma mère qui n'a pas cessé de me prodiguer.*
- ✳ *À tous mes frères et ma sœur.*
- ✳ *À tout(s) mes ami(s) (es) du Travail.*
- ✳ *À Tous mes amis de l'université de Ghardaia .*

**BENBRAIK Youcef**

**Promo: September 2024**



# ⊗ Remerciement ⊗

*Je remercie ALLAH de m'avoir prêté vie et volonté pourachever ce travail.*

*Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements les plus sincères à Monsieur SENNA lacheheb, qui a encadré ce mémoire de fin d'étude, pour ses efforts fournis afin de mener à bien ce projet.*

*Et mes plus sincères remerciements vont également à mes parents, mes frères et ma sœurs pour leurs encouragements, et conseils.*

*Je ne saurais oublier tous mes amis qui ont su m'encourager et me soutenir.*

*RESUME:*

## Résumé

Ce mémoire est destiné à l'Etude Comparative des caractéristiques du Ressaut Hydraulique Evoluant dans un canal Rectangulaire de section Composée Avec Lit majeur et celui mineur Rugueux.

L'étude a permis de montrer l'effet de cette rugosité sur les caractéristiques du ressaut hydraulique. Il a été permis d'obtenir un type du ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composé avec lit mineur rugueux est plus rentable et plus réducteur aux caractéristiques des longueurs relatives que son homologue avec lit majeur rugueux.

**Mots clés :** Ressaut hydraulique, canal rectangulaire composé, lit mineur rugueux, majeur rugueux.

## Abstract

This thesis is intended for the Comparative Study of the Hydraulic Jump characteristics Evolving in a Rectangular channel of section Composed with the Major Beds and the Rough Minor Bed.

The study made it possible to show the effect of this roughness on the characteristics of the hydraulic jump. It was possible to obtain a type of hydraulic jump evolved in rectangular channel composed with rough minor bed is more profitable and more reducing in the characteristics of the relative lengths than its counterpart with rough major bed.

**Keywords:** Hydraulic jump, compound rectangular channel, rough minor bed, rough major.

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERAL.....	13
---------------------------	----

## PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

<b>CHAPITRE I</b> <u>Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée</u>	
I.1. INTRODUCTION : .....	05
I.2. APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR 2012 :.....	05
I.2.1. Les différentes caractéristiques hydrauliques du ressaut hydrauliques :.....	06
II.1. L'ETUDE EXPERIMENTALE DES CARACTRISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSEE .....	18
II.1.1. La problématique .....	20
II.1.2. Analyse des essais expérimentaux .....	20
II.1.3. Résultats expérimentaux .....	21
II.2. CONCLUSION.....	22
<b>CHAPITRE II:</b> <u>Ressaut hydraulique en canal triangulaire à parois rugueuses</u>	
III.1. INTRODUCTION .....	24
III.2. PROCEDURE EXPERIMENTALE.....	24
III.2.1. Déroulement des essais.....	24
III.2.2. Mode de préparation des tapis rugueux. ....	25
III.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX .....	26
III.3.1. La longueur relative du ressaut $L_j/h_1$ varie en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	26
III.3.2. Variation des hauteurs conjuguées $Y$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	28
III.4. CONCLUSION .....	31

## PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE

### CHAPITRE I : Illustration du banc expérimental

I.1.INTRODUCTION .....	37
I.2. Banc d'essai .....	37
I.2. INSTRUMENTS UTILISES AU MESURAGE .....	39
I.2.1. Le mesurage des débits volumiques .....	39
I.2.2. Instrument limnimétrique.....	40
I.3.1.les étapes des essais .....	41
I.4. la conception de la rugosité. .....	43
I.5. Récapitulation des résultats .....	44

### CHAPITRE II : Etude théorique

II.1. Aperçu général.....	46
II.2. Développement de l'approche théorique .....	46
II.2.1. Description théorique .....	46
II.2.2. Développement de la relation adimensionnelle selon Euler.....	47
II.3. Récapitulation des Résultats.....	50

II.3.1. Étude du paramètre $C_r$ en fonction de $(\varepsilon/B-b)$ .....	50
II.4. CONCLUSION.....	59
<b>CHAPITRE III : Interprétation des résultats expérimentaux</b>	
III.3.1 Variation de la longueur relative du ressaut $Ljh1$ en fonction du nombre de Froude $F1$ dans le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm. .....	74
On déduit de cette figure que la section composée à fond rugueux a un effet réducteur de la longueur du ressaut en lit mineur que celui en lit majeur. .....	83
III.4.1. Comparaison entre la longueur relative $Ljh1$ de ressaut variant en fonction du nombre de Froude : .....	83
III.4.2 Comparaison entre $lj/h1$ relative du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de froude $fr$ pour le lit majeur lisse et son homologue rugueux : .....	87
<b>CONCLUSION GENERAL .....</b>	93
<b>Références bibliographies .....</b>	96

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : configuration du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 2 : étude Yen fonction de $F_1$ .	$(o)$ : équation (1.8), $(+)$ : équation (1.6). <b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 3 : Variation de $y$ , calculé par (1.6), en fonction de $F_1$ .	$(---$ ): $\beta=1$ . <b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 4: Variation du rendement $\eta$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ .	$(---$ ): $\beta=1$ , $\eta$ est calculé par l'équation (2.7). <b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 5: Variation de $\eta$ en fonction de $F_1$ .	$(o)$ : équation (2.7), $(*)$ avec frottement. <b>... Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 6: Configuration du ressaut contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire de forme composée.	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 7: Canal ayant servi à l'expérimentation (F. Riguet et al 2019).	<b>.... Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 8: Rapport des hauteurs conjuguées $Y$ varie en fonction de Froude $F_1$ pour le canal composée.	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 9: Représentation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude $F_1$ ,	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 10: Représentation de la longueur relative $L_r/h_1$ du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude $F_1$	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 11: Tapis rugueux de rugosité équivalente $\epsilon = 8,73\text{mm}$	25
Figure 12: Tapis collé soigneusement sur les parois du canal	26
Figure 13: Coefficient $a$ issu de la relation (2.2) varie en fonction de la rugosité équivalente « $\epsilon$ ».	27
Figure 14: Longueur relative expérimentale ( $L_j / h_1$ ) <b>Exp</b> varie en fonction de $\epsilon$ ( $F_1$ ) montrée par la relation (2.4)	28
Figure 15: Rapport des hauteurs conjuguées $Y$ du ressaut varie en fonction de $F_1$ , pour les différentes rugosités équivalentes $\epsilon$ .	29
Figure 16: Illustration du coefficient $b$ de la relation (2.6) en fonction de la rugosité	30
Figure 17: Représentation $Y$ <b>Exp</b> en fonction de $\epsilon(F_1, \epsilon)$ . $(---$ ) : la Première bissectrice	31
Figure 18: vue d'ensemble du canal d'essai	37
Figure 19: vue du canal	38
Figure 20: Illustration schématique du banc d'essai de section composée rugueux	46
Figure 21: Variation $f(Y)$ en fonction de $F_1$	50
Figure 22: Évolution du paramètre $C_r$ en fonction de $\epsilon/B-b$	52
Figure 23: illustration de $f(y_1, y_2)$ variant avec $F_1$ ( $1-1.896(\epsilon/B-b)$ )	53
Figure 24: illustration du $Y$ avec de $F_1$ ( $1-C_r$ )	54
Figure 25: illustration de $Y$ avec l'approche (2.22)	54
Figure 26: La variation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$	62
Figure 27: L'ajustement statistique des couples de valeurs $(\epsilon/B-b, a)$	63
Figure 28: Représentation graphique de $L_j/h_1$ expérimentale en fonction de $L_j/h_1$ globale d'un lit majeur rugueux	63
Figure 29: Ressaut contrôlé dans un canal rectangulaire de section composée à fond rugueux. La variation de la longueur relative $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude dans le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ), pour quatre rugosités différentes " $\epsilon$ " : $(\diamond)$ 12 mm ; $(\square)$ 10 mm ;	70
Figure 30: Variation du coefficient " $a_1$ " en fonction de la rugosité relative $\epsilon/b$ dans le lit mineur	71
Figure 31: La variation de la longueur relative $L_j/h_1$ en fonction de $\epsilon/b, F_1$ . $(\square)$ Les points expérimentaux du ressaut hydraulique contrôlé à fond rugueux. $(-)$ Première bissectrice	72

Figure 32: La variation de la longueur relative $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude, pour cinq rugosités différentes "ε" : (◊) 12 mm ; (□) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; (○) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.....	75
Figure 33: Variation du coefficient "b1" en fonction de la rugosité relative $\epsilon/b$ dans le lit majeur .....	76
Figure 34: La variation de la longueur relative $L_j/h_1$ expérimentale en fonction $\text{def}(\epsilon/b, F_1)$ .....	77
Figure 35: Représentation de la variation de la longueur relative $L_j/h_1$ expérimental en fonction de $f(\epsilon/b, F_1)$ pour les deux cas (lit mineur et lit majeur).....	82
Figure 36: Comparaison du rapport $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr pour le lit mineur lisse et celui rugueux.....	83
Figure 37: variation du rapport $L_j/h_1$ en fonction de Fr pour le lit majeur rugueux et son homologue lisse pour les deux types du ressaut.....	87

## LISTE DES TABLEAUX

---

*Tableau 1: Les valeurs du coefficient a issues de la relation (1).....	27
Tableau 2: Coefficients b et c issus de la relation (2.6). .....	29
Tableau 3: Illustration $Cr$ déduit des courbes d'ajustement .....	51
Tableau 4: rapport $Y_{\text{exp}}$ et celui $Y$ de l'approche empirique obtenue. ....	55
Tableau 5: (Suit) comparaison entre $Y_{\text{exp}}$ et celui $Y$ de l'approche empirique obtenue. ....	55
Tableau 6: (Suit)comparaison entre $Y_{\text{exp}}$ et celui $Y$ de l'approche empirique obtenue. ....	56
Tableau 7: Suite et fin . Comparaison $Y_{\text{exp}}$ avec $Y_{\text{app}}$ .....	58
Tableau 8: Mesures expérimentales ayant servi au tracage du graphique $L_j/h_1 = f(Fr)$ .....	62
Tableau 9: Récapitulation des résultats pour le ressaut hydraulique en canal rectangulaire composé avec lit majeur rugueux.....	64
Tableau 10: coefficients $a_{-1}$ des courbes d'ajustements. ....	71
Tableau 11: Ecart relatifs entre $L_j/h_1$ expérimentale et $L_j/h_1$ d'ajustement dans le lit mineur. ....	72
Tableau 12: Ecart relatifs entre $L_j/h_1$ expérimentales et $L_j/h_1$ d'ajustement dans le lit mineur. ....	74
Tableau 13: coefficients $b_1$ des courbes d'ajustements. ....	75
Tableau 14: Ecart relatifs entre $L_j/h_1$ expérimentale et $L_j/h_1$ d'ajustement dans le lit majeur. ....	77
Tableau 15: (suite) : Ecart relatifs entre $L_j/h_1$ expérimentale et $L_j/h_1$ d'ajustement dans le lit majeur	78
Tableau 16: (suite) : Ecart relatifs entre $L_j/h_1$ expérimentale et $L_j/h_1$ d'ajustement dans le lit majeur	79
Tableau 17: (suite et fin) : Ecart relatifs entre $L_j/h_1$ expérimentale et $L_j/h_1$ .....	81
Tableau 18: mesures expérimentales du ressaut hydraulique $L_j/h_1$ en fonction du Fr pour le lit mineur rugueux avec son homologue lit mineur lisse. (Docteur Walid jamaa 2021) .....	84
Tableau 19: Les mesures du rapport expérimentales $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr pour le type du ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composé avec lit majeur rugueux(Docteur Sena 2021).....	88
Tableau 20: Les mesures du rapport expérimentales $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr pour le type du ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composé avec lit majeur lisse (mesures Walid jamaa 2021). .....	93

## LISTE DES PHOTOS

---

Photo 1: Pompe centrifuge axiale. ....	38
Photo 2: La vanne de régulation du débit.....	39
Photo 3: dispositif de mesurage des débits volumiques .....	39
Photo 4: Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnométrique. ....	41
Photo 5: Différentes parois des ouvertures conçues.....	41
Photo 6: Les parois minces pour contrôler un écoulement de passage des régimes. ....	42

<i>Photo 7: a) section composée rugueuse b) section composée lisse. ....</i>	43
<i>Photo 8: Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnométrique. ....</i>	43
<i>Photo 9: Les tapis rugueux divers. ....</i>	44

## PRINCIPALES NOTATIONS

---

$A_1$	section amont mouillée [m]
$A_2$	section aval mouillée [m]
B et b	lit majeur et mineur [m]
$Cr$	paramètre de frottement [-]
$F_r$	Nombre de Froude [-]
$f_1 ; f_2$	Forces d'application amont et aval [N]
$f_x$	Force de frottement [N]
$\sum F_{ext}$	résultante de forces [N]
$F_l$	Force amont [N]
$F_2$	Force aval [N]
$g$	pesanteur [m/s <sup>2</sup> ]
$h_1$	Hauteur amont [m]
$h_2$	Hauteur aval [m]
$\bar{h}$	profondeur de la section [m]
$\Delta H$	Pertes de charge [m]
$H_{dev}$	lame d'eau [m]
$K$	paramètre [-]
$L_j$	Longueur [m]
$P$	Pression [N/m <sup>2</sup> ]
$P$	Périmètre [m]
$Q$	Débit [m <sup>3</sup> /s]
$q$	Débit unitaire [m <sup>2</sup> /s]
$s$	seuil [m]
$V$	volume [m <sup>3</sup> ]
$Y$	Rapport conjugué [-]
$\beta$	élargissement du canal [-]
$\tau$	taux de hauteurs [-]
$\eta$	la rentabilité [-]
$\varepsilon$	facteur de frottement [mm]

# **INTRODUCTION**

## **GENERAL**

Les barrages sont conçus pour évacuer un débit important, particulièrement en période de crue. Ce débit traverse l'évacuateur des crues et est dirigé vers l'aval de l'ouvrage afin de rejoindre l'oued. Cependant, pour éviter des érosions néfastes qui pourraient être générées, nous mettons en place des bassins de dissipation d'énergie. Dans ce cadre, les chercheurs se penchent sur ce phénomène en utilisant la méthode la moins onéreuse, le **ressaut hydraulique**, dans le but d'évaluer les caractéristiques géométriques associées, telles que : les profondeurs initiale et finale, le nombre de Froude de l'écoulement incident, ainsi que les longueurs du ressaut, du rouleau de surface et du ressaut hydraulique lui-même.

Le ressaut hydraulique peut se produire immédiatement en aval d'une vanne de fond ou au piémont d'un barrage déversoir. C'est cette configuration qui le rend particulièrement utile en pratique.

Le ressaut hydraulique se caractérise principalement par deux hauteurs conjuguées : initiale et finale. De plus, sa longueur de rouleau de surface et celle du ressaut hydraulique sont également des paramètres cruciaux. Ce mémoire a pour objectif d'étudier et de comparer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée, avec un lit majeur et mineur rugueux. Des approches fonctionnelles, exprimées de manière adimensionnelle, seront proposées pour relier les différentes caractéristiques du ressaut, tout en mettant en évidence l'influence de la rugosité des lits du canal sur ces caractéristiques.

Il est important de noter que l'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée avec des lits rugueux n'a pas encore été abordée de manière approfondie, d'où l'importance de cette recherche pour combler cette lacune.

Ce mémoire est divisé en deux parties principales :

1. **La première partie** est une étude bibliographique dans laquelle nous examinerons les travaux antérieurs dans le domaine du ressaut hydraulique en canal rectangulaire composé.
2. **La deuxième partie** présentera notre propre contribution, intitulée : "Contribution à l'étude comparative du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée avec lits majeur et mineur rugueux", vue sous un angle expérimental.

# PARTIE I :

---

# ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## **INTRODUCTION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE:**

La première partie de notre mémoire est consacrée aux travaux antérieurement réalisés touchant de près notre mémoire. Ce phénomène de ressaut hydraulique sur lequel nous travaillons, intéresse de nombreux ingénieurs hydrauliciens. Ces chercheurs sont parvenus à des résultats fiables grâce à leurs plusieurs expériences réalisées en laboratoire, d'une part pour obtenir une structure idéale du bassin d'amortissement, d'autre part, pour solutionner les phénomènes la dégradation du lit de la vallée et l'aval des Barrages.

Pour bien mené plan de travail, nous avons de vise cette partie en deux chapitres principaux. Pour le premier chapitre, nous allons, s'intéresser aux activités relatives au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire dont ou portera sur :

- Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée droit, nous allons présenter l'approche théorique de Khattou et Achour en 2012 concernant le ressaut hydraulique évaluent canal rectangulaire de section composée.
- Le deuxième sera consacré à l'étude expérimentale la plus récente de F. Riguet et al en 2019 reflétant l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire de section composée.

Enfin, de cette partie bibliographique une conclusion récapitulative des principaux résultats aboutis sera présentée.

# CHAPITRE I

**Ressaut hydraulique dans un canal  
rectangulaire de section composée**

## I.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons examiner les travaux les plus intéressants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire. Deux types de ressaut seront alors étudiés :

- Le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons des travaux de hager et wanoschek (1987) concernant le ressaut "triangulaire" du type a évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de  $90^\circ$ . A travers une étude expérimentale assez particulière, les auteurs proposent, notamment, une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut  $L_r/h_2$  et  $L_j/h_2$ , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de  $m$ .

En fait, hager et wanoschek (1987) extrapole les résultats issus d'un profil semi triangulaire à angle d'ouverture de  $45^\circ$  au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ .

- Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de  $90^\circ$ . Nous examinerons en particulier l'approche de debabeche et achour (2003), consacrée à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par seuil à paroi mince . L'étude concernera l'analyse des différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. Des relations simples à l'emploi, liant des paramètres adimensionnels, seront alors proposées.

## I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

Le ressaut hydraulique est défini comme le passage de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial. Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur  $L_r$  appelée longueur du rouleau. Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu' il se forme dans un canal de section droite triangulaire de pente nulle ou faible.

Les caractéristiques du ressaut sont principalement :

Les longueurs  $L_r$  et  $L_j$  qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut

Les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  , appelées également hauteurs conjuguées .

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ses sections.

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un nombre de Froude  $F1 > 1$  étroitement lié au débit volumique, à la hauteur initiale  $h_1$  ainsi qu'à la forme géométrique du canal.

Il a été établi que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation  $2 \frac{1}{h_1}$

$Y = \text{des hauteurs conjuguées et le}$   
 $\text{nombre de Froude incident } F1.$

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse, continu ou discontinu, ainsi que contrôlé par une marche positive ou négative. Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau à l'aval, de contrôler sa position lors de changement des paramètres de l'écoulement tels que les débits et de contribuer enfin à une meilleure compacité du bassin.

### I.2.1. Forme du ressaut classique

Selon la classification proposée par bradley et peterka (1957), le ressaut classique peut se présenter sous quatre configurations distinctes. Cette classification se base principalement sur la valeur du nombre de Froude  $F1$  caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, en excluant les formes obtenues pour  $F1 < 1,7$ . Ces dernières sont décrites par plusieurs auteurs tel que anderson (1978) et ne répondent pas aux exigences d'un bassin de dissipation d'énergie ; les ressauts correspondants sont dits ondulés présentant tantôt une surface libre régulièrement perturbée et lisse ( $1 < F1 < 1,4$ ), tantôt une surface libre irrégulièrement ondulée ( $1,4 < F1 < 1,7$ ).

Selon la classification de bradley et peterka (1957) on distingue quatre configurations de ressaut :

#### a. Le pré - ressaut

Il est obtenu pour la gamme  $1,7 < F1 < 2,5$  (Figure 1.1,a). La surface du ressaut est composée d'une série de petits rouleaux pour  $F1 = 1,7$  ; ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude  $F1$  augmente. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible.

#### b. Ressaut de transition

Le ressaut de transition est Obtenu pour la gamme  $2,5 < F1 < 4,5$  (Figure 1.1,b). Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

#### c. Ressaut stable

Il est obtenu pour la gamme  $4,5 < FI < 9$  (Figure 1.1,c). C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans les bassins de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

d. Ressaut agité ou clapoteux

Obtenu pour  $FI > 9$  (Figure 1.1,d). Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très grande. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.

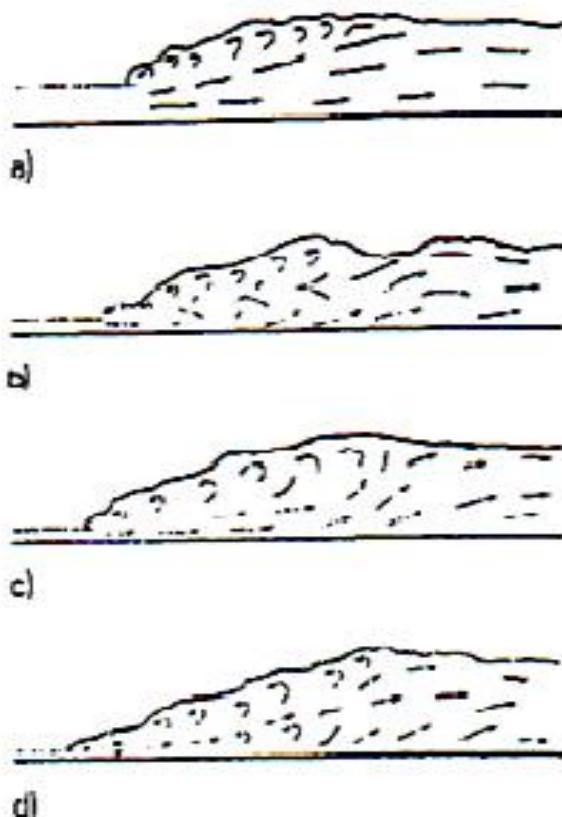
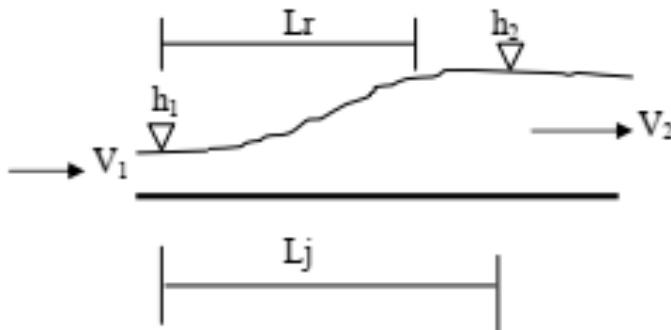


Figure 1.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de BRADLEY et PETERKA(1957). a) Pré-ressaut, b) Ressaut de transition, c) Ressaut stable, d) Ressaut agité.

### I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La Figure (1.2) montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiale et finale 1 et 2.



**Figure 1.2 :** Ressaut hydraulique classique.

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

$$V_1 = Q / A_1$$

$Q$  est le débit volumique et  $A_1$  l'aire de la section mouillée initiale qui s'exprime par :

$$A_1 = m h_1^2 i \quad (1.2)$$

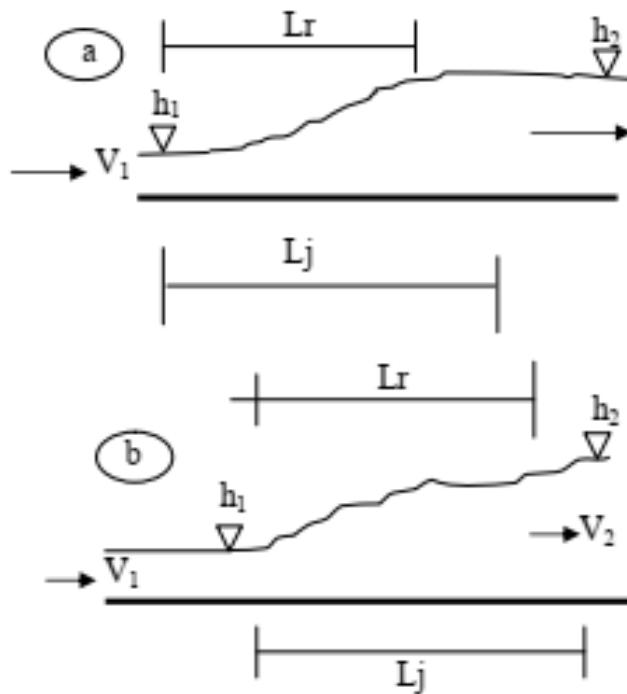
$m$  : cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal à section droite triangulaire symétrique par rapport à l'horizontal.

#### I.2.2.1. Longueurs caractéristiques du ressaut

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

#### I.2.2.2. Longueur du rouleau

En 1990 hager définit en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisant ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé. La Figure (1.3) montre ces deux types de ressaut et les longueurs  $L_r$  qui leur correspondent.



**Figure 1.3 :** Aspect du ressaut classique. a) Développé. b) Non développé.

Le rouleau non développé est caractérisé par une longueur plus courte que celle du rouleau développé et sa surface à l'aval se présente sous l'aspect de vagues. Au fond de la masse liquide en mouvement, on peut distinguer une zone de rouleau dite de séparation formant un tourbillon de fond. En raison de la présence de cette zone, le jet entrant dans la section initiale du ressaut est dévié vers la surface libre (Debache, 2003).

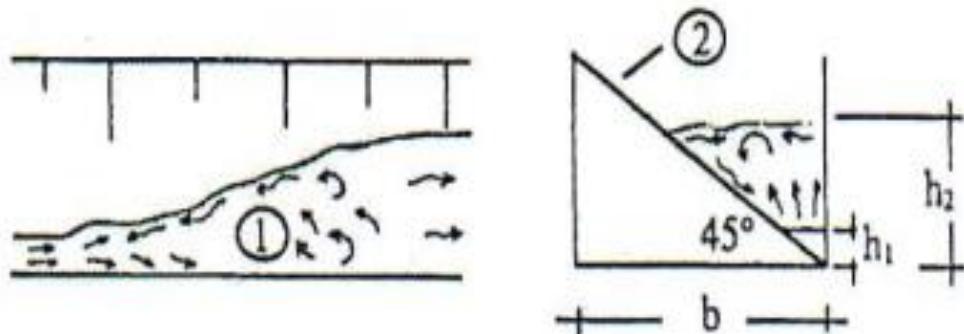
Le rouleau développé présente une surface relativement lisse et est caractérisé par une quasistabilité. Le jet entrant dans la section initiale du ressaut adhère sur une certaine distance au fond du canal puis diverge en s'orientant vers l'aval.

### I.2.3. Approche de Hager et Wanoschek

Hager et Wanoschek (1987) ont étudié le ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal de forme triangulaire du type A évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de  $45^\circ$ . A travers une étude expérimentale, les auteurs proposent, notamment, une relation générale pour le calcul des longueurs caractéristiques du ressaut  $Lr/h_2$  et  $Lj/h_2$ , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de  $m$ . Hager et Wanoschek (1987) extrapolent les résultats issus d'un profil semi-triangulaire à angle d'ouverture de  $45^\circ$  au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ .

Les essais de Hager et Wanoschek (1987) sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire ont été réalisés dans un canal rectangulaire de largeur  $b =$

30 cm dans lequel a été insérée une paroi en PVC inclinée d'un angle de  $45^\circ$  par rapport à l'horizontal. Le profil obtenu est devenu alors de forme semi-triangulaire comme l'indique la Figure (1.4).



**Figure 1.4:** Ressaut hydraulique en canal semi-triangulaire selon Hager et Wanischek(1987).

1) Vue en plan du ressaut. 2) Coupe transversale d'une paroi en PVC inclinée de  $45^\circ$ .

$h1$  et  $h2$  : Hauteurs conjuguées du ressaut.

#### I.2.4. Analyse des résultats

##### I.2.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées

Sous l'hypothèse de l'uniformité des pressions et des vitesses, l'application de l'équation de la quantité de mouvement, entre les sections initiale et finale d'un ressaut évoluant dans un canal horizontal de section droite trapézoïdale, mène à écrire:

$$\frac{b.h_1^2}{2} + \frac{m.h_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(bh_1 + m.h_1^2)} = \frac{b.h_2^2}{2} + \frac{m.h_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(bh_2 + m.h_2^2)} \quad (1.3)$$

$h1$  et  $h2$  sont respectivement les hauteurs initiale et finale du ressaut,  $b$  est la base du canal trapézoïdal,  $Q$  désigne le débit volume,  $m$  représente la cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontal et  $g$  est l'accélération de la pesanteur.

L'équation (1.1) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme :

$$F1^2 \left[ 1 - \frac{1+M}{Y(1+M)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)} \left[ Y^2 \left( 1 + \frac{2M}{3} \right) - \left( 1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (1.4)$$

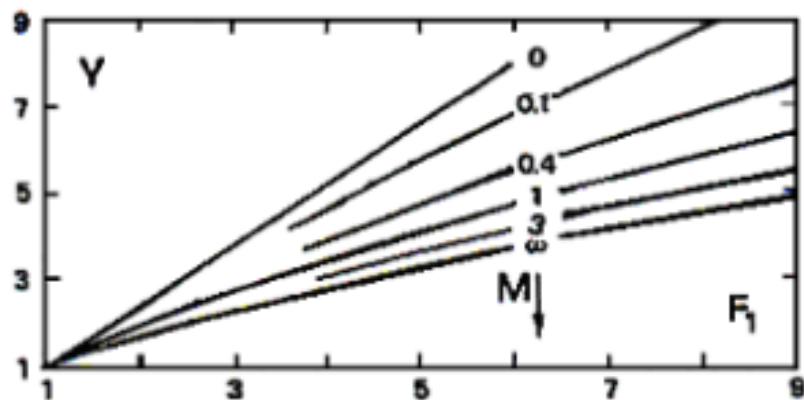
dans laquelle  $F1$  représente le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut,  $Y$  est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut et  $M$  désigne la hauteur relative initiale du ressaut :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b + 2mh_1)}{g(bh_1 + mh_1^2)^3}, Y = \frac{h_2}{h_1}, \quad M = \frac{mh_1}{b} \quad (1.5)$$

La relation (1.4) exprime la variation du nombre de Froude à l'amont du ressaut en fonction du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées et de la hauteur relative  $M$ , dans un canal trapézoïdal. Les équations régissant les ressauts en canal de section rectangulaire et triangulaire peuvent être déduites de la relation (1.4). Le canal de section droite rectangulaire constante est un cas particulier du canal trapézoïdal pour lequel l'angle d'inclinaison du talus par rapport à l'horizontal est de  $90^\circ$  ; ceci correspond donc à  $m = \cotg 90^\circ = 0$ , ou bien à  $M=0$ . Par contre, le profil triangulaire correspond à un profil trapézoïdal de base  $b=0$ , soit  $M \rightarrow \infty$ , l'équation (1.4) s'écrit :

$$Y^* = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2}F_1 - \frac{1}{2} \quad (1.6)$$

Sur la Figure (1.5) est représentée graphiquement, dans un système d'axes de coordonnées cartésiennes, la relation (1.4) :



**Figure 1.5 :** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et de la hauteur relative  $M$ .

$M=0$  : profil rectangulaire.

$M \rightarrow \infty$  : profil triangulaire .

$0 < M < \infty$  : profils trapézoïdaux.

La Figure 1.5 montre nettement que la plus faible valeur de rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut est obtenue dans le cas du profil triangulaire, pour une même valeur du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. L'équation de la courbe enveloppe inférieure de la Figure (1.5) traduit la variation du rapport Y du ressaut dans un canal de section droite triangulaire en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

$$F_{1T}^2 = \frac{2Y_T^2(Y_T^2 + Y_T + 1)}{3(Y_T + 1)} \quad (1.7)$$

L'indice '  $T$  ' indique le profil triangulaire. L'équation (1.7) montre que  $Y_T$  s'exprime de manière fortement implicite en fonction de  $F_{1T}$ . hager et wanoschek (1987) proposent alors la relation approchée :

$$Y_T = \left( \frac{3}{2} F_{1T}^2 - 1 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.8)$$

#### I.2.4.2. Equation de la quantité de mouvement

Les essais effectués par hager et wanoschek(1987) dans un canal semi triangulaire d'angle d'ouverture de  $45^\circ$ , extrapolés ensuite au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ , ont montré que les rapports  $Y$  expérimentaux sont légèrement inférieurs aux rapports  $Y$  théoriques obtenus par application de la relation (1.8) ; cet écart est attribué à l'effet des frottements sur les parois du canal et les auteurs proposent alors de modifier l'équation de quantité de mouvement en tenant compte des pertes de charge le long des parois du canal. Le gradient de pertes de charge  $S_f$  est évalué par la formule de BLASIUS :

$$S_f = \frac{0,3164 \cdot V^2}{R_e^{0.35} \cdot 8 \cdot g \cdot R_h} \quad (1.9)$$

Avec :

$$R_e = \frac{4R_h \times V}{\nu} \quad : \text{Nombre de Reynolds.}$$

$$R_h = \frac{mh}{2\sqrt{1+m^2}} \quad : \text{Rayon hydraulique correspondant au profil semi triangulaire et } \nu \text{ la viscosité cinématique.}$$

Le profil de surface du ressaut suit approximativement la loi  $h(x) = h_1 + (h_2 - h_1) X^2$ , dans laquelle  $x$  représente la coordonnée longitudinale comptée à partir du début du ressaut et  $X$  est la coordonnée  $x$  rapportée à la longueur  $L_j$  du ressaut, soit  $X=x/L_j$ . La coordonnée  $x$  est telle que  $0 \leq x \leq L_j$  et par suite  $0 \leq X \leq 1$ .

La force de frottement agissant sur le volume de contrôle correspondant à  $0 \leq x \leq L_j$  par définition :

$$W_x = \varpi \int A(x) S_f \quad (1.10)$$

$\varpi = \rho g$  est le poids volumique du liquide,  $A(x)$  l'aire de la section mouillée correspondant à  $x$ . Pour le cas du profil semi triangulaire d'angle d'ouverture de  $45^\circ$  ( $m=1$ ), la relation (1.9) devient :

$$S_f = \left[ \frac{2Q}{mh_1^2} \right]^{\frac{1}{4}} \frac{v^{\frac{1}{4}}}{5gh_1^{\frac{1}{2}}} \left[ \frac{h(x)}{h_1} \right] \quad (1.11)$$

La relation (1.11) s'écrit alors :

$$W_x = (\varpi \cdot m \cdot h_1^2 / 2) \cdot L_j \cdot S_f \cdot I(Y) \quad (1.12)$$

$$I(Y) = \int \frac{dx}{[1 + (Y-1)X^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (1.13)$$

Soient :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} \quad ; \quad X = \frac{x}{L_j}$$

$$S_f = S_f \left[ \frac{h(x)}{h_1} = 1 \right] \quad (1.14)$$

L'intégration numérique de  $I(Y)$  donne approximativement :

$$I(Y) = \frac{1}{7} (1 + \frac{6}{Y}) \quad (1.15)$$

Pour les nombres de Froude  $Fl < 15$ , correspondant à des rapports  $Y < 7$ , l'application de la relation approchée (1.15) occasionne une erreur relative inférieure à 5% par rapport à la valeur exacte calculée par l'équation (1.13). En tenant compte de la force  $W_x$  l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre les sections initiale et finale du ressaut évoluant dans un canal à section droite semi triangulaire s'écrit :

$$\frac{mh_1^3}{6} + \frac{Q^2}{g(mh_1^2)} = \frac{mh_2^3}{6} + \frac{Q^2}{g(mh_2^2)} + W_x \quad (1.16)$$

En désignant par :

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{gmh_1^5} , \quad A = \left[ \frac{mh_1}{2Q^2} \right]^{\frac{1}{4}} , \quad S_f = A \left( \frac{F_1^2}{10} \right)$$

La relation (1.16) s'écrit en termes adimensionnels :

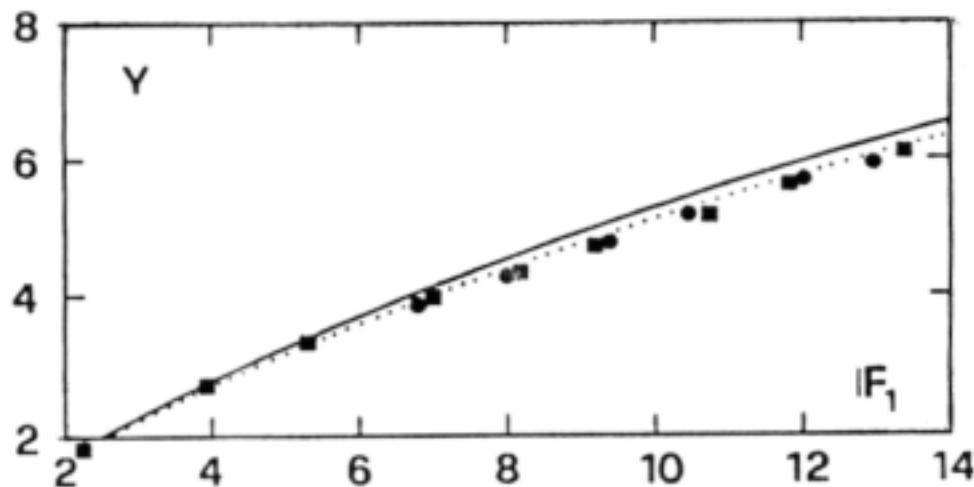
$$1 + \frac{3}{2} F_1^2 = Y^3 + \frac{3F_1^2}{2Y^2} + \frac{3AL}{70h_1} \left( 1 + \frac{Y}{6} \right) F_1^2 \quad (1.17)$$

La longueur relative  $Lj/h_1$  dans la relation (1.17) peut s'écrire :  $Lj/h_1 = Y \cdot (Lj/h_2)$ . hager et wanoschek (1987) estiment que pour un canal triangulaire correspondant à  $m=1$ ,  $Lj/h_2 \approx 6$ . Par suite, la relation (1.17) s'écrit en définitive :

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^3 - 1)}{3 \left[ Y^2 - 1 - \frac{AY^2}{6} (6 + Y) \right]} \quad (1.18)$$

Cette relation finale explique donc la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut dans un canal de section droite triangulaire ( $m = 1$ ) en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, en tenant compte de l'effet des frottements sur les parois du canal. Cet effet est traduit par le paramètre adimensionnel  $A$ . lorsque  $A \rightarrow 0$ , l'effet des frottements est négligeable et la relation (1.7) est reproduite. hager et wanoschek (1987) ont montré que l'écart maximal observé entre les valeurs expérimentales des rapports  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut et celles obtenues de l'application de la relation (1.18) ne dépasse guère 3 %.

la Figure (1.6) montre les mesures expérimentales de hager et wanoschek (1987) comparées à la fois aux valeurs théoriques obtenues par l'application de la relation (1.7) pour ( $A \rightarrow 0$ ) et à celles issues de l'équation (1.16) pour  $A > 0$ .

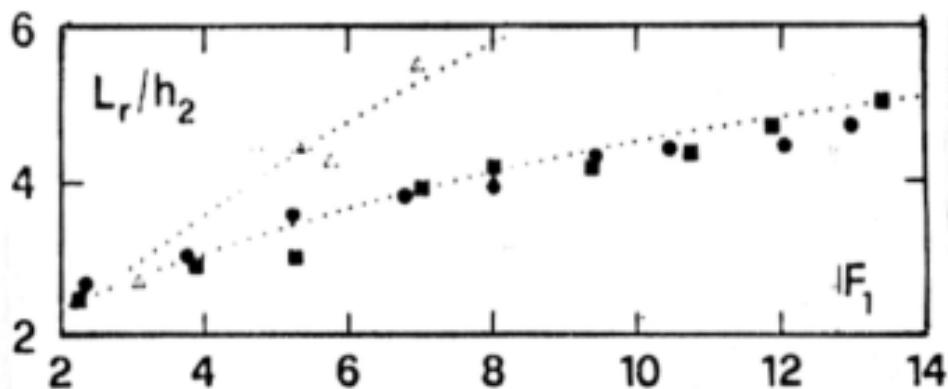


**Figure 1.6 :** Variation des rapports  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut triangulaire ( $m=1$ ) en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , selon hager et wanoschek (1987). ( $\square$ ) Courbe tracée selon la relation (1.7).  $A=0$  (----) Courbe tracée selon la relation (1.18).  $A>0$ .

#### I.2.4.3 . Longueur caractéristique du ressaut

La longueur  $L_j$  du ressaut est définie comme étant la distance entre le pied du ressaut et la section à l'aval où la surface libre de l'écoulement est maximale et tend à devenir parallèle au fond du canal. Par contre, la longueur  $L_r$ , est la longueur sur laquelle s'étend le rouleau de surface.

Sur la Figure (1.7) sont représentées les mesures expérimentales de rajaratnam (1964) ( $m=0,58$ ) et celles de hager et wanoschek (1987) ( $m=1$ ), qui concernent la longueur relative  $L_r/h_2$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. Il apparaît ainsi que la longueur relative  $L_r/h_2$  dépend uniquement de  $m$  et de  $F_1$ . La Figure (1.7) montre également que la longueur relative  $L_r/h_2$  croît au fur et à mesure que  $F_1$  augmente et qu'elle décroît avec l'augmentation de  $m$ .



**Figure 1.7 :** Longueur relative  $L_r/h_2$  du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude  $F_1$  selon hager et wanoschek ( 1987 ) (●) (  $m = 1$  ). ( Δ ) :  $m = 0,58$  selon Rajaratnam (1964)

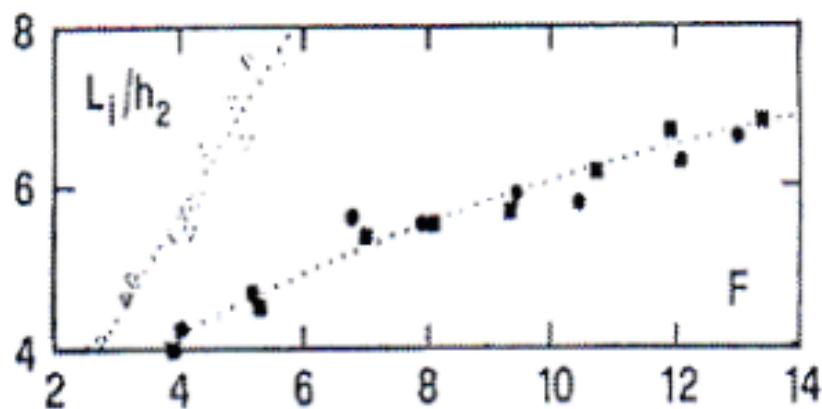
en tenant compte des mesures de rajaratnam (1964) ( $m=0,58$ ), hager et wanoschek (1987) proposent une relation générale permettant d'évaluer la longueur relative  $L_r/h_2$  en fonction de  $F_1$  et de  $m$ .

$$\frac{L_r}{h_2} = 1,8(m)^{0,5} F_1^{\frac{0,4}{m}} \quad 0,4 < m < 1 \quad (1.19)$$

Ainsi, dans la gamme pratique des nombres de Froude de l'écoulement incident tels que  $6 \leq F_1 \leq 9$ , la longueur relative  $L_r/h_2$  du rouleau, pour le cas d'un canal triangulaire à angle d'ouverture de  $90^\circ$  ( $m=1$ ), est telle que  $3,7 < L_r/h_2 < 4,35$ .

En ce qui concerne la longueur relative  $L_r/h_2$  du ressaut dans un canal triangulaire, les mesures expérimentales de hager et wanoschek (1987) ainsi que celles d'argyropoulos (1962) sont représentées sur la Figure (1.8), en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . Nous pouvons alors remarquer, comme pour  $L_r/h_2$ , que la longueur relative  $L_j/h_2$  dépend à la fois du nombre de Froude  $F_1$  et du paramètre  $m$ . La Figure (1.8) montre en outre que  $L_j/h_2$  varie dans le même sens que  $F_1$  et en sens inverse de  $m$ . En incluant les mesures d'argyropoulos (1962), hager et wanoschek (1987) proposent de calculer  $L_j/h_2$  par application de la relation :

$$\frac{L_j}{h_2} = 2,4 \cdot (m)^{0,5} \cdot F_1^{\frac{0,4}{m}}, \quad 0,4 < m < 1 \quad (1.20)$$



**Figure 1.8** : Longueur relative  $L_j/h_2$  du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , selon hager et wanoschek (1987) (•)( $m=1$ ). ( $\nabla$ ) :  $m = 0,44$  selon argyropoulos (1962).

#### I.2.4.4. Profil de surface généralisé du ressaut

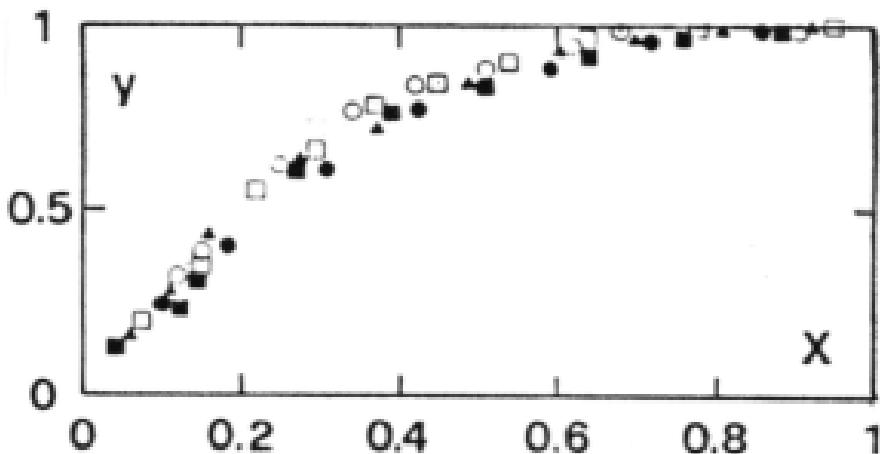
L'introduction des variables  $X=x/L_j$  et  $y(x) = [ h(x) - h_1 ] / ( h_2 - h_1 )$  permet de tracer le long de l'axe longitudinal du canal, le profil de surface du ressaut sous la forme adimensionnelle ;  $h(x)$  désigne la hauteur du ressaut à la distance  $x$  comptée à partir du pied du ressaut. Pour  $x=0$ , correspondant à  $X=0$ , nous pouvons écrire que  $h(x)=h_1$  et par suite  $y=0$ . Par contre, pour  $x=L_j$ , correspondant à  $X=1$ , nous pouvons écrire que  $h(x)=h_2$  et  $y=1$ . Les variables adimensionnelles  $X$  et  $y(x)$  décrivant le profil de surface du ressaut le long de l'axe longitudinal du canal sont telles que  $0 \leq X \leq 1$  et  $0 \leq y \leq 1$ .

La Figure (1.9) représente les mesures expérimentales de hager et wanoschek (1987) concernant le profil de surface généralisé du ressaut en canal triangulaire le long de l'axe longitudinal du canal.

Les points de mesures, obtenus pour  $6,8 \leq F_1 \leq 11,8$  ; se situent ainsi sur une courbe d'équation approchée:

$$Y(X) = (1+\alpha X) \cdot \tanh(\beta X) \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (1.21)$$

où 'tanh' désigne la tangente hyperbolique.



**Figure 1.9 :** Profil de surface généralisé  $Y(X)$  le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ( $m = 1$ ), selon hager et wanoschek (1987).

La Figure (1.9) montre que le profil de surface généralisé est quasiment linéaire pour la gamme  $0 \leq X \leq 0,2$ . La droite, représente la partie linéaire du profil passe par le point de coordonnées  $(0,0)$  et coupe approximativement l'axe parallèle à  $X$  au point de coordonnées  $(0,4 ; 1)$  ; le paramètre  $\beta$  figurant dans la relation (1.21) a donc pour valeur :  $\beta = (1-0)/(0,4-0) = 1/0,4$  ; soit  $\beta = 2,5$ . Ainsi, le paramètre  $\alpha$  peut être déterminé en écrivant que  $Y(X) = 1$ , soit  $1 = (1 + \alpha) \cdot \tanh(2,5X)$ , par suite  $\alpha = 0,014$ . Le profil de surface généralisé accepte ainsi pour équation :

$$Y(X) = (1 + 0,014 \cdot X) \cdot \tanh(2,5 \cdot X) \quad , \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (1.22)$$

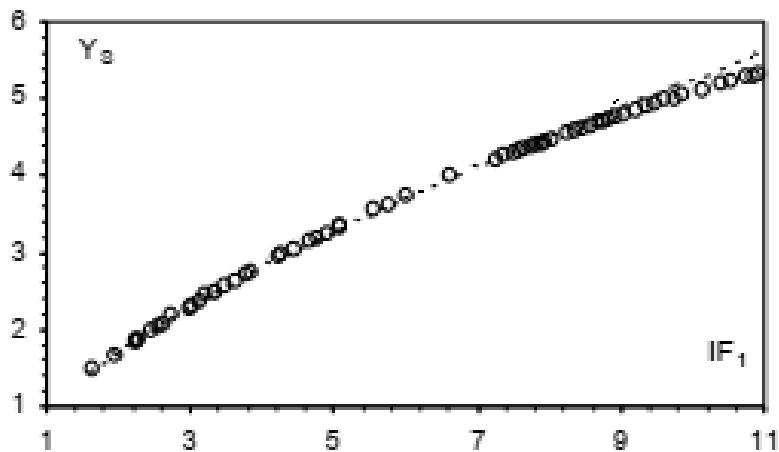
### I.3. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal triangulaire.

#### I.3.1. Approche de Achour et Debache (2003)

##### I.3.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Lors du contrôle du ressaut, la mise en place du seuil à l'aval n'a théoriquement aucun effet réducteur sur le rapport  $Y^*$  des hauteurs conjuguées du ressaut classique. Sous les mêmes conditions de l'écoulement amont, c'est à dire sous la condition de l'identité des débits volumes et des hauteurs initiales du ressaut, la hauteur finale  $h2^*$  du ressaut classique est théoriquement égale à celle du ressaut contrôlé par un seuil.

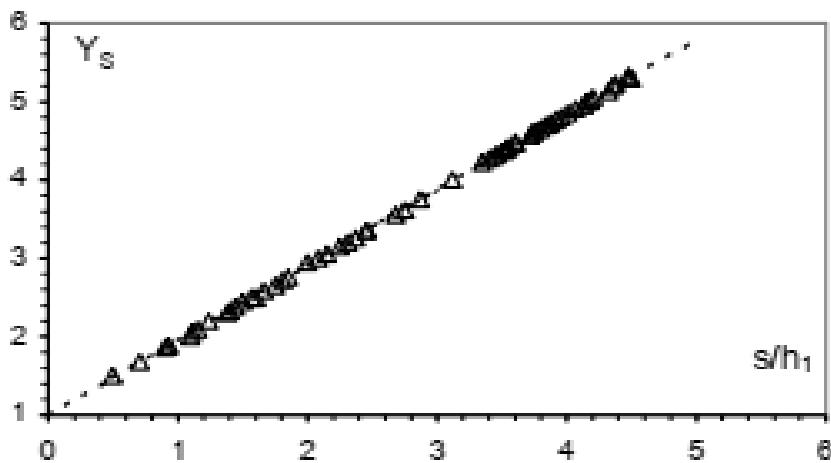
La figure 1.10 montre à la fois la variation de  $Y^*$  et de  $Y_s$  en fonction du nombre de Froude  $F1$  caractérisant l'écoulement incident.



**Figure 1.10** : Variation du rapport  $Y_S = f(F_1)$  dans un canal triangulaire. (---) Ressaut classique. (o) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

La figure 1.10 montre que l'égalité  $Y^* = Y_S$  n'est vérifiée que pour une certaine gamme de valeurs du nombre de Froude  $F_1$ . L'influence du seuil à paroi mince se manifeste à des valeurs du nombre de Froude  $F_1$  supérieures à 7,5. Cette influence s'accroît au fur et à mesure que  $F_1$  augmente, mais ne semble pas être significative. La représentation graphique des points expérimentaux des rapports  $Y_S$  en fonction de la hauteur relative  $S=s/h_1$  du seuil a abouti à une courbe unique, comme l'indique la figure 1.11. Celle-ci montre clairement que les points expérimentaux obtenus s'alignent suivant une droite passant par le point (0,1). Suite à un ajustement linéaire. Achour et Debabech (2003) ont déterminé la relation suivante :

$$Y_S = 1 + 0,96 \cdot S \quad (1.23)$$



**Figure 1.11** :Variation expérimentale de  $Y_S = f(S)$  lors du contrôle d'un ressaut triangulaire. (Δ) Points expérimentaux. (---) Courbe tracée selon la relation (1.23).

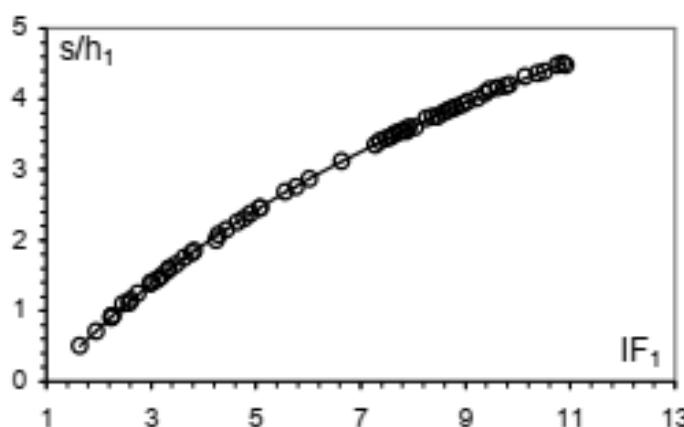
### I.3.1.2. Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude

Achour et Debache (2003) ont montré précédemment que l'influence du seuil sur la hauteur finale du ressaut, et de même pour le rapport  $Y$ , n'était pas significative. Il a trouvé également qu'une relation unique existe entre la hauteur relative  $S=s/h_1$  du seuil et le rapport  $Y_s$  des hauteurs conjuguées du ressaut. Ces considérations laissent l'auteur penser qu'une relation unique peut être obtenue entre la hauteur relative  $S=s/h_1$  du seuil et le nombre de Froude  $F_1$ .

La figure 1.12 montre en conséquence que les points de mesures expérimentaux obtenus suivent, dans leur totalité, la variation d'une courbe unique de type logarithmique. L'ajustement des couples de valeurs  $(F_1, S)$ , suivant la méthode des moindres carrés non linéaires, à donner la relation :

$$S=s/h_1 = 4,125 \cdot \ln[(F_1 + 4)/5] \quad (1.24)$$

«  $\ln$  » désigne le logarithme népérien.



**Figure 1.12 :** Variation expérimentale de la hauteur relative  $S$  du seuil, en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . (o) Points expérimentaux (---) relation d'ajustement

La relation ci-dessus, ainsi que la tendance des mesures expérimentales représentées par la figure 1.12, montre que pour  $F_1 = 1$  la hauteur relative  $S$  du seuil est nulle.

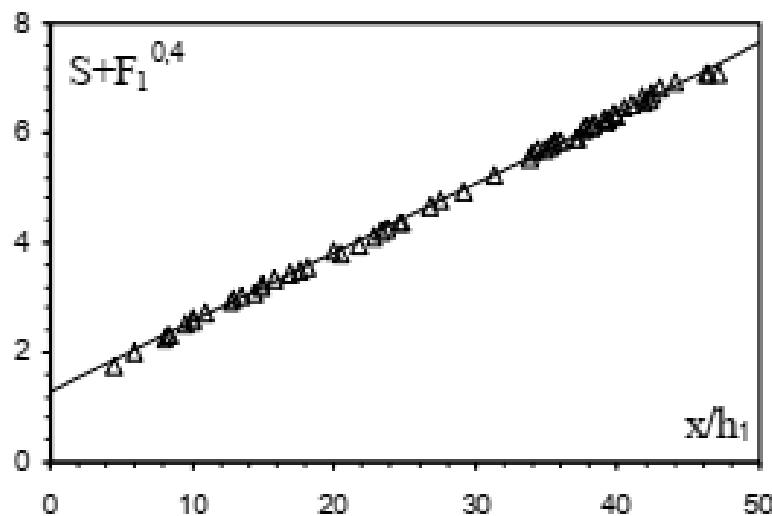
Comparée à la courbe expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil mince dans un canal rectangulaire, la figure 1.12 indique que pour le cas du ressaut triangulaire la hauteur relative  $s/h_1$  ne dépend nullement de la position  $X/h_2$  du seuil.

En outre, le contrôle du ressaut rectangulaire nécessite des hauteurs relatives  $s/h_1$  beaucoup plus importantes, pour un même nombre de Froude  $F_1$ .

### I.3.1.3. Relation générale régissant le contrôle du ressaut

Selon Achour et Debache (2003), l'analyse adimensionnelle montre qu'il existe une relation générale liant les paramètres  $F_1$ ,  $s/h_1$  et  $x/h_1$ . Cette dernière peut s'écrire sous la forme  $f(s/h_1, F_1, x/h_1) = 0$ . L'analyse des mesures expérimentales obtenues a montré que la meilleure représentation graphique adimensionnelle de la fonction  $f$  est celle indiquée par la figure 1.13. Les points expérimentaux se situent en fait, pour  $x/h_1 \geq 4$  (condition largement réalisée dans la pratique), sur une droite d'équation :  $(S+F_1)^{0.4} = a \cdot (x/h_1) + b$ . Les valeurs des constantes  $a$  et  $b$  ont été obtenues par un ajustement linéaire. Donc, la relation générale régissant le contrôle du ressaut triangulaire en présence d'un seuil à paroi mince s'écrit :

$$S + F_1^{0.4} = 0.127 \cdot (x/h_1) + 1.269 \quad , \quad x/h_1 \geq 4 \quad (1.25)$$



**Figure 1.13 :** Variation de  $(S+F_1)^{0.4}$  en fonction de la position relative  $x/h_1$  du seuil  
 $(\Delta)$  points expérimentaux (---) droite d'ajustement.

#### I.3.1.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé, au premier lieu, les travaux de hager et wanoschek (1987) ; ces études ont concerné le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture  $90^\circ$ . Les auteurs ont suivi une démarche expérimentale un peu particulière, car ils ont extrapolé les résultats issus d'un profil semi-triangulaire à angle d'ouverture de  $45^\circ$  à un canal symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ .

L'étude montre que les rapports Y expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs à ceux calculés par l'équation de la quantité de mouvement. Cette différence est attribuée à l'effet des frottements sur les parois du canal et l'équation de la quantité de mouvement est alors modifiée en tenant compte de ceux-ci. L'effet des frottements est traduit par le paramètre adimensionnel  $A = [v_m h_1 / (2Q)]^{1/4}$ . Lorsque  $A = 0$ , aucun effet des frottements n'est observé et l'équation de quantité de mouvement sous sa forme classique est applicable.

hager et wanoschek (1987) proposent une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut  $L_r/h_2$  et  $L_j/h_2$ , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de  $m$  .

Enfin, L'étude aborde le profil de surface généralisé du ressaut. Une équation représentative du profil de surface généralisé le long de l'axe du canal est alors proposée.

Nous avons présenté par la suite l'approche de Achour et Debabeche (2003) qui a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de  $90^\circ$ . Le ressaut est contrôlé de telle sorte que sa longueur  $L_j$  soit approximativement égale à la longueur du bassin, délimité à l'amont par le pied du ressaut et à l'aval par le seuil. L'expérimentation a eu pour objectif de corrélérer les différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. L'étude de Achour et Debabeche (2003) montre que ces paramètres sont en nombre de cinq, et pouvant former trois produits adimensionnels  $S=s/h_1$  ,  $F_1$  et  $x/h_1$  ;  $S$  est la hauteur relative du seuil et  $x/h_1$  sa position relative. L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a pu mener à l'établissement de relations simples à l'emploi, liant les trois variables adimensionnelles ci-dessus citées, pour le type de seuil considéré.

# **CHAPITRE II:**

## **Ressaut hydraulique en canal triangulaire à parois rugueuses**

### III.1. INTRODUCTION

Cette étude concerne l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant en triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90°, à parois rugueuses *M. Debabeche, S. Kateb et A. Ghomri (2006)*. Nous allons présenter à travers cette étude des relations fonctionnelles qui liant la rugosité absolue imposée aux parois du canal triangulaire aux caractéristiques du ressaut hydraulique.

### III.2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

#### III.2.1. Déroulement des essais

Cette étude expérimentale concerne le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à parois mince évoluant en canal triangulaire à parois rugueuses. Quatre tapis rugueux de rugosité absolue ont été testés :  $\epsilon$  (mm) = 4.53 ; 6.04 ; 7.11 ; 8.73. L'expérimentation a été réalisée sous sept hauteurs initiales de l'écoulement :  $h_1$  (mm) = 18 ; 25 ; 30 ; 34 ; 40 ; 44 ; 51. Une gamme du nombre de Froude incident a été ainsi obtenue, correspondent à  $4 < F_1 < 24$ . La formation du ressaut contrôlé est conditionnée par la mise en place d'un seuil à l'aval de l'écoulement. A cet effet des seuils des différentes hauteurs ont été conçus. Pour une hauteur fixée «  $s$  » de seuil et placé à l'aval du canal et pour une hauteur  $h_1$  de l'écoulement incident donné, l'élévation du débit volume  $Q$  engendre l'apparition d'un ressaut hydraulique. Le couple ( $Q$ ,  $h_1$ ) permet en outre le calcul du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour le même angle d'ouverture du canal triangulaire testé. L'augmentation de  $F_1$  provoque à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'accroissement de sa longueur  $L_j$ . Par conséquent, pour une valeur fixée du nombre de Froude  $F_1$  correspond une valeur de la longueur  $L_j$  du ressaut ainsi qu'une valeur de la hauteur «  $s$  » du seuil. Une série constituée par de points de mesures expérimentales, pour chacune des valeurs de la rugosité absolue testées, a permis ainsi d'aboutir à des résultats significatifs. Les caractéristiques hydrauliques et géométriques qu'intéressent la présente étude expérimentale sont : le débit volume  $Q$ , la hauteur  $h_1$  de l'écoulement incident, la hauteur finale  $h_2$  du ressaut, la longueur  $L_j$  de celui-ci et la rugosité équivalente «  $\epsilon$  » des parois du canal. En outre, les paramètres adimensionnels obtenus sont :

- Le nombre de Froude  $F_1$  tel que :

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{\text{gm}^2 h_1^5} \quad (2.1)$$

Avec  $m$  désigne la cotangente de l'angle d'inclinaison, par rapport à l'horizontale, des parois du canal triangulaire, soit  $m = \cot g (45^\circ) = 1$ .

- Le rapport de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut.
- Le rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées du ressaut.

### III.2.2. Mode de préparation des tapis rugueux.

Nous avons suivi les étapes suivantes pour obtenir des parois rugueuses qui se caractérisent par une répartition uniforme.

La variété du gravier est effectuée par un tamisage du gravier de granulométrie. Il est réalisé par un appareil électrique s'appelant "la tamiseuse", qui se compose de quelques tamis de différents diamètres standard. Le temps de tamisage de la gamme choisi du gravier ne dépasse pas cinq minutes.

- I. Cette gamme est lavée puis séchée après l'obtention de la série voulue.
- II. Selon le refus du tamis normalisé cette gamme choisie varie entre 4 et 12,50mm. Cette variété de particules obtenues sont réparties uniformément sur une toile en plastique (Figure 1), puis collées par une colle s'appelle "BECTA 10000".
- III. La valeur de la rugosité absolue est évaluée par un appareil numérique s'appelle "Palmer", de précision 0,001mm.
- IV. Enfin, le tapis rugueux obtenu est collé soigneusement sur les deux côtés du canal triangulaire (Figure 12).



Figure 1: Tapis rugueux de rugosité équivalente  $\bar{z} = 8,73\text{mm}$



**Figure 2:** Tapis collé soigneusement sur les parois du canal

### III.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

#### III.3.1. La longueur relative du ressaut $Lj/h_1$ varie en fonction du nombre de Froude $F_1$

Cette Figure (13) représente la variation  $Lj/h_1$  du ressaut hydraulique qui varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , avec quatre tapis rugueux testés. On constate Quatre allures perceptibles, qui correspond chacun à une rugosité équivalente «  $\varepsilon$  ». Ainsi on déduit que pour une rugosité fixée, l'augmentation de la longueur relative du ressaut engendre celle du nombre de Froude  $F_1$ . Par ailleurs, pour un nombre de Froude  $F_1$  fixé, la diminution de la longueur relative du ressaut hydraulique est engendrée par l'augmentation de la rugosité absolue., en outre, l'ajustement des mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés linéaires, a donné que pour chaque rugosité testée, la longueur relative  $Lj/h_1$  pourrait être écrite selon la relation suivante :

$$L_j/h_1 = a(F_1 - 1) \quad (2.2)$$

La récapitulation des valeurs du coefficient  $a$  et celles du coefficient de corrélation  $R^2$  issues de l'ajustement établi est indiqué selon le tableau 1.

Tableau 1: Les valeurs du coefficient a issues de la relation (1)

$\varepsilon$ (mm)	a	$R^2$
4,53	2,34	0,98
6,04	2,08	0,99
7,11	1,66	0,99
8,73	1,30	0,99

La représentation de la rugosité  $\varepsilon$  en fonction du coefficient a est illustrée selon la figure 13.

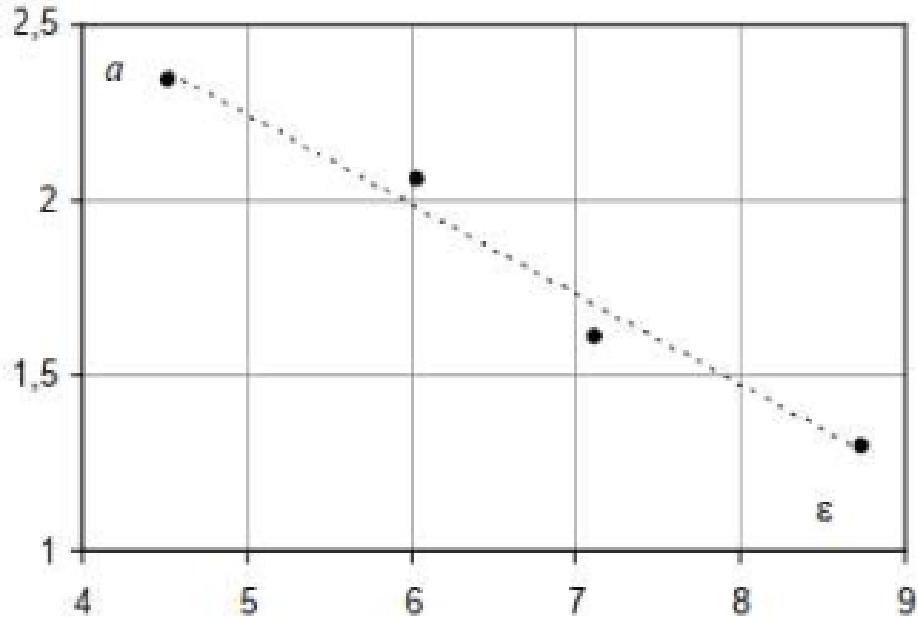


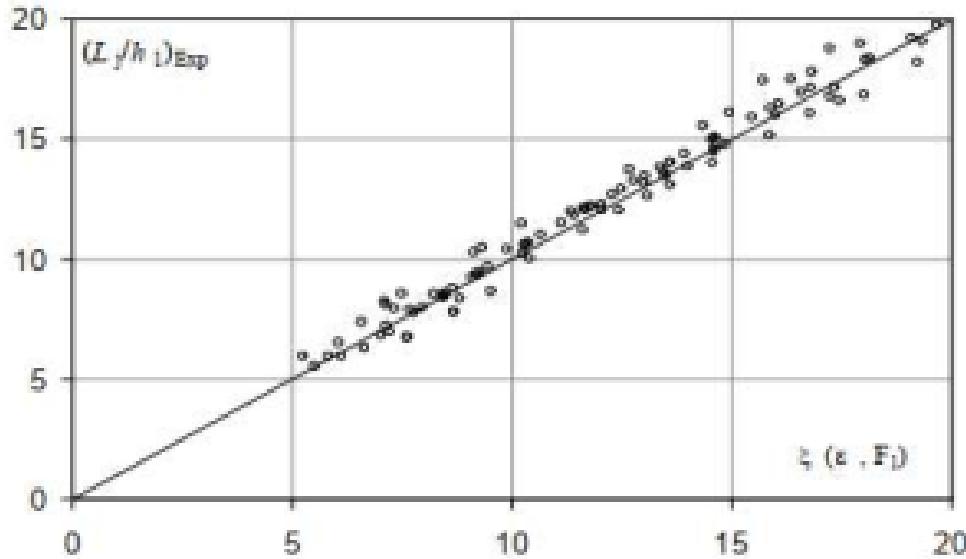
Figure 3: Coefficient a issu de la relation (2.2) varie en fonction de la rugosité équivalente «  $\varepsilon$  ».

L'ajustement de la rugosité avec le coefficient a, par la méthode des moindres carrés, a donné la relation suivante: 
$$a = 3,53 - 0,26\varepsilon \quad (2.3)$$

En éliminant le coefficient a entre les relations (2.2) et (2.3), nous pouvons alors écrire :

$$L_j/h_1 = (3,53 - 0,26\varepsilon)(F_1 - 1) \quad (2.4)$$

L'application de La relation (2.4) est justifiée pour la gamme  $4,53\text{mm} \leq \varepsilon \leq 8,73\text{mm}$ . La variation de la fonction  $L_j/h_1 = \xi(\varepsilon, F_1)$  exprimée par la relation (2.4) est montrée par la figure (15). Par conséquent, la confirmation que  $(L_j/h_1)_{Exp}$  est raisonnablement définie par la relation (2.4) car la majorité des mesures expérimentales se répartissent autour de la première bissectrice.



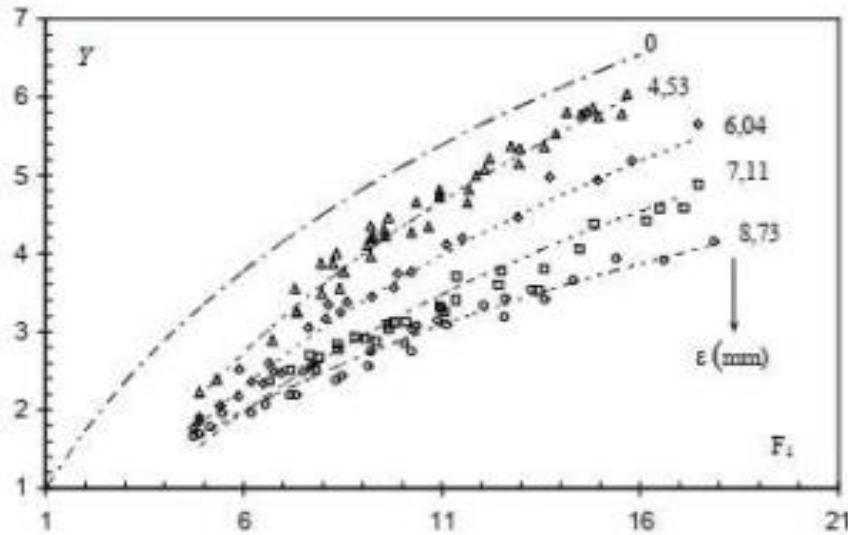
**Figure 4:** Longueur relative expérimentale ( $L_j / h_1$ )*Exp* varie en fonction de  $F_1$  montrée par la relation (2.4)

(o) Les motifs expérimentaux du ressaut hydraulique.

### III.3.2. Variation des hauteurs conjuguées $Y$ en fonction du nombre de Froude $F_1$

La représentation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut qui varie en fonction du nombre de Froude incident  $F_1$ , pour différentes rugosités testées est indiquée par la figure (16). Nous constatons que l'augmentation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées entraîne l'augmentation du nombre de Froude incident  $F_1$ , pour les quatre rugosités testées. On remarque aussi, que pour un nombre de Froude incident  $F_1$  fixé, la diminution du rapport  $Y$  provoque l'augmentation de la rugosité testée «  $\varepsilon$  ». Quatre allures de points, correspondant chacune à une valeur donnée de la rugosité absolue «  $\varepsilon$  », sont montrés par la figure (16), une représentation de la variation  $Y(F_1)$  correspondant à une rugosité équivalente  $\varepsilon \rightarrow 0$  est illustrée par la même figure citée ci-dessous. Cette courbe a été représentée selon l'approche de *Wanoschek et Hager (1987)*, inspirée par l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut hydraulique telle que :

$$Y = \frac{2Y^2(Y^2+Y+1)}{3(Y+1)} \quad (2.5)$$



**Figure 5:** Rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  du ressaut varie en fonction de  $F_1$ , pour les différentes rugosités équivalentes  $\varepsilon$ .

(- - -) : Courbes d'ajustement. (-•-) :  $Y(F_1)$  pour  $\varepsilon \rightarrow 0$  (Wanoschek et Hager, 1987)

Une analyse statistique est appliquée à toutes les mesures expérimentales obtenues qui se base sur la méthode des moindres carrés non linéaires. Il a été constaté que, pour chacune des rugosités équivalentes testées, que le nombre de Froude incident  $F_1$  est lié avec le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique par une loi de type logarithmique d'équation:

$$Y = b \ln \left( \frac{F_1 + 4}{5} \right) + c \quad (2.6)$$

Récapitulation des valeurs des coefficients  $b$  et  $c$ , ainsi que les coefficients de corrélation  $R^2$  issues de l'ajustement est montrée par le tableau (2).

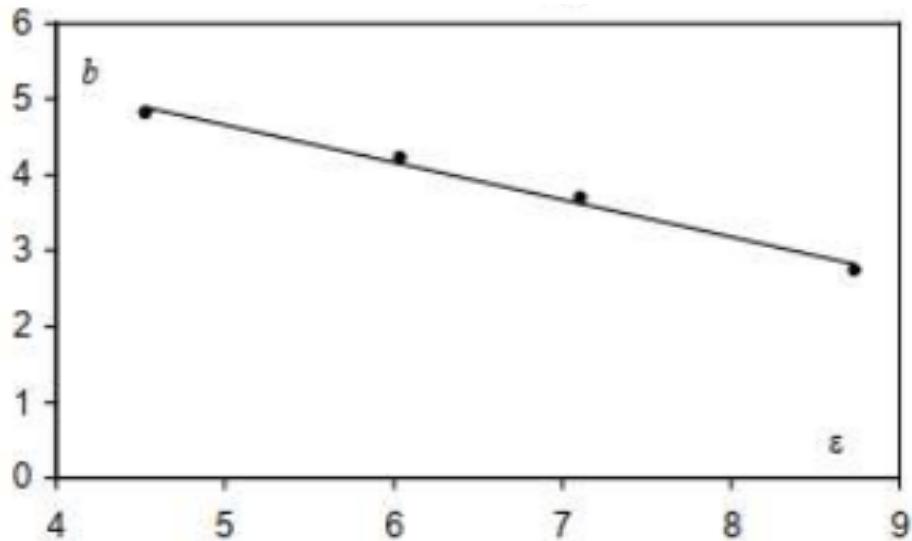
Tableau 2: Coefficients  $b$  et  $c$  issus de la relation (2.6).

$\varepsilon(\text{mm})$	$b$	$c$	$R^2$
4,53	4,82	-0,60	0,98
6,04	4,22	-0,60	0,98
7,11	3,70	-0,60	0,95
8,73	2,74	-	0,97

On constate d'après le tableau ci-dessus (2), l'augmentation de la rugosité équivalente «  $\varepsilon$  » avec la diminution du coefficient  $b$ . L'ajustement des couples de valeurs ( $\varepsilon, b$ ) par la

méthode des moindres carrés a donné une relation de type linéaire d'équation suivante :

$$b = 7.14 - \frac{1}{2}E \quad (2.7)$$



**Figure 6:** Illustration du coefficient  $b$  de la relation (2.6) en fonction de la rugosité équivalente  $\varepsilon$  (—) Courbe tracée issue par la relation (2.7).

D'après Le tableau (2) on constate que le coefficient  $c$  ne varie pas en fonction de la rugosité testée «  $\varepsilon$  » ainsi une valeur moyenne constante lui a été attribué.

$$C = -\frac{3}{5} \quad (2.8)$$

Par conséquent, selon les équations (2.7) et (2.8), la relation (2.6) s'écrit comme suit :

$$Y = \left( 7.14 - \frac{1}{2}E \right) \ln \left( \frac{F_1 + 4}{5} \right) - \frac{3}{5} \quad (2.9)$$

L'approche expérimentale (2.9) est justifiée dans la gamme  $4,53 \text{ mm} \leq \varepsilon \leq 8,73 \text{ mm}$ .

La représentation de  $Y = \Phi(F_1, \varepsilon)$  exprimée par l'approche expérimentale obtenue (2.9) est illustrée graphiquement sur la figure (17) variant en fonction des valeurs expérimentales  $Y_{Exp.}$ .

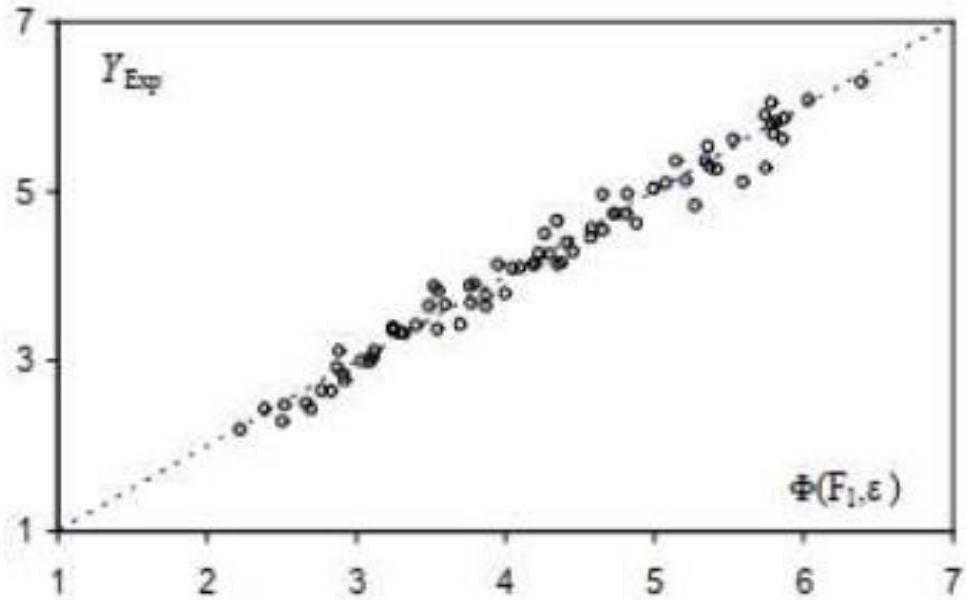


Figure 7: Représentation  $Y_{Exp}$  en fonction de  $F_1$ . (---) : la Première bissectrice.

Cette relation obtenue expérimentalement est validée par la représentation de la majorité des mesures expérimentales qui tourne autour de la première bissectrice.

### III.4. CONCLUSION

On peut conclure dans ce chapitre, que l'effet de la rugosité équivalente testée et imposée aux parois du canal d'expérimentation, à angle d'ouverture de  $90^\circ$  et à pente faible ou horizontale, sur les caractéristiques du ressaut hydraulique est remarquable.

En premier temps, l'étude s'est commencée par la variation de la longueur relative  $Lj/h_1$  du ressaut qui varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

Il a été remarqué que pour une valeur fixée du nombre de Froude incident, la diminution de la longueur relative du ressaut entraîne l'augmentation de la rugosité testée. Par ailleurs,

l'analyse statistique des mesures expérimentales a donné que, pour chaque rugosité équivalente testée expérimentalement, le nombre de Froude incident  $F_1$  est lié à la longueur relative  $Lj/h_1$  par une approche expérimentale adimensionnelle obtenue (2.4). En second temps, la variation du nombre de Froude incident  $F_1$  en fonction du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  du ressaut hydraulique a été étudiée sous l'effet de chaque rugosité équivalente examinée.

Nous avons pu constater que, pour un nombre de Froude  $F_1$  fixé, la diminution du rapport  $Y$  engendre l'augmentation de la rugosité équivalente. Cette approche adimensionnelle obtenue  $Y(F_1, \varepsilon)$  a été modélisée par une loi de type logarithmique [Equation (2.9)], déduite par l'analyse statistique des mesures expérimentales.

# **PARTIE II :**

---

## **ETUDE EXPERIMENTALE**

## Introduction de deuxième volet

### Aperçu général de la partie de contribution

Les écoulements brusquement variés qui se produisent dans les canalisations à ciel ouvert notamment de forme composée sont devenus un sujet très important de recherche d'actualité. par conséquent les activités les plus actuelles sont traitées sur les canaux rectangulaires composés de (Khattaoui et Achour 2012) et celles de (F.Riguet et al en 2020).

Les écoulements en lit composé sont caractérisés par une forte interaction d'une part, d'un régime rapide au lit mineur, d'autre part le régime relativement lent est réalisé au lit majeur. Il en résulte un transfert de masse entre les deux lits, associé à la formation de turbulences d'écoulement à l'interface de la section composée. ce qui provoque une dissipation de l'énergie, cette interférence change la capacité d'écoulement de la forme composée Proust (2005).

La complexité de ce processus physique est renforcée par le fait de l'interaction turbulente entre lits qui dépend à la fois de la géométrie de la canalisation et des paramètres hydrauliques (débit total, hauteur relative de débordement par exemple le rapport entre la hauteur d'eau dans le lit majeur et celle du lit mineur) Proust, (2005).

**Pour ce deuxième axe fondamental de notre contribution**, on va tester et interpréter l'efficacité des tapis rugueux exposés dans le lit majeur de la canalisation composée, aux différentes caractéristiques des écoulements brusquement variés et contrôlés.

Aussi par le biais de ce volet entamé, on cherchera à développer une approche adimensionnelle à caractère général variant en fonction du paramètre rugosité qui va gérer ces écoulements contrôlés et formés dans les ouvrages hydrauliques.

**Ce deuxième axe principal** est subdivisé en trois chapitres primordiaux :

- En premier lieu, On présentera le banc d'expérimentation avec leurs appareillages de mesure.
- En second lieu, on essayera de développer une approche théorique qui engendre surtout la caractéristique de résistance à l'écoulement, dont on voudrait voir son efficacité aux écoulements brusque que se manifeste au sein des ouvrages hydrauliques.

- En dernier lieu, on doit exploiter toutes les mesures expérimentales obtenues par l’analyse des écoulements brusques qui se produisent dans les canaux de forme composé rugueux, en but fondamental de produire des approches empiriques régissant les différentes caractéristiques d’écoulement.

# **CHAPITRE I :**

## **Illustration du banc expérimental**

## I.1.INTRODUCTION

Pour traiter l' étape d'expérimentation, on doit exposer un aperçu explicatif du banc d'essai, et de décrire les différents instruments et appareillages utiles au laboratoire.

## I.2. Banc d'essai

Les essais ont été réalisés dans un banc indiqué à la figure ci-dessous de caractéristiques géométriques suivantes : 10m de longueur ; 0,5 m de hauteur. Les parois du banc sont en plexiglas. Le banc d' essai aménagé aux essais est formé de deux sections surmontées, de caractéristiques suivantes : 4m de longueur ; 0,20m de hauteur ; 0,15 m de largeur au lit mineur et de 0,25m au miroir.

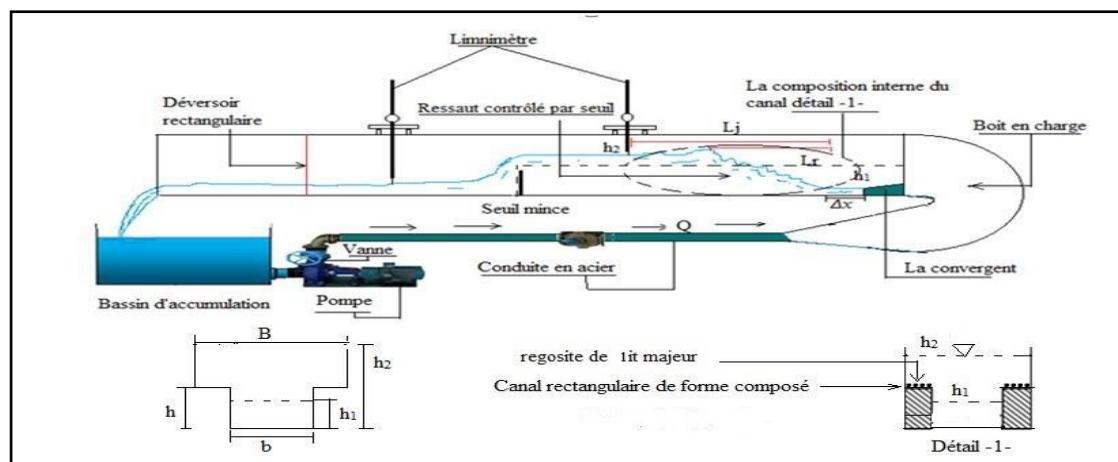


Figure 8: vue d'ensemble du canal d'essai



Figure 9: vue du canal

Le prototype des essais permettant à réaliser l' expérmentation est disposé au laboratoire possédant des caractéristiques géométriques bien définies. IL est conçu notamment pour réaliser les écoulements brusquement variés. Ce modèle est équipé des appareillages et instruments qui permettent de prendre toutes les mesures dimensionnelles nécessaires avec lesquelles on pourra produire les différents paramètres adimensionnels. Le régime torrentiel est créé par les ouvertures bien définies qui sont insérées à la boite sous pressions. Des différentes parois aussi sont conçues pour former et générer un écoulement de passage torrentiel au passage calme. Les débits volumiques sont assurés par une pompe arrivant à fournir plus de 55 l/s.



Photo 1: Pompe centrifuge axiale.



*Photo 2: La vanne de régulation du débit.*

## I.2. INSTRUMENTS UTILISES AU MESURAGE

### I.2.1. *Le mesurage des débits volumiques*

Le dispositif spécifique destiné aux mesures des débits dispose de caractéristiques bien définies suivantes : la larguer de l'échancrure de 11 cm ; largeur au miroir de 25 cm. il est lié directement à l'aval du canal de forme composé rugueux.

ce dispositif est validé par **Hachemi Rachdi (2007)**, avec des conditions d'applications.



*Photo 3: dispositif de mesurage des débits volumiques.*

Ce dispositif conçu cité précédemment est aménagé aux mesures des débits volumiques en faisant affleurer la lame déversant par l'instrument limnimètre. Une fois la hauteur obtenue en faisant l'injecter dans la formule (1.1) on aura explicitement la valeur du débit.

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

Sachant les caractéristiques suivantes :

Q : débit spécifique m<sup>3</sup>/s

$\beta = b/B$  : Rapport de l'échancrure .

b : échancrure de valeur : 11 cm

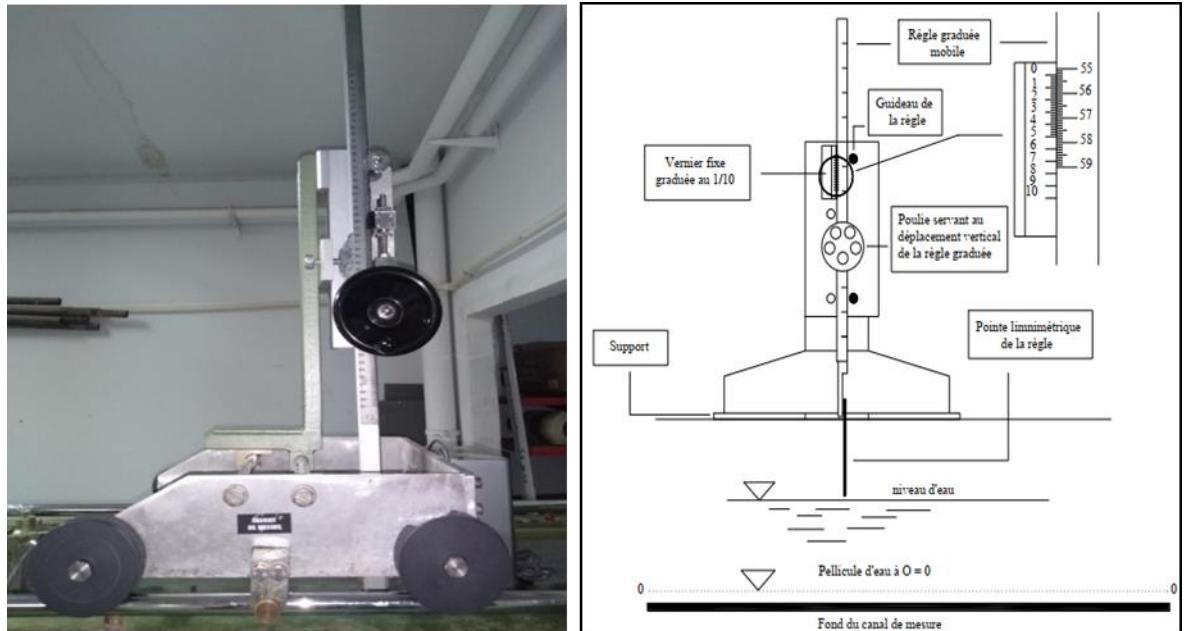
B : la largeur du déversoir 25 cm

g : la gravitation m/s<sup>2</sup>.

$h_{dev}$ : profondeur affleurée m.

### ***I.2.2. Instrument limnimétrique***

Les hauteurs d'eau des écoulements brusques développés et contrôlés au banc d'essai sont évalués par un instrument spécifique de double précision s'appelle le limnimètre. Cet appareil est bien installé et ajusté au front de l'écoulement créé. (photo 4)

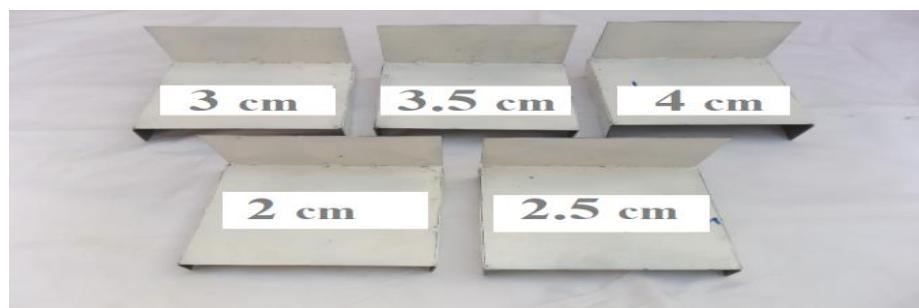


**Photo 4:** Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnométrique.

### I.3. Déroulement expérimental

#### I.3.1.les étapes des essais

Ces essais réalisés au laboratoire se sont spécifiés aux écoulements brusques produits et contrôlés au sein du banc d'expérimentation de section composée rugueuse. Des différentes ouvertures  $h_1$  ont été expérimentées (photo 5).



**Photo 5:** Différentes parois des ouvertures conçues.

La création des écoulements de passage du régime torrentiel au régime calme est réalisée et formée par des parois spécifiques placées en travers de cet écoulement. Ces différents seuils de control sont préparés au laboratoire (photo 6)



**Photo 6:** Les parois minces pour contrôler un écoulement de passage des régimes.

Après la conception des différentes parois de control, la formation des écoulements de passage des deux régimes est conditionnée par l'emplacement de ces dispositifs minces en travers de l'écoulement et ceci pour une hauteur déterminée de la paroi et de position fixée. Chaque formation du ressaut, on doit récapituler les différentes caractéristiques nécessaires tel que : les longueurs de l'écoulement, le nombre de Froude et le débit volumique pompé. Ces différents résultats obtenus dimensionnels permettront de produire des rapports adimensionnels suivants :

$$\text{le nombre de Froude } F_1 = \sqrt{\frac{Q}{g h_1^3 b^2}} \quad (1.2)$$

$Y = h_2/h_1$  rapport des profondeurs ;

$S = s/h_1$  rapport relatif du seuil ;

$L_j/h_1$  rapport de longueur relative ;

$L_r/h_1$  rapport de longueur du rouleau ;

$\varepsilon/B - b$  rapport de la rugosité relative.

#### I.4. la conception de la rugosité.

Ce moyen de rugosité est nécessaire à le concevoir au laboratoire vu l'écoulement très érosif auprès des ouvrages hydrauliques notamment à l'aval des barrages de stockage d'eau qui peut provoquer la détérioration de ces ouvrages. A cet effet ces tapis rugueux qui doivent imposées aux lits majeurs des canaux de section composée sont nécessaire à réaliser pour dissiper cette énergie importante d'écoulement. Par le moyen des pellets homogènes et uniformes on est arrivé à concevoir quatre tapis rugueux uniformes (photo 9).



Photo 7: a) section composée rugueuse b) section composée lisse.

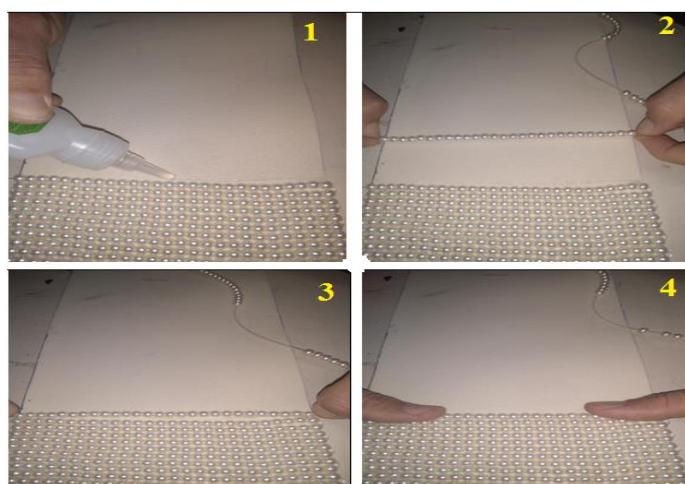
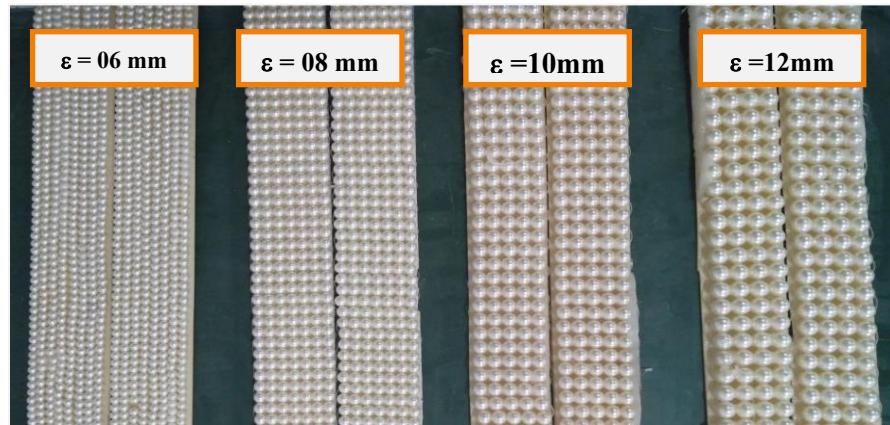


Photo 8: Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnométrique.



*Photo 9:* Les tapis rugueux divers.

### I.5. Récapitulation des résultats

**Pour ce deuxième axe** qui engendre le chapitre premier, on a énoncé avec précisément la canalisation d'essai aménagé au laboratoire avec leurs appareillages et instruments destinés à collecter les mesures des caractéristiques de l'écoulement de passage du régime torrentiel au régime calme. Cet écoulement brusque est produit par l'emplacement en travers des parois de control. Concernant le mesurage des débits volumiques, ils sont assurés par le déversoir inséré au canal d'essai dont on affleure les diverses lames déversant.

**En fin de cet axe deuxième**, on a décrit clairement la procédure de conception des différents tapis rugueux.

# CHAPITRE II :

## Etude théorique

## II.1. Aperçu général

Le premier axe de la bibliographie a exposé nettement les différentes caractéristiques régissant les écoulements de passages du régime tarentines au régime calme, qui sont développé et contrôlé par des parois minces. Ces caractéristiques sont : le nombre de Froude ; les rapports des longueurs d'écoulement ou du rouleau de surface ; les débits relatifs ...ect.

A travers ce deuxième axe qui engendre le deuxième chapitre, on va tenter de développer une relation théorique qui va gérer les écoulements de passage du régime torrentiel au régime fluvial. Cet écoulement se développe en canal rugueux de forme composée. La fonction adimensionnelle souhaité à développer est de forme  $(Y, F_1, Cr, \beta, \tau) = 0$ , tel que  $Y$  est le rapport des hauteurs d'écoulement,  $F_1$  est le nombre de Froude, Rapport de forme :  $\tau = h_1 / h$ ; Rapport de l'élargissement :  $\beta = b / B$ ; et le paramètre de résistance :  $Cr$ .

## II.2. Développement de l'approche théorique

### II.2.1. Description théorique

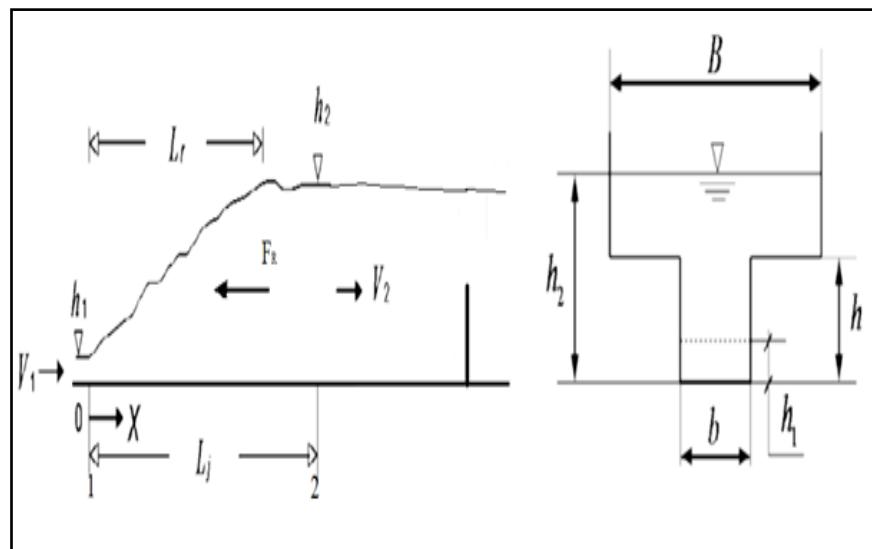


Figure 10: Illustration schématique du banc d'essai de section composée rugueux.

La figure ci-dessus illustre schématiquement l'écoulement de passage du régime torrentiel en régime fluvial développé en canal composé rugueux. Cette figure montre également les profondeurs amont et aval de l'écoulement développé.

Pour développer l'approche théorique qui gère cet écoulement de passage. On doit suivre les impérativement toutes les conditions d'applications soit la théorie de Bernoulli ou d'Euler.

Ces conditions facilitent et mènent à la résolution mathématique et de développement de la relation empirique adimensionnelle.

### ***II.2.2. Développement de la relation adimensionnelle selon Euler***

L'expression des écoulements développés est démontrée par application de la théorie d'Euler pour un système bien déterminé pendant un laps du temps. Cette relation est égale aux forces d'application sur la masse d'eau.

Ainsi :  $\Delta P = \sum F_{ext} \cdot \Delta t$  (2.1)

$\Delta P$  : est une caractéristique de la variation de masse de fluide entre deux sections bien fixée ( $\text{kg.m. s}^{-1}$ )

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

$\Delta t$  : Le laps du temps (s)

Les suppositions d'Euler aux écoulements sont :

- Forces de pression d'applications des liquides aux sections amont et aval sont hydrostatiques ;
- Les vitesses d'écoulement à la section amont est uniforme ;
- Les frottements dans l'écoulement de passage des deux régimes sont nuls ;

L'expressions (2.1) se formule comme suit :

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \sum F_{ext} \quad (2.2)$$

Sachant que :

$$P = \rho V v \quad (2.3)$$

$\rho$  : Masse spécifique ( $\text{kg/m}^3$ )

V : Capacité du liquide (m<sup>3</sup>)

v : vitesse d'écoulement (m/s)

p : la forme due au mouvement du liquide (N)

La variation de la quantité de mouvement dans les deux sections de l'écoulement brusquement varié de passage se forme comme suit :  $\Delta P = \Delta P_2 - \Delta P_1$  (2.4)

Avec :

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

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

$v_1$  et  $v_2$  : vitesses d'écoulement au niveau des deux sections d'écoulement .

L'expression (2.4) divisée par  $\Delta t$ , on aura ce qui suit :

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

La formule donnant le débit volumique est d'expression suivante :  $Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$  (2.8)

En faisant injecter (2.8) dans l'expression (2.7), on obtient ce qui suit :

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

Ensuite, en injectant (2.9) en relation (2.2) on déduit l'expression (2.10) :

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

L'expression (2.10) obtenue représente la théorie globale d'Euler qui s'applique entre deux sections d'un écoulement brusquement varié de passage.

Par conséquent la relation d'Euler peut s'appliquer entre deux sections d'un ressaut développé de la manière suivante :

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

En faisant intervenir la force de résistance dans (2.11), on aura l'expression (2.12)

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

$A_1$  et  $A_2$  sont données respectivement par :

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

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

Les forces  $F_1$  et  $F_2$  sont données respectivement par :

$$f_1 = \bar{\omega} \left( \frac{h_1}{2} \right) bh_1 \text{ et } f_2 = \bar{\omega} \cdot (h_2 - h/2) \cdot b \cdot h + \bar{\omega} \cdot [(h_2 - h)/2] \cdot B \cdot (h_2 - h). \quad (2.15)$$

L'expression de l'impulsion de frottement engendré par le facteur rugosité exposé dans le banc d'essai s'écrit comme suit :

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

avec :

$Lj$  : caractéristique de l'écoulement (m) ;

$C$  : facteur de rugosité ;

$(B-b)$  : Périmètre du canal rugueux (m) ;

$\rho$  : Masse spécifique (kg/m<sup>3</sup>) ;

En injectant tous ces paramètres et expressions cités précédemment dans la relation (2.17) on aura la nouvelle approche développée comme suit :

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

En faisant remplacer cette expression suivante  $\left( \frac{1}{2} \cdot \frac{LjC}{h_1} \cdot \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right) \right)$  par le paramètre  $Cr$  dans l'approche (2.17) on déduit ce qui suit:

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

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

On note que cette approche est semi-théorique car le paramètre  $C_r$  se déduit indirectement par les mesures d'essai. On note aussi que l'approche de Khataoui et Achour (2012) se déduit de l'expression (2.19) quand le paramètre  $C_r$  s'annule. Cette dernière (1.20) gère l'écoulement de passage des deux régimes produit en canal composé lisse.

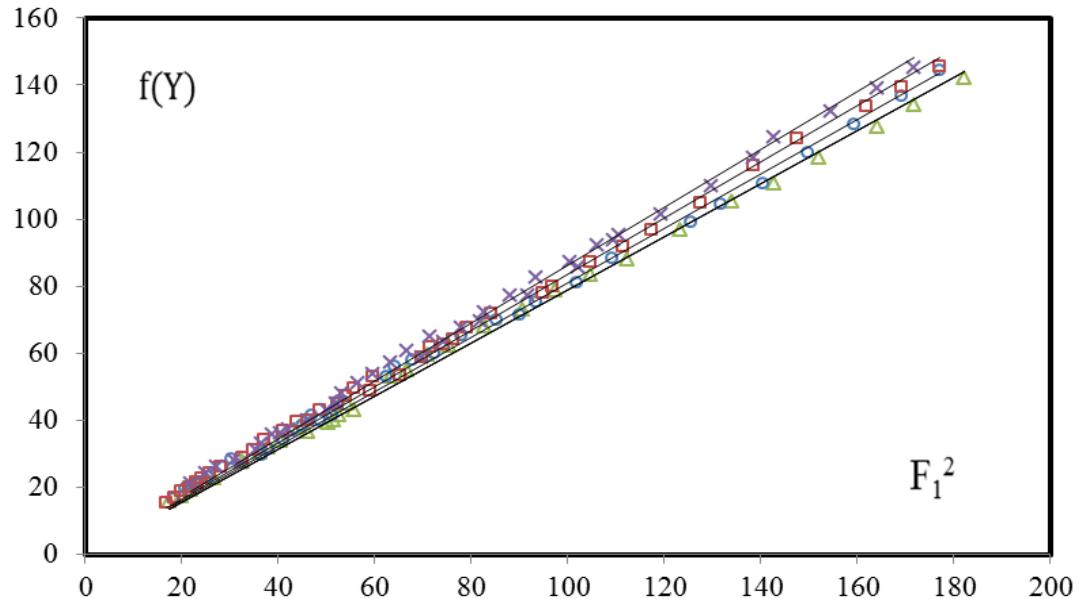
$$F_1^2 \left( 1 - \frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau} \right) = \frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1 \quad (2.20)$$

### II.3. Récapitulation des Résultats

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

L'évaluation du paramètre  $C_r$  se déduit par les mesures obtenues au laboratoire, ainsi une illustration sur la figure (22) concernant

la variation de l'expression  $f(Y) = \frac{\beta F_1^2}{Y - (1-\beta)/\tau} + \frac{\frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1}{2}$  en fonction de  $F_1^2$  pour quatre rugosités testées :  $\varepsilon$  ( mm ) = 06 ; 08 ; 10 et 12.



**Figure 11:** Variation  $f(Y)$  en fonction de  $F_1^2$ .

$\varepsilon(\text{mm}) = (\text{green } \times) 06, (\text{red } \square) 08, (\text{blue } \circ) 10 \text{ et } (\text{green } \triangle) 12$ .

L'illustration (2.2) montre quatre nuages différents, pour chacun lui correspond  $\varepsilon/B-b$ .

La corrélation des mesures d'essai de cet écoulement de passage produit, indique que chaque allure pourrait peut s'accorder sous une expression suivante :

$$\frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{1-\beta}{\tau}} + \frac{\frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1}{2} = SF_1^2 \quad (2.21)$$

Le facteur 'S' désigne le paramètre  $(1-C_r)$ . Ainsi les résultats obtenus de  $C_r$  sont mentionnés au tableau (3) .

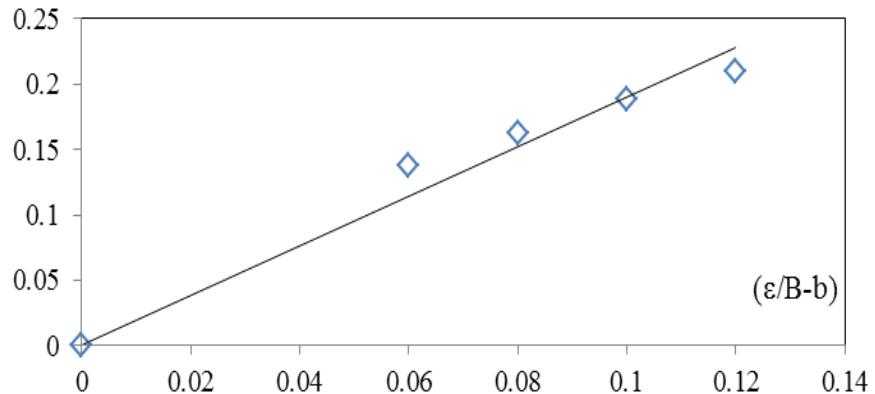
**Tableau 3: Illustration  $C_r$  déduit des courbes d'ajustement**

$\varepsilon/B-b$	$C_r$	$R^2$
<b>0,06</b>	0,13	0,99
<b>0,08</b>	0,16	0,99
<b>0,10</b>	0,18	0,99
<b>0,12</b>	0,21	0,99

Les valeurs calculées indique que le facteur  $C_r$  s'accroît avec l'accroissement de  $(\varepsilon/B-b)$ . la corrélation des couples des mesures  $(\varepsilon/B-b, C_r)$  produit une approche suivante :

$$C_r=1,896 (\varepsilon/B-b).$$

La figure (23) représente la variation de  $C_r$  en fonction de  $(\varepsilon/B-b)$ .

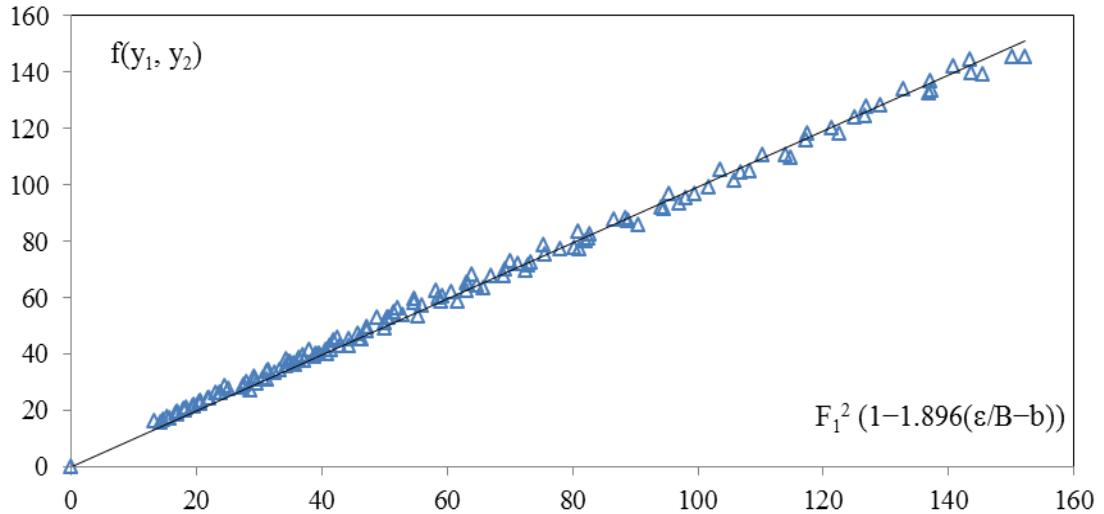


**Figure 12:** Évolution du paramètre  $C_r$  en fonction de  $(\varepsilon/B-b)$ .

En faisant introduire l'expression de  $C_r$  dans l'expression (2.21) ainsi l'approche se réécrit :

$$F_1^2(1 - 1.896(\varepsilon/B - b)) = \frac{\beta F_1^2}{Y - (1 - \beta)/\tau} + \frac{\frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} - 1}{2} \quad (2.22)$$

La figure (24) illustre la comparaison entre les deux membre suivantes :  $f(y_1, y_2) = \xi(\varepsilon/B-b, F_1)$ . Cette illustration montre que la plus part des motifs expérimentaux s'ajustent parfaitement de bissectrice justifiant la fiabilité de ces dernières.



**Figure 13:** illustration de  $f(y_1, y_2)$  variant avec  $F_1^2 (1 - 1.896(\varepsilon/B - b))$

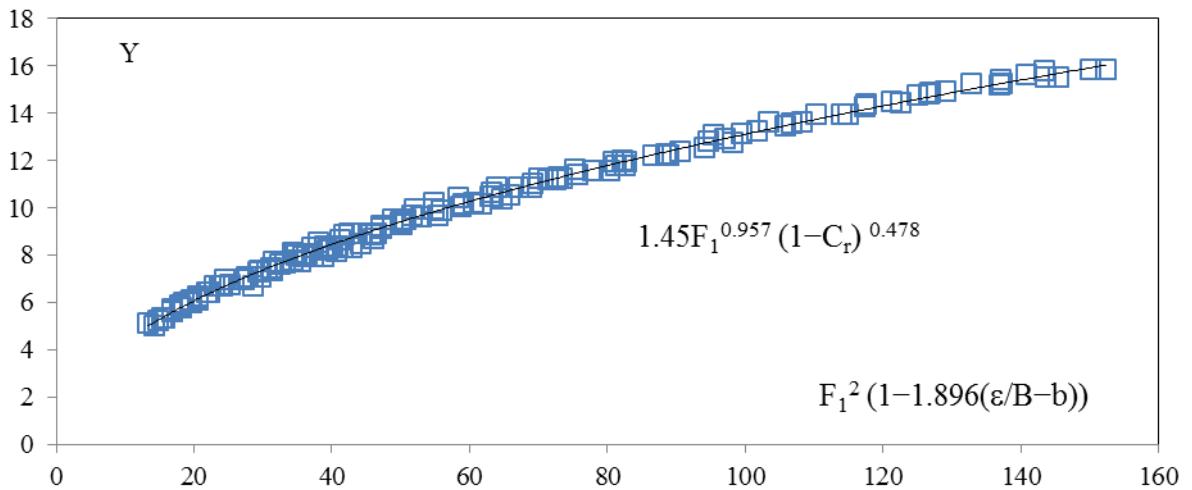
( $\Delta$ ) mesures d'essai obtenues .

### II.3.2. étude du $Y = h_2/h_1$ de l'écoulement variant avec le paramètre $Cr$ et du Froude $Fr$

L'approche (2.22) obtenue est implicite, à cet effet nous avons analyser les mesures expérimentales du rapport  $Y$  avec l'expression qui engendre le coefficient de résistance et du nombre de Froude. Cette étude a permis d'avoir une approche explicite permettant de déduire le rapport  $Y$  explicitement (2.23). Cette corrélation des mesures expérimentales est illustrée dans la figure (25).

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

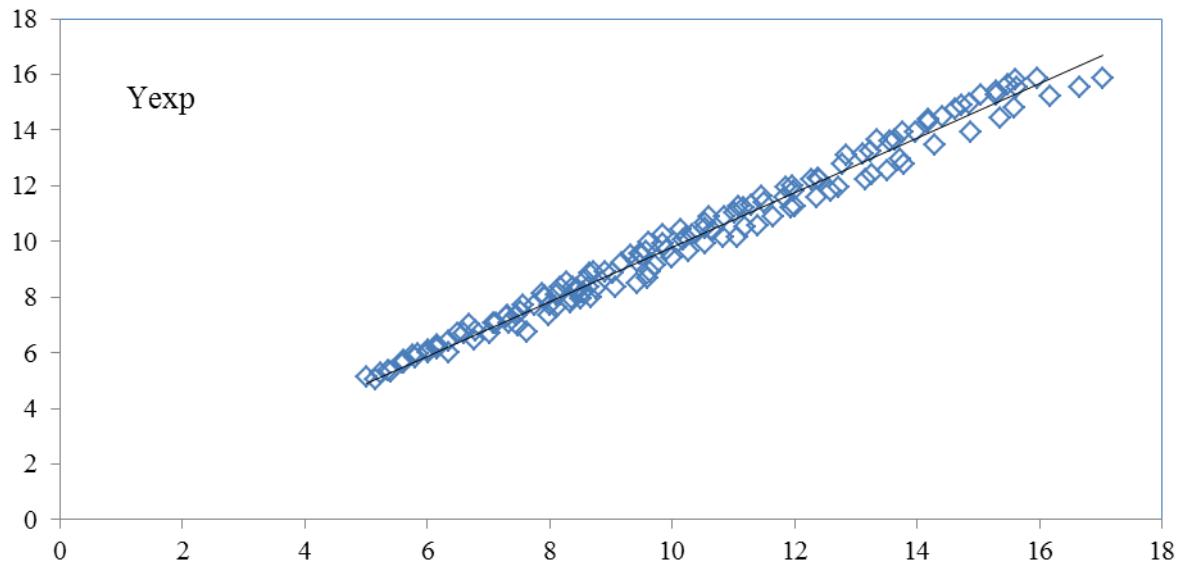
$$0,00 \leq \varepsilon/B - b \leq 0,12$$



**Figure 14:** illustration du  $Y$  avec de  $F_{12}$  ( $1-C_r$ ).

(□) motifs d'essai .

La figure ci-dessous indique clairement la comparaison entre les deux expressions qui se représentent par le rapport  $Y$  expérimental avec l'approche explicite .on déduit que les motifs d'expérimentation s'ajustent nettement autour de bissectrice validant cette dernière.



**Figure 15:** illustration de  $Y$  avec l'approche (2.22).

(□)Motifs d'essai.

Le tableau ci-dessous montre que l'erreur relative entre le rapport Y expérimental et Y de l'approche théorique , ne dépasse pas le pourcentage de 5% , ce qui valide l'approche empirique obtenue.

**Tableau 4: rapport Y exp et celui Y de l'approche empirique obtenue.**

<b>Y<sub>exp</sub></b>	<b>Y<sub>app</sub></b>	<b>ΔY/Y (%)</b>	<b>Y<sub>exp</sub></b>	<b>Y<sub>app</sub></b>	<b>ΔY/Y (%)</b>
5.13	4.94	3.64	14.75	14.65	0.65
5.35	5.29	1.14	15.25	15.33	-0.53
5.63	5.53	1.74	15.55	15.67	-0.79
6.13	6.09	0.49	15.85	16.02	-1.05
6.78	6.72	0.78	6.73	7.14	-6.18
7.08	7.06	0.15	6.03	5.92	1.78
7.28	7.24	0.52	6.46	6.32	2.19
7.48	7.46	0.26	6.71	6.57	2.21
7.73	7.94	-2.82	7.80	7.81	-0.13
7.95	8.30	-4.44	7.97	8.13	-2.01
8.18	8.49	-3.80	8.49	8.84	-4.20
8.33	8.71	-4.68	8.69	9.01	-3.72

**Tableau 5: (Suit) comparaison entre Y exp et celui Y de l'approche empirique obtenue.**

<b>Y<sub>exp</sub></b>	<b>Y<sub>app</sub></b>	<b>ΔY/Y (%)</b>	<b>Y<sub>exp</sub></b>	<b>Y<sub>app</sub></b>	<b>ΔY/Y (%)</b>
9.50	9.27	2.39	6.97	6.99	-0.34
9.67	9.52	1.47	7.33	7.48	-1.94
8.12	7.81	3.83	7.60	7.60	0.02
8.32	8.39	-0.78	7.93	7.97	-0.47
8.88	8.60	3.10	9.13	9.12	0.14
10.24	9.80	4.26	9.40	9.38	0.19
10.44	10.11	3.15	9.63	9.65	-0.14
10.88	10.58	2.78	9.90	9.91	-0.14
11.24	11.05	1.68	10.17	10.18	-0.16
11.64	11.45	1.63	10.50	10.52	-0.21

11.96	11.85	0.88	8.36	8.50	-1.69
12.24	12.26	-0.18	8.92	9.04	-1.37
13.10	12.84	1.98	10.16	10.40	-2.36
13.65	13.36	2.09	10.56	10.73	-1.58
13.95	13.79	1.16	10.88	10.98	-0.88
14.40	14.22	1.28	11.24	11.31	-0.61
14.90	14.76	0.96	11.60	11.65	-0.39
15.25	15.08	1.09	11.96	11.98	-0.21
15.65	15.52	0.80	12.24	12.41	-1.42
5.25	5.17	1.45	12.56	12.76	-1.59
5.75	5.54	3.74	12.76	13.02	-2.05
5.90	5.70	3.42	11.20	11.25	-0.41
5.98	5.78	3.26	11.80	11.88	-0.67
6.29	6.09	3.04	12.40	12.52	-0.98
6.71	6.43	4.21	12.95	12.96	-0.05
7.00	6.63	5.32	13.45	13.51	-0.42
8.06	8.05	0.15	13.95	14.06	-0.81
8.20	8.36	-1.95	14.45	14.51	-0.44
8.34	8.57	-2.75	14.80	14.74	0.40
7.07	7.27	-2.95	15.20	15.31	-0.75
7.33	7.39	-0.82	15.55	15.78	-1.46
7.70	7.69	0.11	15.85	16.13	-1.74
8.00	7.87	1.60	11.50	11.27	2.03

Tableau 6: (Suit)comparaison entre  $Y_{\text{exp}}$  et celui  $Y$  de l'approche empirique obtenue.

$Y_{\text{exp}}$	$Y_{\text{app}}$	$\Delta Y/Y (\%)$	$Y_{\text{exp}}$	$Y_{\text{app}}$	$\Delta Y/Y (\%)$
8.90	8.67	2.59	11.90	11.71	1.64
9.53	9.43	1.11	12.30	12.15	1.23
9.93	9.81	1.20	12.75	12.60	1.20
10.07	10.14	-0.72	13.10	13.05	0.38

8.56	8.21	4.06	13.55	13.39	1.15
9.96	9.57	3.93	14.00	13.86	1.03
10.68	10.51	1.61	14.40	14.32	0.53
11.04	10.99	0.47	14.85	14.80	0.37
11.40	11.47	-0.66	15.45	15.27	1.15
11.80	11.97	-1.42	8.96	9.02	-0.62
12.28	12.38	-0.85	9.68	9.67	0.08
11.30	11.27	0.25	9.96	10.01	-0.46
13.25	13.25	0.00	10.24	10.26	-0.18
13.60	13.57	0.20	10.52	10.51	0.06
13.95	14.00	-0.39	10.72	10.77	-0.47
14.50	14.44	0.40	10.88	10.94	-0.57
14.95	14.88	0.45	6.90	7.10	-2.86
15.40	15.33	0.47	7.20	7.35	-2.08
15.80	15.66	0.86	7.50	7.54	-0.54
5.05	5.09	-0.76	7.83	7.86	-0.37
5.33	5.33	-0.11	8.20	8.19	0.14
5.63	5.54	1.59	8.33	8.32	0.15
5.80	5.74	0.99	8.63	8.59	0.55
6.00	5.95	0.79	8.90	8.79	1.28
6.09	5.94	2.39	9.07	8.92	1.61
6.23	6.09	2.30	9.40	9.40	0.03
6.43	6.28	2.30	9.70	9.74	-0.43
6.69	6.53	2.38	10.00	10.09	-0.90
8.89	8.98	-1.10	10.23	10.30	-0.66
7.07	7.02	0.66	5.97	6.23	-4.29
7.33	7.26	1.02	6.14	6.33	-3.06
7.73	7.50	3.03	6.29	6.49	-3.21
8.03	7.86	2.11	6.51	6.70	-2.81

**Tableau 7: Suite et fin . Comparaison  $Y_{\text{exp}}$  avec  $Y_{\text{app}}$  .**

$Y_{\text{exp}}$	$Y_{\text{app}}$	$\Delta Y/Y (\%)$	$Y_{\text{exp}}$	$Y_{\text{app}}$	$\Delta Y/Y (\%)$
8.33	8.11	2.67	6.86	6.86	0.01
8.63	8.55	0.99	7.11	7.18	-0.90
9.23	9.12	1.22	7.31	7.34	-0.36
9.53	9.44	0.94	7.71	7.67	0.59
10.23	10.30	-0.66	8.43	8.40	0.39
10.40	10.64	-2.27	8.71	8.62	1.04
8.36	8.32	0.45	9.03	9.03	0.02
8.92	8.85	0.76	5.08	5.25	-3.51
9.28	9.39	-1.21	5.30	5.47	-3.18
9.68	9.86	-1.89	5.53	5.73	-3.72
10.16	10.18	-0.20	5.65	5.82	-2.99
10.48	10.50	-0.21	5.73	5.91	-3.19
10.88	10.83	0.50	5.95	6.04	-1.53
11.20	11.15	0.42	6.38	6.40	-0.43
11.60	11.82	-1.87	6.55	6.63	-1.25
12.24	12.41	-1.36	6.78	6.91	-1.99
12.00	11.94	0.48	7.00	7.14	-2.06
12.80	12.79	0.07	7.20	7.29	-1.20
13.15	13.11	0.27	7.40	7.57	-2.33
13.65	13.66	-0.06	7.68	7.86	-2.45
14.30	14.21	0.64	7.85	8.11	-3.27

## II.4. CONCLUSION

Pour ce deuxième axe qui engendre le deuxième chapitre théorique, nous avons tenté d'analyser l'effet du paramètre rugosité sur les caractéristiques de l'écoulement produit dans les canaux composés rugueux.

En premier temps, on a analysé l'approche semi théorique expérimentalement en but de produire une approche homologue explicite  $Y$ . Cette nouvelle fonction explicite aboutie permet d'évaluer directement cette caractéristique d'écoulement en fonction du nombre de Froude et du facteur rugosité testé imposé au lit majeur du canal composé.

En deuxième temps, on a corrélé toutes les mesures expérimentales du rapport  $Y$  avec celles déduites de l'approche empirique adimensionnelle développée  $Y_{\text{appr}}$  dont elle varie en fonction du Froude  $Fr$  et du facteur rugosité  $Cr$ . cette corrélation a montré effectivement la validité de cette approche théorique obtenue ainsi la fiabilité des mesures expérimentales réalisées au laboratoire. Par conséquent, l'erreur relative de ces mesures déduites des deux expressions obtenues ne dépasse en majorité les 5%.

# **CHAPITRE III :**

## **Interprétation des résultats expérimentaux**

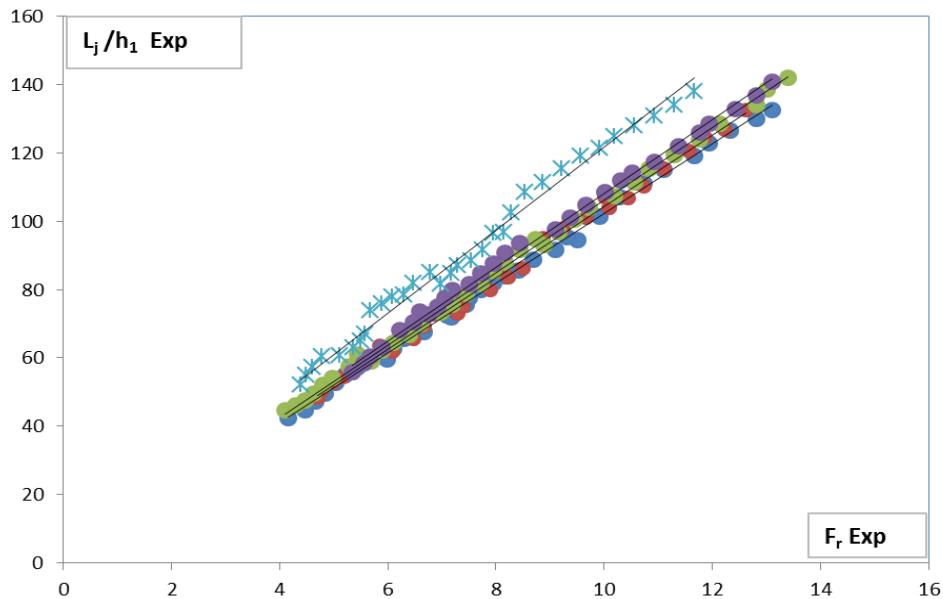
### III.1. INTRODUCTION

A travers ce dernier chapitre, nous allons contribué à l'étude comparative des caractéristiques du ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composé avec lit majeur et celui mineur rugueux . Cette étude va permettre d'obtenir des approches empiriques adimensionnelles régissant ce type du ressaut hydraulique et de juger lequel le type du ressaut hydraulique est plus rentable.

### III.2. Longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_r$ pour le lit majeur rugueux:

La Figure 2.1 montre la représentation graphique de la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_r$  de l'écoulement incident, pour Cinq rugosités absolues :  $\epsilon$  (mm)= **0, 6, 8, 10, 12**. Cinq nuages de points distincts sont perceptibles, correspondant chacun à une rugosité absolue  $\epsilon$ . On constate que pour une rugosité absolue fixe, l'augmentation du nombre de Froude engendre celle  $\epsilon$  la longueur relative du ressaut.

En outre, pour une valeur fixe du nombre de Froude incident, l'augmentation de la rugosité absolue provoque la diminution de la longueur relative du ressaut.



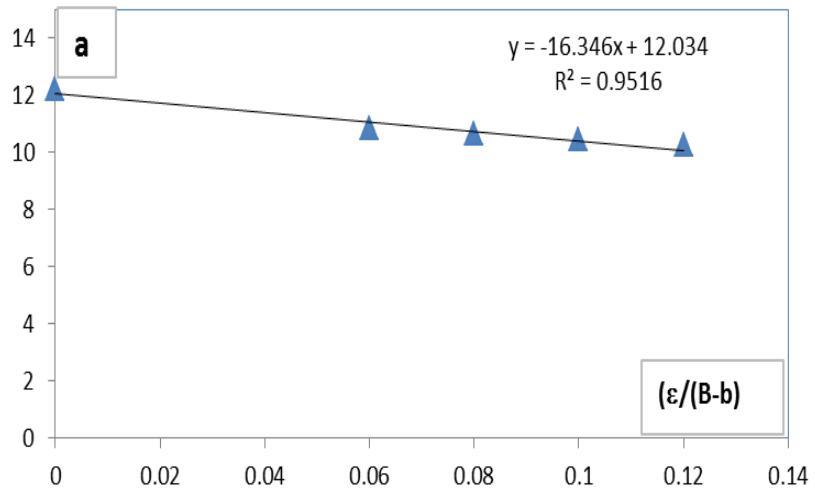
**Figure 16:** La variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $Fr$ .

Par ailleurs, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés non linéaire, montre que pour chaque rugosité absolue, un ajustement linéaire de la forme  $L_j/h_1 = a \cdot Fr$  est possible. La figure 27 le montre bien. Le tableau : regroupe les valeurs du coefficient (a).

**Tableau 8: Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique  $L_j/h_1 = f(Fr)$**

Rugosité	$\varepsilon/(B-b)$	Equation linéaire pour chaque allure= (a)	$R^2$
12	0.12	10.2310	0.9983
10	0.1	10.433	0.9954
8	0.08	10.623	0.9984
6	0.06	10.815	0.9975
0	0	12.181	0.989

Le tableau montre, que le coefficient 'a' diminue progressivement avec l'augmentation de la rugosité absolue ( $\varepsilon$ ). L'ajustement statistique des couples de valeurs ( $\varepsilon/(B-b)$ , a) par la méthode des moindres carrés donne la relation de type linéaire suivante :

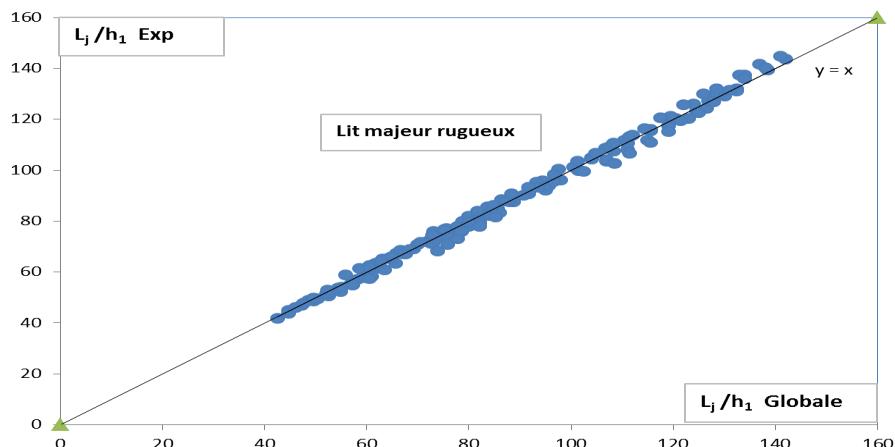


**Figure 17:** L'ajustement statistique des couples de valeurs  $(\varepsilon/(B-b), a)$

$$a = -16,346 x + 12.034$$

Celle-ci est représentée dans la figure 27

La relation globale adimensionnelle obtenue est mentionnée dans la figure 28



**Figure 18:** Représentation graphique de  $L_j/h_1$  expérimentale en fonction de  $L_j/h_1$  globale d'un lit majeur rugueux

On a constaté que l'effet réducteur de la rugosité imposée au lit majeur par rapport à la longueur du ressaut hydraulique est perceptible. ainsi, la majorité de toutes les mesures expérimentales tournent autour de la première bissectrice.

Ce qui justifié la fiabilité de mesures obtenues

**Tableau 9: Récapitulation des résultats pour le ressaut hydraulique en canal rectangulaire composé avec lit majeur rugueux**

$Lj/h_1 = (-16.346(\epsilon/(B-b)) + 12.034) * Fr$				
Fr	Lj/h1 Exp	$\epsilon/(B-b)$	Lj/h1 Globale	err relative
4.158338	42.5000	0.12	41.88477587	-1.468849041
4.462122	44.7500	0.12	44.94463865	0.433063104
4.668576	47.2500	0.12	47.02413767	-0.480311473
4.842982	49.5000	0.12	48.78084333	-1.47426042
7.09454	72.5000	0.12	71.45961599	-1.455904837
7.456259	75.5000	0.12	75.10302141	-0.528578716
5.039816	52.5714	0.12	50.76344915	-3.561577174
5.203262	54.8571	0.12	52.4097524	-4.66972338
5.451668	57.1429	0.12	54.91181688	-4.062951093
5.746314	60.0000	0.12	57.87963229	-3.66340909
5.995771	59.6667	0.12	60.3922816	1.201502765
6.096539	62.6667	0.12	61.40726477	-2.050900499
6.299746	65.6667	0.12	63.45407003	-3.486926271
7.510355	77.6667	0.12	75.64790295	-2.668631427
7.728038	80.0000	0.12	77.84051173	-2.774247272
7.947785	82.0000	0.12	80.0539043	-2.430981626
8.169576	84.0000	0.12	82.2878873	-2.08063757
6.660661	67.6000	0.12	67.08937314	-0.761114369
7.166404	72.0000	0.12	72.18345787	0.254155
7.359215	75.6000	0.12	74.12554946	-1.989125952
8.415884	85.6000	0.12	84.76882626	-0.980518159
8.687352	88.8000	0.12	87.50317489	-1.482032062
9.099901	91.6000	0.12	91.65857462	0.063905228
9.518782	94.4000	0.12	95.87774628	1.541281831

9.308557	95.5000	0.12	93.76024932	-1.855531201
9.926064	101.5000	0.12	99.98008146	-1.520221348
10.28482	107.0000	0.12	103.5936047	-3.288229374
10.73919	111.0000	0.12	108.170237	-2.616027362
11.10737	115.0000	0.12	111.8787324	-2.789866773
11.66734	119.0000	0.12	117.5190294	-1.260196433
11.95075	123.0000	0.12	120.3736656	-2.181818081
12.33214	126.5000	0.12	124.2152	-1.839388396
12.81446	130.0000	0.12	129.0733449	-0.717929074
13.10679	132.5000	0.12	132.0179138	-0.365167241
4.703286	48.5000	0.1	48.91135703	0.841025582
4.772964	50.2500	0.1	49.63596241	-1.237082061
4.984035	52.7500	0.1	51.83097021	-1.773128658
5.162238	54.5000	0.1	53.68417485	-1.519675316
5.306295	56.7500	0.1	55.18228459	-2.840975901
5.488215	58.2500	0.1	57.07414741	-2.060219279
5.672169	60.5000	0.1	58.98714946	-2.564712075
5.858132	63.5000	0.1	60.92105966	-4.233249313
6.089323	61.7143	0.1	63.32530043	2.544030117
6.483049	65.7143	0.1	67.41982131	2.529724292
7.294755	73.1429	0.1	75.86107829	3.583156489
7.386899	75.1429	0.1	76.81931646	2.182340839
7.892656	80.0000	0.1	82.07888539	2.532789504
8.225341	83.6667	0.1	85.53860649	2.188415149
8.506054	86.3333	0.1	88.45785806	2.401736576
6.660661	69.2000	0.1	69.26687638	0.096548867
6.848867	72.8000	0.1	71.22411081	-2.212578261
7.102513	76.0000	0.1	73.86187637	-2.894759435
7.618938	82.0000	0.1	79.23238016	-3.493041394

8.014108	86.0000	0.1	83.34191815	-3.189369654
9.23883	98.0000	0.1	96.07828539	-2.000154985
9.6598	101.2000	0.1	100.4561249	-0.740497555
10.08698	104.0000	0.1	104.8985083	0.856550116
10.44763	106.8000	0.1	108.6491308	1.701928725
10.73919	110.4000	0.1	111.6810917	1.147098131
8.875645	95.0000	0.1	92.30138042	-2.923704466
10.01535	107.0000	0.1	104.1536686	-2.732819188
10.64779	111.0000	0.1	110.7306175	-0.243277303
11.10737	115.5000	0.1	115.5099529	0.008616446
11.57337	120.5000	0.1	120.3561374	-0.119530733
11.85603	124.5000	0.1	123.2955558	-0.976875567
12.23642	127.0000	0.1	127.2513774	0.197543963
12.62079	132.5000	0.1	131.2486231	-0.953440032
4.091805	44.7500	0.08	43.89001347	-1.959412777
4.292472	46.0000	0.08	46.0424232	0.092139378
4.462122	47.5000	0.08	47.86215276	0.756657897
4.633951	49.5000	0.08	49.70524372	0.41292167
4.807931	52.0000	0.08	51.57140365	-0.831073647
4.984035	54.2500	0.08	53.46035083	-1.477074426
5.285635	57.4286	0.08	56.69540801	-1.293161911
5.451668	60.8571	0.08	58.47633548	-4.071403167
5.696848	59.0000	0.08	61.10621463	3.446809197
5.895564	62.0000	0.08	63.23770874	1.957232107
6.096539	64.3333	0.08	65.39342567	1.621099259
6.40218	66.6667	0.08	68.67183243	2.919924656
6.608692	70.0000	0.08	70.88694781	1.251214562
6.975306	73.3333	0.08	74.81936394	1.986157764
7.187743	75.6667	0.08	77.0980299	1.856549689

7.456259	78.6667	0.08	79.97822191	1.639890479
7.728038	81.6667	0.08	82.89341232	1.479907295
7.947785	85.3333	0.08	85.25048396	-0.097183459
8.169576	88.0000	0.08	87.62948264	-0.422822716
8.44966	91.6667	0.08	90.6337613	-1.139647467
8.732875	94.6667	0.08	93.67160906	-1.062283033
8.892829	93.2000	0.08	95.38732952	2.293102799
9.169278	96.8000	0.08	98.35260808	1.578614042
9.448533	100.4000	0.08	101.3479923	0.935383383
9.730568	104.0000	0.08	104.3731825	0.357546361
10.01535	108.4000	0.08	107.427888	-0.904897274
10.19473	107.5000	0.08	109.3519412	1.693560447
10.55665	111.5000	0.08	113.2340361	1.531373547
10.83084	115.5000	0.08	116.1750892	0.581096335
11.293	119.5000	0.08	121.1323651	1.34758793
11.76156	124.0000	0.08	126.1582119	1.710718503
12.14094	128.5000	0.08	130.2276387	1.32662981
12.81446	134.0000	0.08	137.4519484	2.51138557
13.0091	138.5000	0.08	139.539804	0.745166562
13.40132	142.0000	0.08	143.7468598	1.215233362
5.342515	55.7500	0.06	59.05210494	5.591849675
5.561554	58.5000	0.06	61.4731911	4.836565411
5.672169	60.5000	0.06	62.69584013	3.502369735
5.895564	63.0000	0.06	65.1650866	3.322464094
6.582759	73.5000	0.06	72.7608137	-1.015912632
6.21965	68.2857	0.06	68.74728521	0.671402402
6.483049	70.5714	0.06	71.65869817	1.51728907
6.750065	72.8571	0.06	74.61008788	2.34947454
6.930061	75.1429	0.06	76.59962558	1.901795769

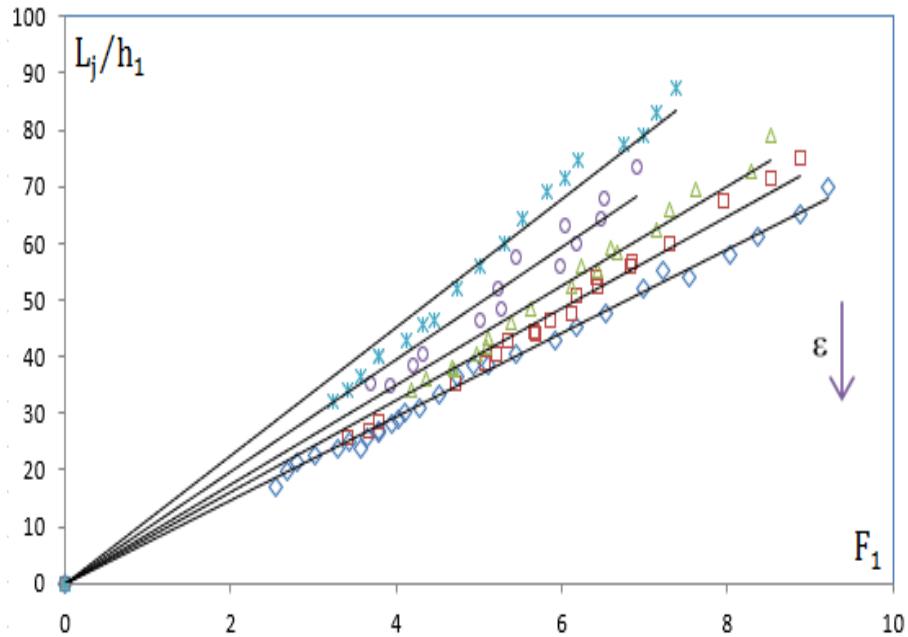
7.06609	77.7143	0.06	78.10319036	0.497936956
7.202998	80.0000	0.06	79.61646617	-0.481726766
7.510355	81.6667	0.06	83.01375896	1.622733762
7.728038	84.6667	0.06	85.41986262	0.881757393
7.947785	87.6667	0.06	87.8487738	0.207296157
8.169576	90.6667	0.06	90.30028031	-0.405742212
8.44966	93.6667	0.06	93.39612428	-0.289671965
9.099901	97.6000	0.06	100.5833939	2.966089908
9.378458	101.2000	0.06	103.6623458	2.375352202
9.6598	104.8000	0.06	106.7720885	1.847007544
10.01535	108.4000	0.06	110.7021074	2.07955154
10.30286	112.0000	0.06	113.8800388	1.650894036
10.52027	114.4000	0.06	116.2830855	1.619397622
10.92276	117.5000	0.06	120.7318816	2.676908198
11.38621	122.0000	0.06	125.8544571	3.062630551
11.76156	126.0000	0.06	130.0032997	3.079383157
11.95075	128.5000	0.06	132.0944808	2.721143788
12.42811	133.0000	0.06	137.3708422	3.181783038
12.81446	137.0000	0.06	141.6412501	3.27676445
13.10679	141.0000	0.06	144.8725325	2.673061899
7.947785	96.5000	0	95.6436433	-0.895361853
8.281232	102.5000	0	99.65634297	-2.853463162
8.534298	108.5000	0	102.7017382	-5.645729002
8.875645	111.5000	0	106.8095094	-4.391454128
9.221425	115.5000	0	110.970632	-4.081591603
9.571583	119.0000	0	115.1844305	-3.31257396
9.926064	121.5000	0	119.4502546	-1.715982462
10.19473	125.0000	0	122.6833864	-1.888286358
10.55665	128.0000	0	127.0387598	-0.756651114

10.92276	131.0000	0	131.4444872	0.338155827
11.293	134.0000	0	135.8999994	1.398086422
11.66734	138.0000	0	140.4047464	1.712724406
6.975306	81.6000	0	83.94083205	2.788669106
7.166404	84.8000	0	86.24050204	1.67033123
7.294755	87.2000	0	87.78508531	0.666497399
7.553726	88.4000	0	90.90153687	2.751919223
7.74992	91.6000	0	93.26254295	1.782648099
8.147305	96.8000	0	98.04466976	1.269492533
5.121322	60.5714	0	61.62998667	1.717602357
5.368437	62.8571	0	64.60377484	2.703606694
5.493443	64.8571	0	66.10809449	1.892282093
5.577312	67.1429	0	67.11736757	-0.037977614
6.307045	78.5714	0	75.89897776	-3.521062986
6.483049	82.0000	0	78.01701345	-5.105279445
6.794916	85.1429	0	81.77001656	-4.124788915
4.393999	52.2500	0	52.87738561	1.186491348
4.496315	55.0000	0	54.10865252	-1.647328923
4.599413	57.2500	0	55.34933061	-3.433951891
4.772964	60.5000	0	57.43784946	-5.331241625
5.672169	73.7500	0	68.25887614	-8.044556501
5.895564	75.7500	0	70.9472202	-6.769510895
6.083912	77.7500	0	73.21379912	-6.195827741

### III.3. Variation de la longueur relative de ressaut $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ dans le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ) cm.

La longueur relative du ressaut hydraulique est la distance entre le début de sa formation à la hauteur  $h_1$  et sa fin à la hauteur  $h_2$ .

La figure (29) montre la représentation graphique de la variation de  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour cinq valeurs de rugosités absolues  $\epsilon = 00 \text{ mm}$  ;  $\epsilon = 06 \text{ mm}$  ;  $\epsilon = 08 \text{ mm}$  ;  $\epsilon = 10 \text{ mm}$  et  $\epsilon = 12 \text{ mm}$  dans le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ) cm.



**Figure 19:** Ressaut contrôlé dans un canal rectangulaire de section composée à fond rugueux. La variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude dans le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ), pour quatre rugosités différentes "ε" : (◊) 12 mm ; (□) 10 mm ;

On note également de cette figure cinq nuages perceptible, chacun dépendant d'une rugosité bien définie. De plus, une analyse expérimentale des points de mesure du ressaut à fond rugueux dans le lit mineur, montre que chaque valeur de rugosité "ε" correspond une courbe de type linéaire de la forme  $L_j/h_1 = a_1(F_1)$ .

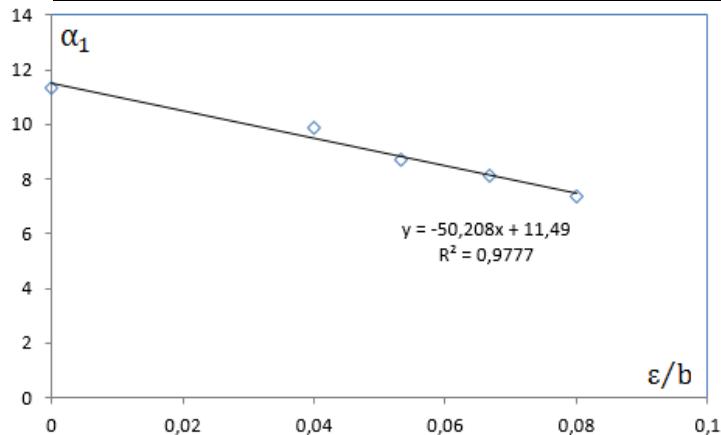
L'analyse de ces courbes montre que la longueur relative du ressaut  $L_j/h_1$  augmente avec l'augmentation du nombre de Froude  $F_1$  et ceci pour toutes les rugosités.

En outre, la rugosité « ε » augmente avec la diminution du rapport de la longueur relative  $L_j/h_1$ , Ceci est dû à la rugosité du fond du canal qui entraîne une dissipation d'énergie.

Le tableau (10) regroupe les valeurs du coefficient  $a_1$ .

Tableau 10: coefficients  $a_1$  des courbes d'ajustements.

$\varepsilon/b$	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 20: Variation du coefficient "a1" en fonction de la rugosité relative  $\varepsilon/b$  dans le lit mineur.

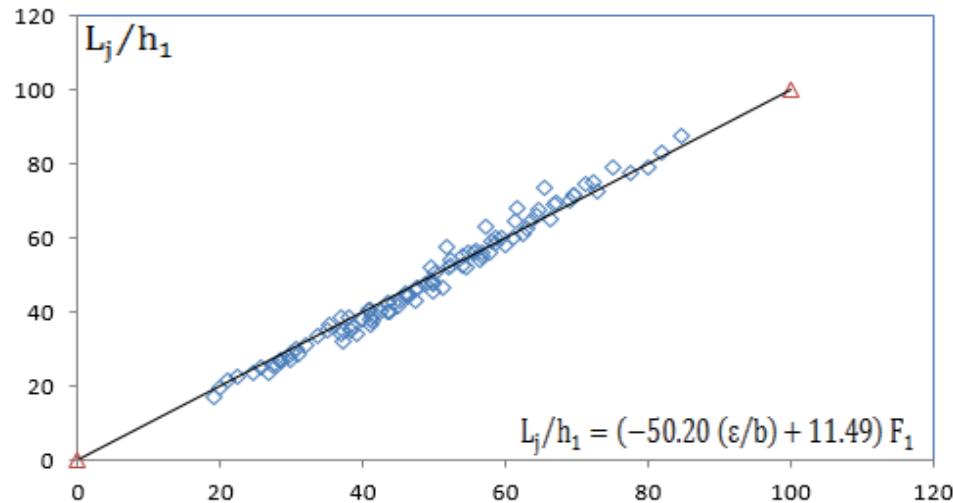
L'ajustement des couples de valeurs ( $a_1$ ,  $\varepsilon/b$ ) du tableau (10) a permis de décrire avec une bonne corrélation la relation linéaire suivante :  $a_1 = -50.208 (\varepsilon/b) + 11.49$ .

Cette équation est illustrée à la figure (3.1). L'équation liant la longueur relative amont  $L_j/h_1$ , le nombre de Froude  $F_1$  et la rugosité relative  $\varepsilon/b$  s'écrit alors :

$$L_j/h_1 = (-50.208 (\varepsilon/b) + 11.49)F_1 \quad (3.1)$$

Pour  $0 \leq \varepsilon/b \leq 0.08$

La figure (31) montre également que la relation  $L_j / h_1 = f(b, F_1)$  est proportionnelle à une bonne corrélation pour le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ) cm. Les points expérimentaux suivent exactement la première bissectrice.



**Figure 21:** La variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  en fonction de  $\text{def}(\varepsilon/b, F_1)$ . (□) Les points expérimentaux du ressaut hydraulique contrôlé à fond rugueux. (—) Première bissectrice.

De plus, les écarts relatifs entre les valeurs des mesures expérimentales  $L_j/h_1$  et les mesures issues de l'équation globale d'ajustement (3.1) sont évalués et montrés au tableau (11), Afin de justifier la fiabilité de l'équation empirique. Le tableau (11), montre clairement que les écarts relatifs sont dans la plupart inférieur à 5%.

**Tableau 11: Ecarts relatifs entre  $L_j/h_1$  expérimentale et  $L_j/h_1$  d'ajustement dans le lit mineur.**

$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ Exp	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)	$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ Exp	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)
26,702	23,750	11,055	60,022	58,000	3,368
19,034	17,143	9,934	62,522	61,000	2,435
20,010	19,714	1,476	66,337	65,000	2,015
21,002	21,429	-2,033	68,921	70,000	-1,566
22,520	22,571	-0,230	27,812	25,667	7,712
24,597	23,714	3,591	29,871	27,000	9,612
25,659	24,857	3,126	30,919	28,667	7,285
27,279	25,714	5,737	41,262	39,000	5,481
28,378	26,857	5,359	42,428	40,333	4,936

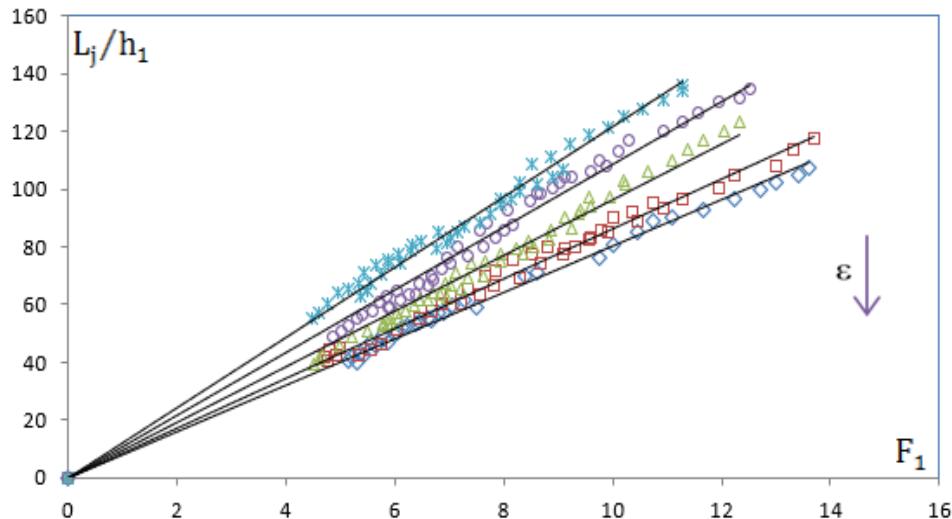
29,491	28,286	4,086	43,604	42,667	2,150
30,618	30,000	2,017	38,357	35,200	8,231
28,378	26,667	6,030	46,311	44,000	4,990
30,005	29,000	3,351	47,766	46,400	2,859
31,998	31,000	3,119	50,223	50,800	-1,148
33,691	33,333	1,061	52,219	54,000	-3,411
35,412	36,333	-2,601	55,773	56,800	-1,842
36,810	38,333	-4,138	46,190	44,500	3,660
38,155	38,400	-0,643	49,852	47,500	4,718
40,746	40,400	0,849	52,344	52,500	-0,297
44,288	42,800	3,359	55,516	56,000	-0,871
46,095	45,200	1,942	59,404	60,000	-1,004
48,851	47,600	2,561	64,721	67,500	-4,293
52,133	52,000	0,256	69,498	71,500	-2,881
54,041	55,200	-2,145	72,277	75,000	-3,767
56,335	54,000	4,145	38,467	36,286	5,669
41,346	37,667	8,900	37,236	35,000	6,006
43,819	40,333	7,954	47,595	46,500	2,301
45,072	43,333	3,859	49,630	52,000	-4,776
49,596	48,400	2,412	51,693	57,500	-11,234
53,816	52,400	2,631	57,329	63,000	-9,892
54,889	56,000	-2,025	61,682	68,000	-10,243
58,149	59,200	-1,808	65,390	73,500	-12,403
36,940	34,000	7,960	43,626	40,000	8,312
41,143	38,000	7,638	47,397	43,000	9,276
44,863	41,500	7,496	51,270	46,500	9,303
47,402	46,000	2,957	54,441	52,000	4,483

**Tableau 12: Ecarts relatifs entre  $L_j/h_1$  expérimentales et  $L_j/h_1$  d'ajustement dans le lit mineur.**

$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ Exp	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)	$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ Exp	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)
56,647	55,000	2,907	57,674	56,000	2,903
58,698	58,500	0,338	60,969	60,000	1,590
62,873	62,500	0,594	63,480	64,500	-1,606
64,286	66,000	-2,666	66,881	69,000	-3,169
67,143	69,500	-3,510	69,470	71,500	-2,923
72,980	72,500	0,657	71,213	74,500	-4,615
75,210	79,000	-5,039	77,430	77,500	-0,091
34,955	35,143	-0,537	80,146	79,000	1,430
39,927	38,286	4,112	81,975	83,000	-1,251
41,021	40,571	1,097	84,743	87,500	-3,254
49,858	48,333	3,057	49,708	45,714	8,035
56,757	56,000	1,333	37,108	32,000	13,764
58,479	60,000	-2,600	39,241	34,250	12,719
61,388	64,400	-4,906	41,049	36,500	11,083
			43,626	40,000	8,312

**III.3.1 Variation 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.**

Comme nous l'avons fait avec le lit mineur, nous avons tracé le graphique de la variation de  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour quatre valeurs de rugosité absolue dans le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm.



**Figure 22:** La variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude, pour cinq rugosités différentes "ε" : (◊) 12 mm ; (□) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; (○) 06 mm et (\*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.

On observe cinq nuages de points distincts, où chaque nuage de point dépend d'une rugosité bien déterminée.

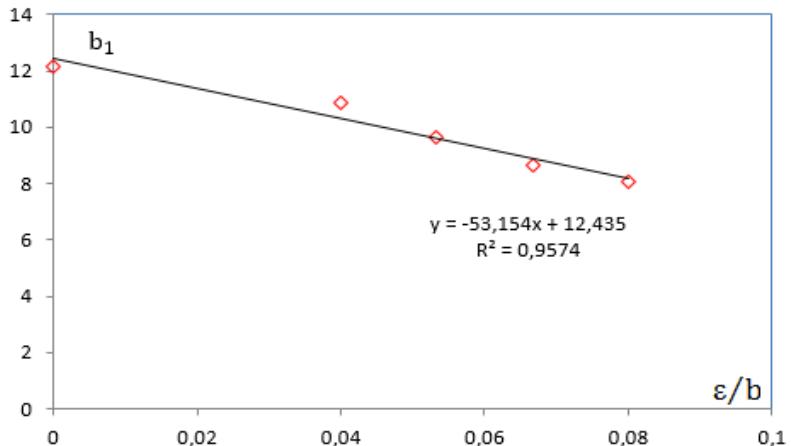
De plus, l'analyse expérimentale des points de mesure du ressaut hydraulique à fond rugueux dans le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm, montre que chaque valeur de rugosité "ε" correspond une courbe de type linéaire de la forme  $L_j/h_1 = b_1(F_1)$ .

L'analyse de ces courbes montre que la longueur relative augmente avec l'augmentation de nombre de Froude  $F_1$  et ceci pour toutes les rugosités. En outre, le rapport de la longueur relative  $L_j / h_1$  diminue lorsque La rugosité « ε » augmente.

Le tableau (13) regroupe les valeurs du coefficient  $b_1$ .

**Tableau 13: coefficients  $b_1$  des courbes d'ajustements.**

$\epsilon / b$	Coefficient $b_1$	$R^2$
0,08	8,06	0,993
0,06666667	8,648	0,99
0,05333333	9,66	0,986
0,04	10,88	0,984
0	12,17	0,988



**Figure 23:** Variation du coefficient "b1" en fonction de la rugosité relative  $\varepsilon/b$  dans le lit majeur.

L'ajustement des couples de valeurs ( $b_1, \varepsilon/b$ ) du tableau (3.3) a permis d'aboutir avec une bonne corrélation à la relation linéaire suivante :  $b_1 = -53.154 (\varepsilon/b) + 12.435$ .

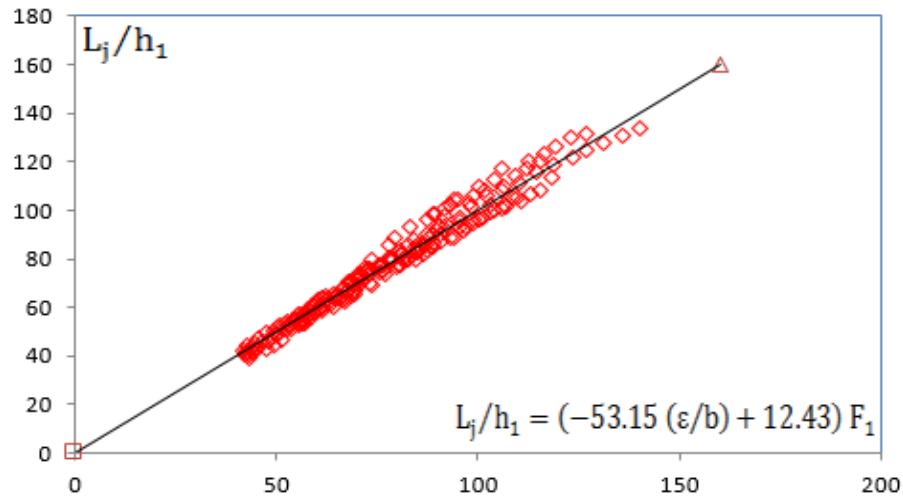
Cette équation est présentée à la figure (33 ).

L'équation liant la longueur relative amont  $L_j/h_1$ , le nombre de Froude  $F_1$  et la rugosité relative  $\varepsilon/b$  pour le lit majeur s'écrit alors :

$$L_j/h_1 = (-53.154 (\varepsilon/b) + 12.435)F_1 \quad (3.2)$$

Pour  $0 \leq \varepsilon/b \leq 0.08$

La figure (34 ) montre que la relation  $f(\varepsilon/b, F_1)$  ajuste avec une bonne corrélation pour le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm. Les points expérimentaux obtenus suivent exactement la première bissectrice.



**Figure 24:** La variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  expérimentale en fonction  $\text{def}(\varepsilon/b, F_1)$ .

(□) Les points expérimentaux du ressaut contrôlé à fond rugueux dans le lit majeur.

(—) Première bissectrice.

De plus, les écarts relatifs entre les valeurs des mesures expérimentales  $L_j/h_1$  et les mesures issues de l'équation globale d'ajustement (3.2) sont évalués et montrés au tableau (14), afin de justifier la fiabilité de l'équation empirique et les mesures expérimentales obtenues.

Le tableau (14) montre clairement que dans la plupart des cas les écarts relatifs sont inférieurs à 5%.

**Tableau 14: Ecarts relatifs entre  $L_j/h_1$  expérimentale et  $L_j/h_1$  d'ajustement dans le lit majeur.**

$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ Exp	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)	$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ Exp	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)
43,395	40,250	7,247	82,052	80,000	2,501
44,584	42,750	4,113	84,671	82,800	2,209
46,387	45,500	1,912	88,650	86,400	2,538
48,214	47,250	1,999	89,989	91,600	-1,790
49,445	50,250	-1,628	92,012	94,000	-2,161

50,998	52,500	-2,945	95,415	97,200	-1,871
52,883	54,000	-2,112	98,167	101,600	-3,497
54,152	55,000	-1,566	85,165	86,000	-0,981

**Tableau 15: (suite) : Ecarts relatifs entre  $L_j/h_1$ expérimentale et  $L_j/h_1$  d'ajustement dans le lit majeur**

$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ Exp	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)	$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ Exp	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)
55,753	57,000	-2,238	87,649	90,000	-2,682
42,217	40,286	4,574	90,157	93,000	-3,153
43,903	43,143	1,732	91,843	97,500	-6,160
45,611	47,143	-3,358	97,822	103,000	-5,293
47,341	49,429	-4,410	102,169	106,000	-3,750
50,153	51,714	-3,113	106,579	110,000	-3,210
52,297	53,429	-2,164	109,254	114,000	-4,344
54,471	54,286	0,340	111,952	117,000	-4,509
56,305	57,143	-1,488	115,583	120,000	-3,822
57,786	59,429	-2,842	50,264	48,750	3,012
59,657	61,429	-2,970	51,721	51,000	1,394
42,608	42,000	1,428	53,192	52,750	0,830
68,641	70,000	-1,980	54,676	55,000	-0,592
70,488	71,333	-1,199	55,798	56,750	-1,706
61,243	58,800	3,988	57,685	57,750	-0,112
79,721	76,500	4,041	58,828	60,750	-3,268
81,906	80,500	1,716	60,362	63,000	-4,370
85,589	85,000	0,688	62,299	65,000	-4,336
87,825	89,000	-1,338	60,969	59,143	2,995
90,836	90,000	0,920	62,744	61,429	2,097

95,415	93,000	2,532	65,892	63,714	3,306
100,069	96,500	3,567	68,172	66,857	1,929
104,004	100,000	3,850	60,748	59,333	2,329
106,388	102,000	4,125	64,387	63,667	1,119
109,596	105,000	4,194	66,498	67,333	-1,256
41,797	42,000	-0,487	68,631	70,000	-1,994
42,726	44,250	-3,566	70,787	72,333	-2,184
42,283	40,286	4,723	72,419	74,333	-2,644
43,708	42,571	2,600	75,719	77,000	-1,692
44,426	44,857	-0,969	78,506	80,000	-1,904
47,585	42,667	10,335	80,759	83,333	-3,187
49,315	44,333	10,101	82,463	86,000	-4,289
51,066	46,333	9,267	84,179	87,667	-4,143
53,730	51,333	4,460	69,276	68,800	0,687
57,351	55,333	3,518	71,874	76,000	-5,741
59,191	58,000	2,012	73,843	80,000	-8,339
61,050	60,000	1,721	77,834	86,000	-10,492
62,457	63,000	-0,869	79,179	88,400	-11,645
65,303	65,333	-0,046	83,263	92,800	-11,455
68,191	69,667	-2,164	87,414	96,000	-9,822

**Tableau 16: (suite) : Ecarts relatifs entre  $L_j/h_1$ expérimentale et  $L_j/h_1$  d'ajustement dans le lit majeur**

$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ Exp	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)	$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ Exp	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)
69,651	71,667	-2,895	89,514	98,400	-9,926
72,600	75,667	-4,224	91,632	100,400	-9,569
75,590	77,333	-2,306	93,052	102,000	-9,616

78,113	80,333	-2,843	95,197	104,400	-9,667
64,255	60,400	5,999	98,807	106,000	-7,280
67,127	63,600	5,255	101,727	108,000	-6,166
69,455	66,800	3,823	88,812	98,500	-10,908
73,593	69,200	5,969	94,123	104,500	-11,025
77,202	74,000	4,147	100,446	110,000	-9,511
80,868	77,600	4,041	104,121	113,000	-8,528
82,722	80,000	3,291	105,975	117,000	-10,404
85,216	83,200	2,366	112,548	120,000	-6,621
87,103	86,000	1,266	116,363	123,000	-5,704
89,003	90,400	-1,569	119,252	126,500	-6,078
92,201	92,000	0,218	123,141	130,000	-5,570
95,436	95,600	-0,172	127,070	131,500	-3,486
81,176	79,500	2,064	55,889	55,000	1,591
85,059	82,500	3,009	57,171	57,250	-0,139
88,210	85,000	3,639	59,328	60,500	-1,976
93,006	89,000	4,307	61,512	64,000	-4,045
97,067	93,500	3,675	64,167	65,500	-2,078
100,357	96,500	3,843	66,407	67,500	-1,645
106,202	100,500	5,369	67,764	71,000	-4,775
108,741	105,000	3,440	70,505	73,750	-4,602
115,608	108,000	6,581	73,282	75,750	-3,368
118,218	113,500	3,991	75,623	77,750	-2,813
44,133	41,250	6,532	78,465	80,750	-2,913
55,495	52,500	5,396	66,730	62,857	5,803
56,570	53,000	6,311	68,283	64,857	5,018
58,377	55,250	5,357	69,326	67,143	3,149

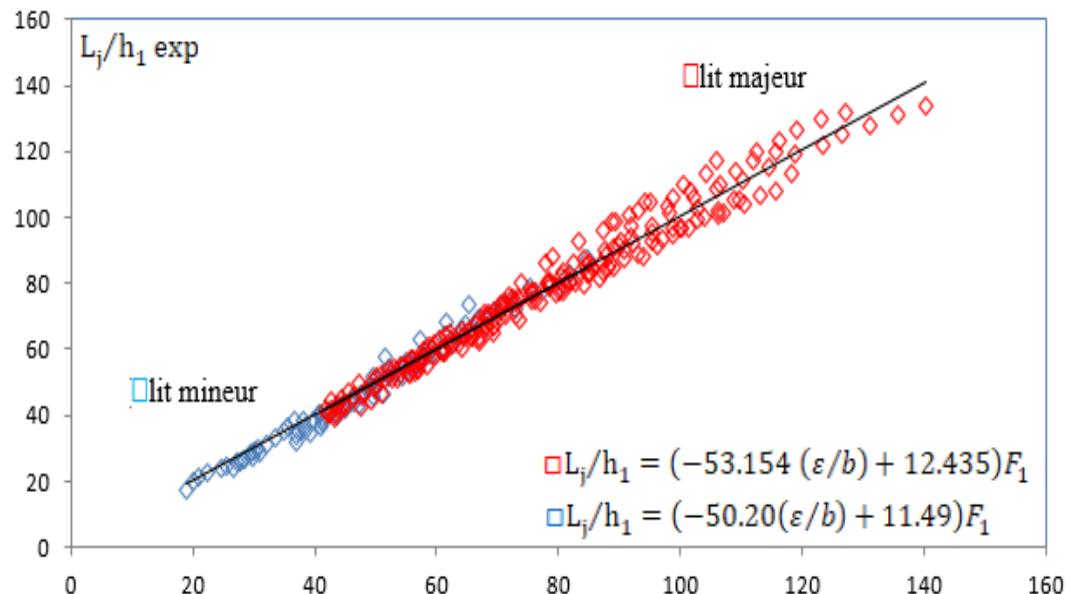
44,892	42,571	5,168	73,016	74,000	-1,348
47,969	45,714	4,701	75,690	74,571	1,478
49,927	48,571	2,715	78,397	78,571	-0,223
52,711	50,857	3,518	80,584	82,000	-1,757
55,546	53,143	4,326	84,461	85,143	-0,808
56,365	55,143	2,168	84,349	79,600	5,630
58,014	57,429	1,009	86,703	81,600	5,886
60,939	59,714	2,010	87,492	83,200	4,906

**Tableau 17: (suite et fin) : Ecarts relatifs entre  $L_j/h_1$ expérimentale et  $L_j/h_1$**

$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ Exp	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)	$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ Exp	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)
63,484	61,429	3,237	89,078	84,800	4,803
65,631	63,714	2,920	90,674	87,200	3,831
67,365	66,857	0,755	93,893	88,400	5,850
70,437	69,429	1,432	96,332	91,600	4,912
57,050	53,333	6,515	98,791	94,800	4,040
59,471	57,667	3,033	101,271	96,800	4,415
61,924	61,333	0,955	102,936	99,200	3,629
64,411	64,000	0,638	107,137	101,600	5,168
66,424	67,333	-1,369	110,538	104,000	5,915
68,457	71,000	-3,714	113,112	106,800	5,580
71,027	74,000	-4,185	98,791	96,500	2,319
73,629	75,000	-1,862	102,936	102,500	0,423
76,262	77,667	-1,842	106,081	108,500	-2,280
78,925	79,667	-0,940	110,324	111,500	-1,066

81,077	81,667	-0,727	114,622	115,500	-0,766
66,930	62,400	6,769	118,975	119,000	-0,021
69,379	65,200	6,023	123,381	121,500	1,525
73,106	70,000	4,249	126,720	125,000	1,358
76,262	74,800	1,917	131,219	128,000	2,453
80,106	77,200	3,628	135,770	131,000	3,513
			140,372	134,000	4,539

La figure (35) montre la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  expérimental en fonction de l'équation empirique  $f(\varepsilon/b, F_1)$  pour les deux cas (lit mineur et lit majeur) dans le même graphe. On remarque une continuation entre les deux courbes.



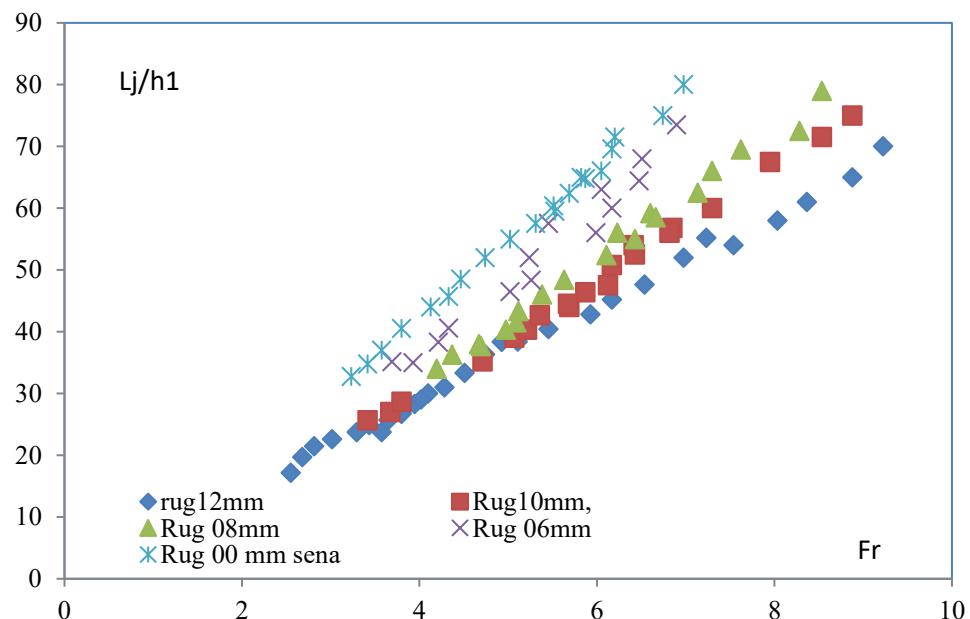
**Figure 25:** Représentation de la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  expérimental en fonction de  $f(\varepsilon/b, F_1)$  pour les deux cas (lit mineur et lit majeur)

On déduit de cette figure que la section composée à fond rugueux a un effet réducteur de la longueur du ressaut en lit mineur que celui en lit majeur.

### III.4. Etude Comparative du rapport des longueurs relative du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude :

#### III.4.1. Comparaison entre la longueur relative $Lj/h1$ de ressaut variant en fonction du nombre de Froude :

Cette figure (36) montre clairement la variation de la longueur relative  $Lj/h1$  en fonction du nombre de Froude  $Fr$  pour le lit mineur rugueux avec son homologue lisse.



**Figure 26:** Comparaison du rapport  $Lj/h1$  en fonction du nombre de Froude  $Fr$  pour le lit mineur lisse et celui rugueux.

On constate que le rapport  $Lj/h1$  augmente proportionnellement avec le nombre de Froude  $Fr$  pour les deux types d'aspect de ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composé avec lit mineur rugueux et celui le lit mineur lisse. Par ailleurs pour le même nombre de Froude  $Fr$ , le rapport  $Lj/h1$  de la longueur relative du ressaut hydraulique s'accroît avec l'abaissement de la rugosité imposée au lit mineur du canal.

On déduit que le rapport  $Lj/h_1$  sera moindre avec l'importance de la rugosité testée expérimentalement au lit mineur rugueux que son lisse ce qui montre l'effet réduction de cette rugosité imposée au lit mineur du canal au longueur caractéristique du ressaut.

**Tableau 18: mesures expérimentales du ressaut hydraulique  $Lj/h_1$  en fonction du  $Fr$  pour le lit mineur rugueux avec son homologue lit mineur lisse.**

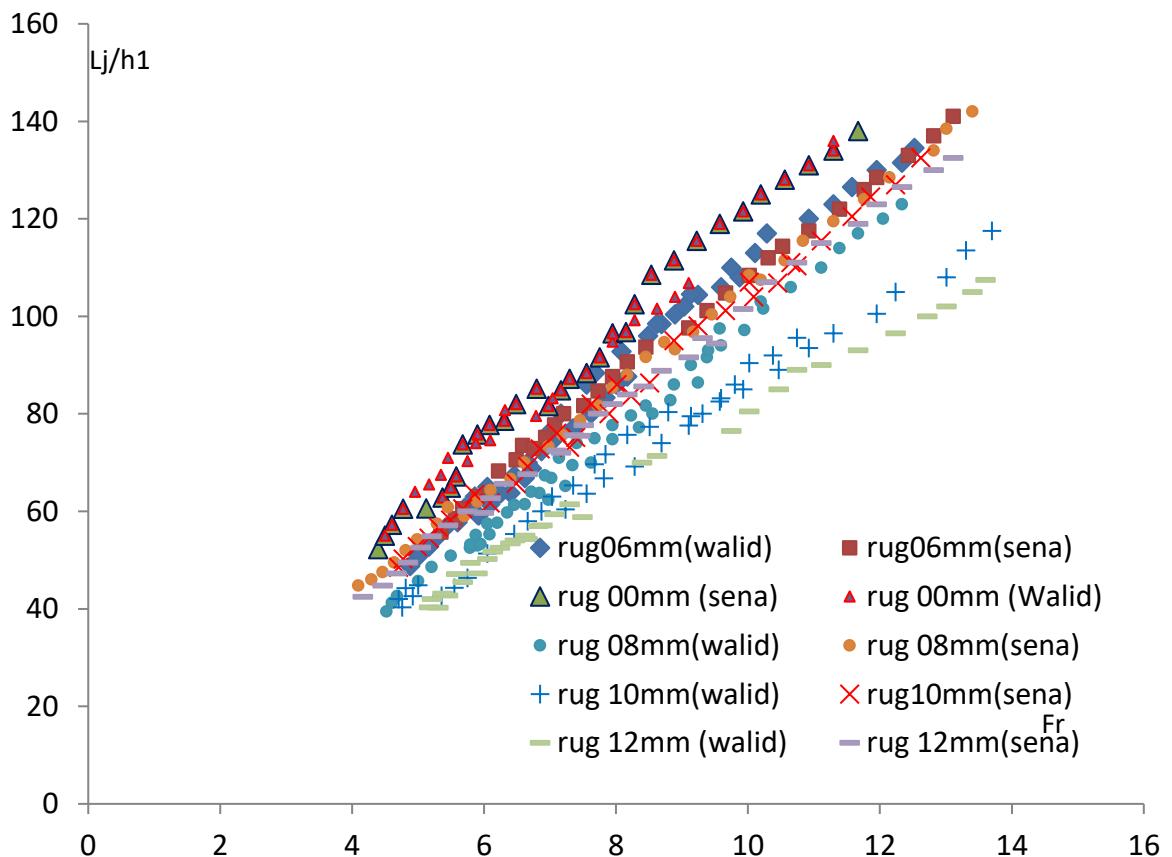
<b>Rug 12(mm)</b>	<b>Fr</b>	<b><math>Lj/h_1</math></b>
	3,57262497	23,75
	2,54664438	17,1428571
	2,67722603	19,7142857
	2,80996629	21,4285714
	3,01304897	22,5714286
	3,29107172	23,7142857
	3,43312037	24,8571429
	3,64991022	25,7142857
	3,79687565	26,8571429
	3,94576234	28,2857143
	4,0965458	30
	3,79687565	26,6666667
	4,01463742	29
	4,2812396	31
	4,50773161	33,3333333
	4,73808255	36,3333333
	4,9250989	38,3333333
	5,10498586	38,4
	5,451668	40,4
	5,92556709	42,8
	6,16740869	45,2
	6,53616454	47,6
	6,97530597	52
	7,23048456	55,2
	7,53745212	54
	8,03071788	58
	8,36530478	61
	8,87564479	65
	9,2214253	70
<b>rug10mm</b>	<b>Fr</b>	<b><math>Lj/h_1</math></b>
	3,41525507	25,6666667
	3,66817497	27

	3,79687565	28,6666667
	5,06693638	39
	5,2101099	40,3333333
	5,3546071	42,6666667
	4,71023882	35,2
	5,68697193	44
	5,86561222	46,4
	6,16740869	50,8
	6,41245372	54
	6,84886732	56,8
	5,67216853	44,5
	6,1218181	47,5
	6,42787445	52,5
	6,81737831	56
	7,2947553	60
	7,94778488	67,5
	8,53429767	71,5
	8,87564479	75
<b>Rug08mm</b>	<b>Fr</b>	<b>Lj/h1</b>
	4,36491057	36,2857143
	4,69170675	37,6666667
	4,97222883	40,3333333
	5,11451305	43,3333333
	5,6278356	48,4
	6,10664631	52,4
	6,22837127	56
	6,59831482	59,2
	4,19173816	34
	4,66857593	38
	5,09070619	41,5
	5,37881781	46
	6,42787445	55
	6,66066084	58,5
	7,13443464	62,5
	7,2947553	66
	7,61893765	69,5
	8,28123176	72,5
	8,53429767	79
<b>Rug06mm</b>	<b>Fr</b>	<b>Lj/h1</b>
	3,68647008	35,1428571

	4,21086394	38,2857143
	4,32622612	40,5714286
	5,25812915	48,3333333
	5,98572484	56
	6,16740869	60
	6,47421064	64,4
	3,92704728	35
	5,01950815	46,5
	5,23410117	52
	5,451668	57,5
	6,04608481	63
	6,505163	68
	6,89619144	73,5
<b>rug10mm</b>	<b>Fr</b>	<b>Lj/h1</b>
	3,79687565	40
	4,12502693	43
	4,4621224	46,5
	4,73808255	52
	5,01950815	56
	5,30629504	60
	5,52484414	64,5
	5,82077964	69
	6,04608481	71,5
	6,19786499	74,5
	6,73886772	77,5
	6,97530597	79
	7,13443464	83
	7,37535988	87,5
	4,32622612	45,7142857
	3,22955736	32
	3,41525507	34,25
	3,57262497	36,5
	3,79687565	40

**III.4.2 Comparaison entre  $l_j/h_1$  relative du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de froude  $Fr$  pour le lit majeur lisse et son homologue rugueux :**

Cette figure (37) montre clairement la variation du rapport  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $Fr$  pour le lit majeur rugueux avec son homologue lisse pour les deux types du ressaut.



**Figure 27:** variation du rapport  $L_j/h_1$  en fonction de  $Fr$  pour le lit majeur rugueux et son homologue lisse pour les deux types du ressaut.

Cette figure montre la variation du rapport  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude incident  $Fr$  pour différentes rugosités testées et imposées au lit mineur et celui majeur pour deux types du ressaut..

Les mesures expérimentales injectées dans la figure ci-dessus correspondent aux deux types du ressaut hydraulique expérimentés cité auparavant.

On constate pour le même nombre de Froude  $Fr$  , que les caractéristiques  $Lj/h1$  variant en fonction du nombre de Froude  $Fr$  des deux types du ressaut hydraulique sont moindres avec l'augmentation de la rugosité imposée au lits du canal.

Aussi, en comparant les différents nuages de points pour les deux types du ressaut expérimentés , on déduit que pour les mêmes rugosités expérimentées obtenues ,les nuages de points du type de ressaut hydraulique évolué en canal composé avec lit mineur rugueux sont en majorités en dessous de ceux obtenus pour le type du ressaut évolué en canal composé avec lit majeur rugueux .

On conclue que le type du ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composé avec lit mineur rugueux est rentable et plus réducteur aux caractéristiques du ressaut hydraulique que son homologue avec lit majeur rugueux.

**Tableau 19: Les mesures du rapport expérimentales  $Lj/h1$  en fonction du nombre de Froude  $Fr$  pour le type du ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composé avec lit majeur rugueux**

Rug 12mm	$Lj/h1$	$Fr$
	42,5	4,15833795
	44,75	4,4621224
	47,25	4,66857593
	49,5	4,8429824
	72,5	7,09454037
	75,5	7,45625917
	52,5714286	5,03981633
	54,8571429	5,203262
	57,1428571	5,451668
	60	5,74631395
	59,6666667	5,99577081
	62,6666667	6,09653876
	65,6666667	6,29974644
	77,6666667	7,51035524
	80	7,72803835
	82	7,94778488

	84	8,16957565
	67,6	6,66066084
	72	7,16640369
	75,6	7,35921535
	85,6	8,4158843
	88,8	8,68735157
	91,6	9,09990138
	94,4	9,51878249
	95,5	9,30855651
	101,5	9,92606403
	107	10,2848161
	111	10,7391861
	115	11,107367
	119	11,6673381
	123	11,9507475
	126,5	12,3321367
	130	12,8144553
	132,5	13,1067933
<b>Rug 10mm</b>	<b>Lj/h1</b>	<b>Fr</b>
	48,5	4,70328644
	50,25	4,77296406
	52,75	4,98403468
	54,5	5,16223771
	56,75	5,30629504
	58,25	5,48821542
	60,5	5,67216853
	63,5	5,85813217
	61,7142857	6,0893225
	65,7142857	6,48304915
	73,1428571	7,2947553
	75,1428571	7,3868989
	80	7,89265586
	83,6666667	8,22534055
	86,3333333	8,50605401
	69,2	6,66066084
	72,8	6,84886732
	76	7,10251326
	82	7,61893765
	86	8,01410833
	98	9,23882968

	101,2	9,65980007
	104	10,086977
	106,8	10,4476346
	110,4	10,7391861
	95	8,87564479
	107	10,0153536
	111	10,6477891
	115,5	11,107367
	120,5	11,5733732
	124,5	11,8560259
	127	12,2364153
	132,5	12,620788
<b>rug 08mm</b>	<b>Lj/h1</b>	<b>Fr</b>
	44,75	4,09180534
	46	4,29247153
	47,5	4,4621224
	49,5	4,63395123
	52	4,80793074
	54,25	4,98403468
	57,4285714	5,28563459
	60,8571429	5,451668
	59	5,696848
	62	5,89556425
	64,3333333	6,09653876
	66,6666667	6,4021801
	70	6,60869225
	73,3333333	6,97530597
	75,6666667	7,18774285
	78,6666667	7,45625917
	81,6666667	7,72803835
	85,3333333	7,94778488
	88	8,16957565
	91,6666667	8,4496604
	94,6666667	8,73287475
	93,2	8,892829
	96,8	9,16927782
	100,4	9,44853335
	104	9,73056766
	108,4	10,0153536
	107,5	10,1947305

	111,5	10,5566528
	115,5	10,8308431
	119,5	11,2930031
	124	11,7615559
	128,5	12,1409429
	134	12,8144553
	138,5	13,0091032
	142	13,4013212
<b>Rug 06mm</b>	<b>Lj/h1</b>	<b>Frexp</b>
	55,75	5,3425154
	58,5	5,561554
	60,5	5,67216853
	63	5,89556425
	73,5	6,58275887
	68,2857143	6,21965009
	70,5714286	6,48304915
	72,8571429	6,75006495
	75,1428571	6,93006083
	77,7142857	7,06609016
	80	7,20299805
	81,6666667	7,51035524
	84,6666667	7,72803835
	87,6666667	7,94778488
	90,6666667	8,16957565
	93,6666667	8,4496604
	97,6	9,09990138
	101,2	9,37845788
	104,8	9,65980007
	108,4	10,0153536
	112	10,3028649
	114,4	10,5202715
	117,5	10,9227594
	122	11,386205
	126	11,7615559
	128,5	11,9507475
	133	12,4281063
	137	12,8144553
	141	13,1067933
<b>Rug 00mm</b>	<b>Lj/h1</b>	<b>Fr</b>
	96,5	7,94778488

	102,5	8,28123176
	108,5	8,53429767
	111,5	8,87564479
	115,5	9,2214253
	119	9,57158306
	121,5	9,92606403
	125	10,1947305
	128	10,5566528
	131	10,9227594
	134	11,2930031
	138	11,6673381
	81,6	6,97530597
	84,8	7,16640369
	87,2	7,2947553
	88,4	7,55372585
	91,6	7,74992047
	96,8	8,14730512
	60,5714286	5,12132181
	62,8571429	5,36843733
	64,8571429	5,49344312
	67,1428571	5,57731158
	78,5714286	6,30704485
	82	6,48304915
	85,1428571	6,79491579
	52,25	4,39399914
	55	4,49631482
	57,25	4,59941255
	60,5	4,77296406
	73,75	5,67216853
	75,75	5,89556425
	77,75	6,08391218

**Tableau 20: Les mesures du rapport expérimentales  $Lj/h1$  en fonction du nombre de Froude  $Fr$  pour le type du ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composé avec lit majeur lisse (mesures Walid jamaa 2021).**

ruig06mm	$Lj /h1$ (m)	$Fr_{exp}$
	48,75	4,87811882
	51	5,01950815
	52,75	5,16223771
	55	5,30629504
	56,75	5,41520207
	57,75	5,5983448
	60,75	5,70920112
	63	5,85813217
	65	6,04608481
	59,1428571	5,91698967
	61,4285714	6,0893225
	63,7142857	6,39484516
	66,8571429	6,61610802
	59,3333333	5,89556425
	63,6666667	6,2487365
	67,3333333	6,45360308
	70	6,66066084
	72,3333333	6,86988685
	74,3333333	7,02821586
	77	7,34845889
	80	7,61893765
	83,3333333	7,8376549
	86	8,00304167
	87,6666667	8,16957565
	68,8	6,72320201
	76	6,97530597
	80	7,16640369
	86	7,55372585
	88,4	7,68433603
	92,8	8,08061524
	96	8,48348156
	98,4	8,68735157
	100,4	8,892829
	102	9,03070079
	104,4	9,23882968

	106	9,58920487
	108	9,87261835
	98,5	8,61921567
	104,5	9,13456764
	110	9,74828645
	113	10,1049094
	117	10,2848161
	120	10,9227594
	123	11,2930031
	126,5	11,5733732
	130	11,9507475
	131,5	12,3321367
	134,5	12,5243237
<b>rug 08mm</b>	<b>Lj /h1 (m)</b>	<b>Frexp</b>
	41,25	4,59941255
	52,5	5,78350684
	53	5,89556425
	55,25	6,08391218
	39,4285714	4,52079119
	42,5714286	4,67848447
	45,7142857	4,99922732
	48,5714286	5,203262
	50,8571429	5,49344312
	53,1428571	5,78882664
	55,1428571	5,87416476
	57,4285714	6,04608481
	59,7142857	6,35089443
	61,4285714	6,61610802
	63,7142857	6,83986552
	66,8571429	7,02064915
	69,4285714	7,34077891
	53,3333333	5,94559716
	57,6666667	6,19786499
	61,3333333	6,45360308
	64	6,71276495
	67,3333333	6,92252952
	71	7,13443464
	74	7,40229362
	75	7,67342337
	77,6666667	7,94778488

	79,6666667	8,22534055
	81,6666667	8,4496604
	62,4	6,97530597
	65,2	7,23048456
	70	7,61893765
	74,8	7,94778488
	77,2	8,34846753
	80	8,55125884
	82,8	8,82415869
	86,4	9,23882968
	91,6	9,37845788
	94	9,58920487
	97,2	9,94390062
	101,6	10,230733
	86	8,87564479
	90	9,13456764
	93	9,39596045
	97,5	9,57158306
	103	10,1947305
	106	10,6477891
	110	11,107367
	114	11,386205
	117	11,6673381
	120	12,0457201
	123	12,3321367
<b>rug 10mm</b>	<b>Lj /h1 (m)</b>	<b>Frexp</b>
	42	4,70328644
	44,25	4,80793074
	40,2857143	4,7580044
	42,5714286	4,91837827
	44,8571429	4,99922732
	42,6666667	5,3546071
	44,3333333	5,54930838
	46,3333333	5,74631395
	51,3333333	6,04608481
	55,3333333	6,45360308
	58	6,66066084
	60	6,86988685
	63	7,02821586
	65,3333333	7,34845889

	69,6666667	7,67342337
	71,6666667	7,8376549
	75,6666667	8,16957565
	77,3333333	8,50605401
	80,3333333	8,78989014
	60,4	7,23048456
	63,6	7,55372585
	66,8	7,81569044
	69,2	8,28123176
	74	8,68735157
	77,6	9,09990138
	80	9,30855651
	83,2	9,58920487
	86	9,80150723
	90,4	10,0153536
	92	10,3751656
	95,6	10,7391861
	79,5	9,13456764
	82,5	9,57158306
	85	9,92606403
	89	10,4657781
	93,5	10,9227594
	96,5	11,2930031
	100,5	11,9507475
	105	12,2364153
	108	13,0091032
	113,5	13,3029029
	117,5	13,6980228
<b>Rug 12mm</b>	<b>Lj /h1 (m)</b>	<b>Frexp</b>
	40,25	5,30629504
	42,75	5,451668
	45,5	5,67216853
	47,25	5,89556425
	50,25	6,04608481
	52,5	6,23600563
	54	6,46648024
	55	6,62167167
	57	6,81737831
	40,2857143	5,16223771
	43,1428571	5,36843733

	47,1428571	5,57731158
	49,4285714	5,78882664
	51,7142857	6,13266277
	53,4285714	6,39484516
	54,2857143	6,66066084
	57,1428571	6,88491394
	59,4285714	7,06609016
	61,4285714	7,2947553
	42	5,2101099
	70	8,39339196
	71,3333333	8,61921567
	58,8	7,48870117
	76,5	9,74828645
	80,5	10,0153536
	85	10,4657781
	89	10,7391861
	90	11,107367
	93	11,6673381
	96,5	12,2364153
	100	12,7174988
	102	13,0091032
	105	13,4013212
	107,5	13,5988817

# **CONCLUSION**

# **GENERAL**

## **CONCLUSION GENERAL :**

---

Notre étude concerne à une Contribution à l'étude comparative du rapport des longueurs relatives  $L_j/h_1$  variant en fonction du nombre Fr les deux types du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée avec lit majeur et mineur rugueux.

Cette étude est scindée en deux parties fondamentales telle que la première partie bibliographique est composé de trois chapitres et la deuxième partie est composée de deux chapitres aussi.

**Pour la partie bibliographique elle se résume comme suit :**

- **le premier chapitre récapitule ce que suit:**
- **Les travaux de Khattou et Achour en 2012** liés au ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire de forme composée. Une relation fonctionnelle est de forme  $\phi(Fr, Y, \beta, \tau) = 0$  sans tenir compte des forces de frottements. Une relation deuxième a été exposée y compris les forces de frottements. L'approche globale est déduite par le développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie.
- Le deuxième chapitre expose les travaux suivants :
- Les travaux de : F. Riguet et al (2019) qui se basent purement à l'expérimentation faite au niveau du laboratoire (LARHYSS), ils ont constaté que l'effet des ouvertures  $h_1$  sur la variation du rapport  $Y$  du ressaut hydraulique qui varie en fonction du nombre de Froude incident  $F_1$  est remarquable.
- Le troisième décrit une analyse expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ , à parois rugueuses **M. Debache, S. Kateb, A. Ghomri (2006)**. On présente des relations fonctionnelles liant la rugosité des parois du canal aux caractéristiques du ressaut hydraulique.
  - Dans un premier temps, l'étude s'est intéressée à la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. Il a été observé que pour une valeur donnée du nombre de Froude incident, l'augmentation de la rugosité absolue entraîne la diminution de la longueur relative du ressaut. En outre, l'analyse statistique des points de mesures

## **CONCLUSION GENERAL :**

---

a montré que, pour chacune des rugosités absolues testées, la longueur relative  $L_j/h_1$  était liée au nombre de Froude  $F_1$  par une loi linéaire

- Dans un second temps, la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude incident  $F_1$  a été examinée sous l'effet de chacune des rugosités absolues testées. Nous avons pu observer que, pour une même valeur du nombre de Froude  $F_1$ , l'augmentation de la rugosité absolue engendre la diminution du rapport  $Y$ . La variation  $Y (F_1, \varepsilon)$  a été modélisée par une loi de type logarithmique, issue de l'analyse statistique des points de mesures expérimentales.

**Pour la partie deuxième expérimentale, elle se résume comme suit :**

- Pour le premier chapitre de la partie deuxième, nous avons exposé le banc expérimental utilisé en expérimentation sous forme des diverses photographies, nous avons aussi expliqué la procédure de l'utilisation des appareils permettant de mesurer les caractéristiques du ressaut hydraulique. Pour les mesures de débit, nous avons utilisé le débitmètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de *Hachemi Rachedi L. (2006)*. Finalement, nous avons expliqué clairement la méthode de préparation des divers tapis rugueux qui se sont imposées au lit majeur du canal.
- **Pour le deuxième chapitre de la partie expérimentale, On a exploité toutes les mesures expérimentales obtenues au niveau du laboratoire qui sont liées à la variation des rapports des longueurs relatives du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude incident et avec des diverses rugosités testées au lit majeur et mineur du canal d'expérimentation.**

D'après les résultats obtenus, en comparant le rapport  $Lj/h1$  relatif variant en fonction du nombre de Froude  $Fr$  pour les deux types du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire composé avec lit mineur rugueux et son homologue avec lit majeur rugueux, on déduit ce que suit :

- ✓ On constate que le rapport  $Lj/h1$  augmente proportionnellement avec le nombre de Froude  $Fr$  pour les deux types d'aspect de ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire

## **CONCLUSION GENERAL :**

---

composé avec lit mineur rugueux et celui le lit mineur lisse. Par ailleurs pour le même nombre de Froude Fr, le rapport  $Lj/h1$  du ressaut hydraulique s'accroît avec l'abaissement de la rugosité imposée au lit mineur du canal.

On déduit que le rapport  $Lj/h1$  se réduit avec l'importance de la rugosité imposée au lit mineur que son homologue au lit majeur.

- ✓ On constate aussi deux aspects du ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composé l'un avec lit mineur rugueux de la section composée et l'autre avec lit majeur rugueux de la section composée.

On note que pour le même nombre de Froude Fr , que les rapports  $Lj/h1$  du ressaut hydraulique sont moindres avec l'augmentation de la rugosité imposée au lit majeur.

Aussi, en comparant les différents nuages de points pour les deux types du ressaut examinées, on note que pour les mêmes rugosités testées, les nuages de points du type de ressaut hydraulique évolué en canal composé avec lit mineur rugueux sont en majorité en dessous de ceux obtenus pour le type du ressaut hydraulique évolué en canal composé avec lit majeur rugueux.

On conclue Finalement que le type du ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composé avec lit mineur rugueux est plus rentable et plus réducteur aux caractéristiques des longueurs relatives que son homologue avec lit majeur rugueux.

On conseillera aux étudiants futurs de continuer les travaux de recherches scientifiques théoriques et expérimentales pour ce type de ressaut évolué en canal rectangulaire composé rugueux, en but de développer des approches adimensionnelles expérimentales servant au dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

# Références bibliographies

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

---

- achour, b., dissipation d'énergie par ressaut, thèse d'état. université de tizi-ouzou, institut de génie-civil, 1998.
- achour, b., ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. jhr 2000; 38(4): 307-311.
- achour, b., debabeche, m., ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en u. journal of hydraulic research, vol. 41 (02), pp. 97-103, 2003.
- ackers, p., (1991) hydraulic design of straight compound channels brusquement élargie. jhr2000 ; 38(4) : 307-311.

### **b**

- bousmar, d., wilkin, n., jacquemart., j h, zech y., overbank flow in symmetrically narrowing flood plains. jh eng 2004; 130(4): 305-312.
- bousmar, d., rivière, n., proust, s., paquier, a., morel, r., zech y., (2005) upstream discharge distribution in compound-channel flumes. j h eng 2005, asce ; 131(5) : 408-412.

### **d**

- debabeche, m., ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. thèse de doctorat d'état, département d'hydraulique, université de biskra, algérie, 2003.
- debabeche, m., ghomri, a., sahnoune, c., ismail, k., "effet de la rugosité sur le ressaut hydraulique dans un canal profilé en u (partie1)" larhyss journal, n 004, pp.107-118, juin 2005.
- debabeche, m., kateb, s., ghomri, a., "etude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses ", larhyss journal, n005, pp.187-196, juin 2006.
- 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 issn1112-9867.
- 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 issn 1112-9867.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

---

- djamaa, w., lecheheb. s., ghomri. a., (2020), séminaire international «durabilité d'agriculture saharienne et l'utilisation de l'eau ».
- communication poster intituler : l'étude de l'effet d'une rugosité sur ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée du lit mineur rugueux ; université d'el-oued ; 02-03 mars 2020.
- djamaa, w., lecheheb. s., ghomri. a., (2020), séminaire national « colloque maghrébin sur l'eau et l'environnement dans les zones arides et semi-arides (cmeezasa'2020) ».
- communication poster intituler : « la contribution à l'étude de l'approche semithéorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée à fond rugueux » ; université biskra 22-23 mars 2021

.- djamaa, w., lecheheb. s., ghomri. a., (2020), la quatrième journée d'étude valorisation et gestion durable des ressources hydrique (vgdrh) : une communication intitulée : « contribution à l'étude de l'approche semi-théorique du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux ». université d'eloued ; 19 novembre 2019

### e

- ead, s. a., rajaratnam, n., “plan turbulent wall jets in shallow” j.eng. mech., 128(2), pp. 143-155, 2002.
- ead, s. a., rajaratnam, n., katopodis, c., and ade, “turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts.” j. hydraulic. eng., 126(10), pp. 750-757. f, 2000.

### f

- forster, j. w., skrinde, r. a., control of hydraulic jump by sills, transactions, american society of civil engineers, vol. 115, pp. 973-987, 1950.

### g

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

---

- ghomri, a., ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant en canal profilé en “u”, mémoire de magister en sciences hydrauliques, département d'hydraulique, université de biskra, 2005.
- ghomri, a., le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à parois rugueuse, mémoire de magister en sciences hydrauliques, département d'hydraulique, université de biskra, 2012.
- ghomri, a., debabeche, m., riguet, f., l'étude semi théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en u à fond rugueux, revues des sciences fondamentales et appliquées, centre universitaire d'oued souf, n°01, pp.40-57,2009.
- ghomri, a., riguet, f., contribution to the experimental study on the hydraulic jump evolving in a u-shaped channel with rough bed, journal of fundamental and applied sciences, université el oued, n° 02, pp.254-271,2010.

### **h**

- hachemi rachedi, l., (2006). analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, mémoire de magistère en science hydrauliques, département d'hydraulique, université de biskra, algérie.
- hager, w., bremen r., h., classical hydraulic jump; sequent depth, j. hydraulic research27(5), 565-585, 1989.
- hager, w., bremen r., h., et kawogoshi n. classical hydraulic jump; length of roller, j. hydraulic research 28(5), 591-608, 1990
- hager, w. h. and li, d“ dissipateurs d'énergie contrôlé par seuil ”, j. recherches hydrauliques, 30. n°2,165-181,1992.
- hager, w. h., wanoschek, r (1987). hydraulic jump in triangular channel. j. hydraulic res. lahr 25 (5), 549-564.

### **k**

- kateb, s., ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal triangulaire à parois rugueuses, mémoire de magister, université de biskra, 2006.
- kateb, s., etude théorique et expérimentale de quelques types de ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, doctorat en sciences, université de biskra, 2014.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

---

- kateb, s., debabeche, m., zegait.retbaouia k. (2018)., approche expérimentale de la longueur du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire a parois rugueux ; journal of advanced research in science and technologie jarst.
- khattaoui, m., achour, b., (2012). ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé. revue scientifique et technique ljee n°20.

### **I**

- lecheheb. s., djamaa, w., ghomri. a., (2020). séminaire national « colloque maghrébin sur l'eau et l'environnement dans les zones arides et semi-arides (cmeezasa'2020) ». communication poster intituler : « la contribution à l'étude de l'approche semithéorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée à lit majeur rugueux » ; université biskra 22-23 mars 2021.

### **m**

- morvan, h., pender. g., wright, n, g., ervine, d. a. (2002) three-dimensional hydrodynamics of meandering compound channels jhe 2002 ; 128(7) : 674-682.

### **r**

- rajaratnam, n., hydraulic jumps on rough beds, transaction of the engineering institute of canada, vol. 11, n° a-2 may 1968.
- rajaratnam, n., (2002)., hydraulic jumps on corrugated beds. j hydraulic engineering asce 128 (7), 656-336.
- rajaratnam, n., subramanya, k., profile of the hydraulic jump, proc. asce j. hydraulic division, 94, hy3, 663-676; vol. 95, hy1, 546-557; hy2, 725-727, vol. 96, 1970, hy2, 579-580, 1968.
- rand, w., an approach to generalized design of stilling basins, trans. new york academy of sciences, vol. 20 (2), pp. 173-191, 1957.
- rand, w., flow over vertical sill in an open channel. proc. asce, j. hydraulic division 91, hy4, 97-121, 1965. riguet, f., debabeche, m., ghomri, a., (2019). experimental study of the sequent depthration of the hydraulic jump in a

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

---

straightcompoundrectangularchannel; journal of fundamental and applied sciences issn 1112-9867.

### **s**

- silvester, r., “hydraulics jumps in all shapes of horizontal channels” proc. asce. j. hydro divi., no90, pp. 23-55, 1964.
- saman, n., younes., numerical simulation of hydraulic jump over rough beds. periodica polytechnica civil engineering, 2020.
- sellin, r. h. j., (1964) a laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. la houille blanche 2002 ; 7 : 793-802.

### **z**

- ziani, s., dissipation d'énergie par ressaut hydraulique dans une conduite circulaire avec banquettes. mémoire de magistère en science hydrauliques, département d'hydraulique, université de bejaia, algérie, 2015.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

Université de Ghardaïa  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'hydraulique et de génie civil



## إذن بطباعة مذكرة ماستر

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسمائهم:

1. الطالب (ة): بن بريك يوسف

تخصص: رياضي

نرجو نحن الأساتذة:

الامضاء	الصفة	البنية والجامعة الأصلية أو المؤسسة	الاسم واللقب
	مصحح 1	أستاذ محاضر ب جامعة غرداية	جعنى مريم
	مصحح 2	أستاذ محاضر ب جامعة غرداية	بن بيتور سلمى
	مؤطر	أستاذ محاضر ب جامعة غرداية	لشہب السنہ
	مؤطر مساعد	أستاذ محاضر ب جامعة غرداية	سلمان الطاهر

الإذن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة الماستر بعنوان:

**Synthèse de l'effet de la rugosité imposé au lit mineur et majeur sur le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée**

المصادقة رئيس القسم

بوقايسير الماء  
رئيس قسم الماء  
و التسالات الدينية