

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**

**Faculté des Sciences Appliquées**

**Département de Génie civil et Hydraulique**

**Année 2021/2022**



**N° d'enregistrement :**

**/...../...../...../...../**

**THESE**

**En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat**

**LMD en Hydraulique urbaine**

**Contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil  
à paroi mince évoluant dans un canal rectangulaire de section  
composée avec lit mineur rugueux.**

**Présenté et soutenue publiquement**

**Par :**

**DJAMAA Walid**

**Le 11/05/2022**

**Devant le jury composé de :**

<b>GHOMRI Ali</b>	<b>Professeur</b>	<b>U.H.L. El Oued</b>	<b>Directeur de thèse</b>
<b>KATEB Samir</b>	<b>Professeur</b>	<b>U.K.M. Ouargla</b>	<b>Co-directeur de thèse</b>
<b>BOUTOUTAOU Djamel</b>	<b>Professeur</b>	<b>U.K.M. Ouargla</b>	<b>Président de jury</b>
<b>KHECHANA Salim</b>	<b>Professeur</b>	<b>U.H.L. El Oued</b>	<b>Examineur</b>
<b>OULHACI Dalila</b>	<b>Maitre de conférences A</b>	<b>U.K.M. Ouargla</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>EI FERGOUGUI Myriam Marie</b>	<b>Maitre de conférences A</b>	<b>U.K.M. Ouargla</b>	<b>Examinatrice</b>

# REMERCIEMENTS

Je remercie le bon Dieu tout puissant qui m'a donné la force et le courage d'achever ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes plus chaleureux remerciements au professeur **GHOMRI Ali**, enseignant à l'Université de science et de la Technologie d'El-Oued, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués.

Je tiens aussi à remercier Monsieur **KATEB Samir**, Professeur à l'université de Ouargla qui a co-dirigé ce travail avec une compétence, une clairvoyance et un professionnalisme exemplaires. Ses conseils, ses encouragements et sa sympathie sont fort appréciés.

Mes remerciements vont également au professeur **BOUTOUTAOU Djamel**, Professeur à l'université de Ouargla, pour avoir accepté de m'honorer par sa présence en qualité de président de jury.

Je souhaite adresser également mes remerciements au Professeur **KHECHANA Salim**, professeur de l'université d'El-Oued, le docteur **BENLARBI Dalila** Maitre de conférences A à l'université de Ouargla et **EI FERGOUGUI Myriam Marie** Maitre de conférences A à l'université de Ouargla d'avoir accepté d'examiner mon travail.

A toute personne qui m'a aidé de près ou de loin pour l'élaboration de ce travail, un chaleureux merci à tous, particulièrement **LACHEHEB Sena**. Je remercie fortement tous mes amis pour l'appui moral qu'ils m'ont témoigné.

Je saisi cette occasion pour remercier ici l'ensemble des enseignants du département d'Hydraulique de l'Université de Jijel pour l'appui moral qu'ils m'ont témoigné ainsi que leur esprit d'amitié, spécialement Messieurs **BELABED Fares**, **AMARA Lyes**, **ABDI Ishak**, Mme **KRIMIL Farida** et les autres.



# *Dédicaces*



*Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont toujours  
présents dans mon Cœur*

*A ma très chère mère, A mon très cher père*

*A mes sœurs*

*A toute ma famille*

*A tous mes professeurs*

*A tous mes collègues et mes amis sans exception*



# **SOMMAIRE**

REMERCIEMENTS.....	
DEDICACES .....	
LISTE DES TABLEAUX.....	
LISTE DES FIGURES.....	
PRINCIPALES NOTATIONS .....	
RESUME.....	
INTRODUCTION GENERALE -----	1

## **Première partie : Recherche bibliographique**

INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE-----	3
--	---

### **Chapitre I**

I.1. INTRODUCTION .....	5
I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE.....	5
I.2.1. Les différentes configurations du ressaut classique.....	6
I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	7
I.2.3. Les caractéristiques du ressaut.....	7
I.2.3.1. Longueurs du ressaut .....	7
I.2.3.2. Longueur du rouleau de surface.....	8
I.2.4. Rendement du ressaut hydraulique .....	9
I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A FOND RUGUEUX .....	10
I.3.1. L'approche de RAJARATNAM (1968) .....	10
I.3.1.1. Discussion des résultats .....	10
I.3.1.2. Analyse des résultats.....	10

I.3.1.2.1. La hauteur caractéristique du ressaut hydraulique : $h_2$ .....	10
I.3.1.2.2. La longueur du rouleau de surface.....	12
I.4. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE AVEC LIT ONDULE .....	13
I.4.1. L'approche de RAJARATNAM (2002) .....	13
I.4.1.1. Le protocole expérimental .....	13
I.4.1.2. Discussion des Résultats .....	14
I.4. CONCLUSION.....	17

## **Chapitre II**

---

II.1. INTRODUCTION : .....	18
II.2. APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR 2012.....	18
II.2.1. Les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique .....	18
II.2.2. Le rendement du ressaut hydraulique .....	21
II.3. L'ETUDE EXPERIMENTALE DES CARACTRISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSEE.....	22
II.3.1. La problématique.....	22
II.3.2. Analyse des essais expérimentaux.....	23
II.3.3. Résultats expérimentaux.....	25
II.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées .....	25
II.3.3.2 Les caractéristiques du ressaut hydraulique .....	25
II.3.3.2.1 La longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut varie en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	25
II.3.3.2.2 La longueur relative $L_r/h_1$ du rouleau de surface varie en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	26
II.4. CONCLUSION .....	27

## **Chapitre III**

---

III.1. INTRODUCTION.....	29
III.2. PROCEDURE EXPERIMENTALE.....	29
III.2.1. Déroulement des essais .....	29
III.2.2. Mode de préparation des tapis rugueux.....	30
III.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX .....	31
III.3.1. La longueur relative du ressaut $L_j/h_1$ varie en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	31
III.3.2. Variation des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	33
III.4. CONCLUSION.....	36

## **Chapitre IV**

---

IV.1. INTRODUCTION .....	38
IV.2. ETUDE DE L'APPROCHE THEORIQUE.....	38
IV.3. ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ÉQUATION SEMI-THÉORIQUE .....	42
IV.3.1. Coefficient $C_r$ de résistance en fonction de la rugosité relative $\varepsilon/D$ .....	42
IV.3.2. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient $C_r$ de résistance et du nombre de Froude $F_1$ .....	44
IV.4. L'ETUDE EXPERIMENTALE.....	48
IV.4.1. Protocol expérimental .....	48
IV.4.2. Instrumentation de mesure .....	51
IV.4.2.1. Le Débitmètre .....	51
IV.4.2.2. Limnimétrie.....	52
IV.4.2.3. Tamiseuse.....	53
IV.4.2.4. Palmer .....	53
IV.4.3. Aperçu des essais .....	53
IV.4.3.1. Procédure des essais.....	53
IV.4.3.2. Procédure de préparation de la rugosité .....	55

IV.4.4.1. La variation de $L_j/h_1$ en fonction du $F_1$ .....	56
IV.4.4.2. Variation de la longueur relative du rouleau $L_r/h_1$ de surface en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	59
IV.4.4.3. Le rapport de $Y$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	63
IV.4.4.4. Le rendement du ressaut hydraulique. ....	65
IV.4.4.5. Profil de surface du ressaut .....	67
IV.4.4.6. Exemple d'application .....	68
IV.5. CONCLUSION .....	68
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE-----	70

## Deuxième partie : Etude expérimentale

INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE-----	74
--	----

### Chapitre I

I.1. INTRODUCTION .....	75
I.2. PROCEDURE D'EXPERIMENTATION .....	75
I.3. APPAREILLAGES DE MESURE .....	77
I.3.1. Procédure de mesure des débits .....	77
I.3.2. L'appareil Limnimétrique .....	78
I.4. APERÇU DES ESSAIS EXPERIMENTAUX .....	79
I.4.1. Protocole expérimentale des essais .....	79
I.4.2. Mode de préparation de la rugosité équivalente .....	81
I.5. CONCLUSION .....	82

## Chapitre II

II.1. INTRODUCTION.....	83
II.2. ANALYSE THEORIQUE.....	83
II.2.1. Application de la théorie d'Euler.....	84
II.3. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA RELATION SEMI-THÉORIQUE.....	87
II.3.1. Résultats expérimentaux.....	87
II.3.1.1. La variation du coefficient $C_r$ de frottement varie en fonction de la rugosité imposée ( $\varepsilon/b$ ). .....	87
II.3.1.2. Variation du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient $C_r$ de résistance et du nombre de Froude $F_1$ .....	89
II.4. CONCLUSION .....	93

## Chapitre III

III.1. INTRODUCTION.....	94
III.2. DISCUSSION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX .....	94
III.2.1. Étude des variations des caractéristiques du ressaut .....	94
III.2.1.1. Etude de la longueur relative du ressaut hydraulique $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude incident $F_1$ .....	94
III.2.1.1.1. Étude de la longueur relative du ressaut $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ dans le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ) cm.....	94
III.2.1.1.2. Etude de la 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... ..	98
III.2.1.2. Etude de la longueur relative du rouleau de surface $L_r/h_1$ qui varie en fonction du nombre de Froude incident $F_1$ .....	104
III.2.1.2.1. Etude de la longueur relative du rouleau de surface $L_r/h_1$ qui varie en fonction du nombre de Froude incident $F_1$ pour le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ) cm.....	104



III.2.1.2.2. Etude de la variation de la longueur relative du rouleau de surface $L_r/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ dans le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm... ..	108
III.2.2. La variation du rapport $Y$ ( $h_2/h_1$ ) en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	115
III.2.2.1. Rapport des hauteurs caractéristiques du ressaut $Y$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ dans le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ) cm. ....	115
V.2.2.2. Etude de la variation du rapport $h_2/h_1$ avec le nombre de Froude $F_1$ dans le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm.....	121
III.2.3. Etude de la variation de la hauteur relative du seuil $S/h_1$ en fonction du Froude incident $F_1$ .....	128
III.2.3.1 Etude de la variation du seuil $S/h_1$ avec le nombre de Froude $F_1$ dans le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ) cm.....	128
III.2.3.2. Etude de la variation de la hauteur relative du seuil $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ dans le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm. ....	132
III.2.4. Rendement du ressaut.....	137
III.2.5. Profil de surface du ressaut .....	139
III.3. EXEMPLE D'APPLICATION .....	141
III.4. CONCLUSION .....	142
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE .....	144
CONCLUSION GENERALE.....	146

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

# LISTE DES FIGURES

## Première partie

### Chapitre I

Figure 1.1: Différentes configurations du ressaut classique selon Peterka et Bradley (1957). a) Pré-ressaut, b) Ressaut de passage, C) Ressaut stable, d) Ressaut clapoteux. ....	6
Figure 1.2: Configuration du ressaut hydraulique. a) rouleau de surface développé. b) rouleau de surface non développé. ....	8
Figure 1.3: Rendement $\eta^*$ du ressaut classique qui varie en fonction du nombre de Froude $F_1$ . (—) Courbe tracée selon la relation (1.9). (---) Courbe tracée selon la relation (1.10).....	9
Figure 1.4: Variation de $Y = h_2 / h_1$ en fonction de $F_1$ . ....	11
Figure 1.5: Variation de $h_2/h_2^*$ en fonction de $\varepsilon/h_1$ .....	12
Figure 1.6: Variation de la longueur relative des caractéristiques du ressaut : (a) $Lr/h_2^*$ en fonction de $F_1$ ; (b) $Lj/h_2^*$ en fonction de $F_1$ .....	12
Figure 1.7: Configuration du ressaut hydraulique avec lit ondulé. ....	13
Figure 1.8: (a) configuration de surface du ressaut hydraulique ; (b) Profil généralisé de surface du ressaut hydraulique. ....	14
Figure 1.9: Variation de $\frac{h_2}{h_1}$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ . ....	15
Figure 1.10: Configuration de la longueur relative du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude $F_1$ . (a) du rouleau de surface ; (b) du ressaut. ....	16

### Chapitre II

Figure 2.1: Configuration du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée. 18	
Figure 2.2: Rapport de Y, calculé par (2.4), varie en fonction de $F_1$ . (— — —) : $\beta = 1$ .....	20
Figure 2.3: Rapport de Y varie en fonction de $F_1$ . (o) : expression (2.6), (+) : expression (2.4).....	20
Figure 2.4: Variation du $\eta$ en fonction de $F_1$ . (— — —) : $\beta=1$ . Y est calculé par l'équation (2.7). ....	21
Figure 2.5: Variation de $\eta$ en fonction de $F_1$ . (o) : équation (2.7), (*) avec frottement.....	22
Figure 2.6: Configuration du ressaut contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire de forme composée.....	23
Figure 2.7: Canal ayant servi à l'expérimentation. ....	24
Figure 2.8: Rapport des hauteurs conjuguées Y varie en fonction de Froude $F_1$ pour le canal composé. (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; ( $\Delta$ ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustements.....	25

Figure 2.9: Représentation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....26

Figure 2.10: Représentation de la longueur relative  $L_r/h_1$  du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur.(—) Courbes d'ajustement.....27

### Chapitre III

Figure 3.1: Tapis rugueux de rugosité équivalente  $\varepsilon = 8,73\text{mm}$ ..... 30

Figure 3.2: Tapis collé soigneusement sur les parois du canal ..... 31

Figure 3.3: Coefficient  $a$  issu de la relation (3.1) varie en fonction de la rugosité équivalente  $\varepsilon$ . ..... 32

Figure 3.4: Longueur relative expérimentale  $(L_j/h_1)_{Exp}$  varie en fonction de  $\xi(\varepsilon, F_1)$  montrée par la relation (3.3). (o)  $(L_j/h_1)_{Exp}$  du ressaut hydraulique ..... 33

Figure 3.5: 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)..... 34

Figure 3.6: Illustration du coefficient  $b$  de la relation (3.5) en fonction de la rugosité équivalente  $\varepsilon$  (—) Courbe tracée issue par la relation (3.6)..... 35

Figure 3.7: Représentation  $Y_{Exp}$  en fonction de  $\Phi(F_1, \varepsilon)$ . (- - -) : la Première bissectrice.. ..... 36

### Chapitre IV

Figure 4.1: Ressaut hydraulique formé par un obstacle mince évolué en canal de section "U" avec lit rugueux.....38

Figure 4.2: Illustration de  $f(Y)$  et de  $F_1^2$ , pour quatre rugosités testées :  $\varepsilon$  (mm) = (\*) 9,11 ; (x) 7,14 ; (Δ) 5,63 et (□) 4,3.....42

Figure 4.3: Variation du coefficient  $C_r$  en fonction de la rugosité relative  $\varepsilon/D$ ..... 43

Figure 4.4: Schématisation de  $f(y_1, y_2)$  qui varie en fonction de la relation  $(1-18,14(\varepsilon/D)) F_1^2$  (—) première bissectrice.....43

Figure 4.5: Schématisation de  $f(y_1, y_2)$  qui varie en fonction de la relation  $(1-18,14(\varepsilon/D)) F_1^2$  (—) première bissectrice.....45

Figure 4.6: Comparaison des points expérimentaux avec la relation obtenue  $(F_1, \varepsilon/D)$ , (□) mesures expérimentales, (—) la première bissectrice.....45

Figure 4.7: Canal d'expérimentation.....	49
Figure 4.8: (a) boîte sous pression (b) gamme des ouvertures .....	49
Figure 4.9 (c): Pompe.....	50
Figure 4.10: Schéma de l'installation servant à l'expérimentation.....	50
Figure 4.11: Capteur de mesures des débits.....	51
Figure 4.12: a) Le convertisseur de mesures des débits,b) l'écran d'affichage des débits.....	51
Figure 4.13:Capteur des débits. ....	52
Figure 4.14: Limnimètre      Figure 4.15: Une série de tamis      Figure 4.16: Palmer	
numérique.....	53
Figure 4.17: Série de seuils minces servant au contrôle du ressaut.. ....	54
Figure 4.18: Ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en "U" à fond rugueux a)	
Vue de l'amont du ressaut b) Vue de l'aval du ressaut.....	55
Figure 4.19: Fond rugueux du canal.....	55
Figure 4.20: Tapis rugueux $\varepsilon=5.63$ mm ; $\varepsilon=7.14$ mm ; $\varepsilon=9.11$ mm.....	56
Figure 4.21: Représentation du ressaut évolué en un canal de forme en "U" avec lit rugueux. Quatre	
rugosités différentes « $\varepsilon$ » : ( $\Delta$ ) 4,30mm ; (o) 5,63mm ; ( $\square$ ) 7,14mm et ( $\times$ ) 9,11mm. (---) courbe du	
ressaut lisse selon Debabeche (2003). (—) Courbes d'ajustement.....	56
Figure 4.22: Représentation « $a_1$ » en fonction de $\varepsilon/D$ .....	57
Figure 4.23: Variation de la longueur relative $L_j/h_1$ en fonction de $f(\varepsilon/D, F_1)$ . ....	58
Figure 4.24: Représentation de la longueur relative du rouleau de surface $L_r/h_1$ en fonction de	
nombre Froude, pour quatre rugosités équivalentes « $\varepsilon$ » : (o) 4,30mm ; ( $\square$ ) 5,63mm ; ( $\Delta$ ) 7,14mm et	
(o) 9,11mm.....	60
Figure 4.25: Variation du coefficient " $a_2$ " en fonction de la rugosité relative $\varepsilon/D$ .....	60
Figure 4.26: Représentation de la longueur relative $L_r/h_1$ du rouleau de surface en fonction de	
$f(\varepsilon/D, F_1)$ . ( $\square$ ) mesures expérimentales du ressaut contrôlé avec lit rugueux.....	61
Figure 4.27: Ressaut formé en canal de section en " U" avec lit rugueux.Quatre rugosités différentes	
de " $\varepsilon$ " : ( $\square$ ) 4,3mm ; ( $\Delta$ ) 5,63mm ; (o) 7,14mm et( $\times$ ) 9,11mm. (—) Courbes d'ajustements.	
.....	63
Figure 4.28: Variation du coefficient " $a_3$ " en fonction de la rugosité " $\varepsilon/D$ ".....	64
Figure 4.29: Variation du rapport Y du ressaut en fonction du nombre Froude $F_1$ pour quatre valeurs de	
rugosité relative " $\varepsilon/D$ ". ( $\diamond$ ) Points expérimentaux .....	64
Figure 4.30: Représentation du rendement $\eta$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ . Les motifs colorés	
sont les mesures expérimentales pour quatre rugosités relatives $\varepsilon/D$ : ( $\square$ )= 0,0175 ; ( $\square$ )= 0,0229 et	
( $\Delta$ )=0,0291.....	66

Figure 4.31: L'allure de surface du ressaut hydraulique .....	67
Figure 4.32: Profil de la surface du ressaut pour trois rugosités différentes : (○) 4,3mm ; (□) 3,55mm et (Δ) 0,00mm.....	67

## Deuxième partie

### Chapitre I

Figure 1.1: Canal d'expérimentation. ....	75
Figure 1.2: Schématisation de déroulement de l'expérimentation.. ....	76
Figure 1.3 : Pompe axiale.....	76
Figure 1.4: Vanne de régulation du débit. ....	76
Figure 1.5: Déversoir rectangulaire avec contraction latérale pour mesurer les débits pompés. ....	77
Figure 1.6: Schéma de définition de la deuxième partie du canal avec déversoir, <i>Hachemi, 2007</i> ). ....	77
Figure 1.7: Profondeur d'eau mesuré par pointe limnimètre.....	78
Figure 1.8: Ouvertures ( $h_1$ (cm) = 02 ; 02.5 ; 03 ; 03.5 et 04).. ....	79
Figure 1.9: Parois mince pour contrôlé la formation du ressaut.. ....	79
Figure 1.10: Ressaut hydraulique dans un canal composé avec lit mineur rugueux. a) Vue à l'amont du ressaut. b) Vue à l'aval du ressaut .....	81
Figure 1.11: Tapis rugueux imposés au lit mineur du canal composé : a) canal avec fond lisse. b) canal avec fond rugueux.....	79
Figure 1.12: Tapis rugueux divers, (a) la méthode de conception des tapis rugueux ; (b) les divers tapis rugueux. ....	82

### Chapitre II

Figure 2.1: Schématisation du Ressaut formé par paroi mince produit en canal rectangulaire de forme composée avec fond rugueux. ....	83
Figure 2.2: Variation du membre $f(Y)$ avec le nombre de Froude $F_1^2$ , pour les quatre rugosités absolues $\varepsilon$ (mm)= (◇) 06, (●) 08, (□) 10 et (Δ) 12.....	88
Figure 2.3: Représentation du paramètre $Cr$ et la rugosité relative ( $\varepsilon/b$ ).. ....	89
Figure 2.4: Validation de l'approche semi-théorique.....	89

Figure 2.5: Représentation du rapport $Y$ avec de $F^2(1-C_r)$ , ( $\diamond$ ) mesures expérimentales. (—) Courbe de corrélation.....	90
Figure 2.6: Comparaison entre $Y$ expérimental et de l'équation semi-théorique (2.22). ( $\diamond$ ) Points de mesures expérimentales. (—) Courbe d'ajustement.....	90

### Chapitre III

Figure 3.1: Représentation de 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 cinq rugosités différentes " $\varepsilon$ " : ( $\diamond$ ) 12 mm ; ( $\square$ ) 10 mm ; ( $\triangle$ ) 08 mm ; ( $\circ$ ) 06 mm et ( $*$ ) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.....	95
Figure 3.2: Représentation du coefficient « $a_1$ » avec rugosité ( $\varepsilon/b$ ).....	96
Figure 3.3: Représentation de l'approche globale expérimentale $L_j / h_1 = f(\varepsilon/b, F_1)$ avec les points expérimentaux $L_j/h_1$ . (—) Première bissectrice.....	96
Figure 3.4: Représentation de la longueur relative $L_j/h_1$ et du nombre de Froude, pour cinq rugosités différentes " $\varepsilon$ " : ( $\diamond$ ) 12 mm ; ( $\square$ ) 10 mm ; ( $\triangle$ ) 08 mm ; ( $\circ$ ) 06 mm et ( $*$ ) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.....	98
Figure 3.5: Représentation du coefficient " $b_1$ " et de rugosité relative $\varepsilon/b$ dans le lit majeur.....	99
Figure 3.6: Représentation des mesures de la longueur relative $L_j/h_1$ expérimentale et la relation $f(\varepsilon/b, F_1)$ . ( $\square$ ) Les points expérimentaux du ressaut contrôlé à fond rugueux dans le lit majeur.....	100
Figure 3.7: Représentation de $L_j/h_1$ expérimental en fonction de $f(\varepsilon/b, F_1)$ pour les deux cas (lit mineur et lit majeur).....	103
Figure 3.8: Représentation de $L_r/h_1$ avec le nombre de Froude $F_1$ , pour cinq rugosités différentes " $\varepsilon$ " : ( $\triangle$ ) 08 mm ; ( $\circ$ ) 06 mm ( $*$ ) 0 mm. ( $\square$ ) 12 mm et ( $\square$ ) 10 mm, (—) Courbes de corrélation.....	104
Figure 3.9: Représentation du coefficient « $a_2$ » avec la rugosité relative $\varepsilon/b$ dans le lit mineur.....	105
Figure 3.10: Représentation du coefficient « $a_2$ » avec la rugosité relative $\varepsilon/b$ dans le lit mineur.....	106
Figure 3.11: Représentation de la longueur relative du rouleau de surface $L_r/h_1$ variant avec le nombre de Froude $F_1$ , pour cinq rugosités différentes testées " $\varepsilon$ " : ( $\square$ ) 12 mm ; ( $\square$ ) 10 mm ; ( $\triangle$ ) 08 mm ; ( $\circ$ ) 06 mm et ( $*$ ) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.....	108
Figure 3.12: Représentation du coefficient " $b_2$ " avec la rugosité relative $\varepsilon/b$ dans le lit majeur.....	109
Figure 3.13: Représentation graphique de la longueur relative du rouleau $L_r/h_1$ expérimental avec l'équation globale $f(\varepsilon/b, F_1)$ . ( $\square$ ) Les points expérimentaux du ressaut formé dans le lit majeur avec lit mineur rugueux. (—) Première bissectrice.....	110
Figure 3.14: Représentation de l'équation générale $f(\varepsilon/b, F_1)$ avec la longueur relative du rouleau de surface $L_r/h_1$ expérimentale pour les deux cas ( $\square$ lit mineur ; $\square$ lit majeur).....	115

Figure 3.15: Présentation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut $h_2/h_1$ avec le nombre de Froude, pour cinq rugosités différentes de "ε" : (◇) 12 mm ;(□) 10 mm ; (△) 08 mm ; (○) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.....	115
Figure 3.16: Représentation du coefficient " a <sub>3</sub> " avec la rugosité relative ε/b imposée au lit mineur..	116
Figure 3.17: Représentation du rapport des hauteurs conjuguées $h_2/h_1$ avec la fonction de $f(ε/b, F_1)$ .(□) Les points expérimentaux du ressaut hydraulique formé avec lit rugueux.(—) Première bissectrice.....	117
Figure 3.18: Représentation du rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude dans le lit majeur, pour cinq rugosités différentes testées « ε ». (◇) 12 mm ;(□) 10 mm ; (△) 08 mm ; (○) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.....	121
Figure 3.19: Présentation du coefficient " b <sub>3</sub> " variant avec la rugosité relative ( ε/b) dans le lit majeur..	122
Figure 20: Présentation du rapport $Y_{exp}$ et la fonction $f(ε/b, F_1)$ . (□) Les points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé à fond rugueux dans le lit majeur. (—) Première bissectrice.....	122
Figure 3.21: Variation du rapport des hauteurs conjuguées $h_2/h_1$ expérimentale en fonction de $f(ε/b, F_1)$ pour les deux cas (□lit mineur ; □lit majeur).....	128
Figure 3.22: Présentation de la hauteur relative $s/h_1$ avec le nombre de Froude, pour cinq valeurs différentes de "ε": (◇) 12 mm ;(□) 10 mm ; (△) 08 mm ; (○) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.....	128
Figure 3.23: Représentation du coefficient " a <sub>4</sub> " avec la rugosité relative ε/b dans le lit mineur.....	129
Figure 2.24: Présentation de la hauteur relative $S/h_1$ avec l'approche globale $f(ε/b, F_1)$ . (□) Les mesures expérimentales du ressaut hydraulique formé avec lit rugueux. (—) Première bissectrice.....	130
Figure 3.25: Variation de la hauteur relative $S/h_1$ en fonction du nombre de Froude dans le lit majeur, pour cinq rugosités différentes testées "ε".(◇) 12 mm ;(□) 10 mm ; (△) 08 mm ; (○) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.....	133
Figure 3.26: Présentation du coefficient " b <sub>4</sub> " avec la rugosité relative ε/b dans le lit majeur.....	133
Figure 3.27: Variation de la hauteur relative $S/h_1$ en fonction de $f(ε/b, F_1)$ .(□) Les mesures expérimentales du ressaut hydraulique formé avec lit rugueux, (—) Première bissectrice....	134
Figure 3.28: Représentation de la hauteur relative $S/h_1$ expérimentale et la relation $f(ε/b, F_1)$ pour les deux cas (□lit mineur ; □lit majeur)..	137
Figure 3.29: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude $F_1$ . Les motifs représentent les points expérimentaux du ressaut en canal rectangulaire de la section composé à fond rugueux, de rugosité relative ε/b dans le lit mineur:(◇) = 12 mm ; (□)= 10 mm ; (△)= 08 mm ; (○) = 06 mm et (*) =00 mm.....	138
Figure 3.30: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude $F_1$ . Les motifs représentent les points expérimentaux du ressaut en canal rectangulaire de la section	

composée à fond rugueux, de rugosité relative $\varepsilon/b$ dans le lit majeur : ( $\diamond$ ) = 12 mm ; ( $\square$ )= 10 mm ; ( $\Delta$ )= 08 mm ; ( $\circ$ ) = 06 mm et (*) =00 mm.....	139
Figure 3.31: Profil de surface du ressaut.....	139
Figure 3.32: Profil de la surface hydraulique évolué en canal rectangulaire de forme composée pour le lit mineur à fond rugueux, pour quatre rugosités différentes : ( $\diamond$ ) 06 mm ; ( $\square$ ) 08 mm ; ( $\Delta$ ) 10 mm et ( $\circ$ ) 12 mm. . .	140
Figure 3.33: Profil de la surface hydraulique évolué en canal rectangulaire de forme composée pour le lit majeur à fond rugueux, pour quatre rugosités différentes : ( $\diamond$ ) 06 mm ; ( $\square$ ) 08 mm ; ( $\Delta$ ) 10 mm et ( $\circ$ ) 12 mm. . .	140



# LISTE DES TABLEAUX

## Première partie

### Chapitre III

Tableau 3.1: Les valeurs du coefficient $a$ issues de la relation (3.1).....	32
Tableau 3.2: Coefficients $b$ et $c$ issus de la relation (3.5).....	34

### Chapitre IV

Tableau 4.1: Les valeurs du coefficient $C_r$ déduites des courbes d'ajustement.....	43
Tableau 4.2: Erreurs relatifs en (%) entre $Y$ expérimentale et $Y$ semi- Théorique.....	46
Tableau 4.3: Valeurs $a_1$ issues des courbes d'ajustements. ....	57
Tableau 4.4: L'erreur relative entre $L_j/h_1$ expérimentale et $L_j/h_1$ d'ajustement.....	58
Tableau 4.5: Coefficients $a_2$ des courbes d'ajustements... ..	60
Tableau 4.6: Erreurs relatives entre $L_r/h_1$ expérimentale et $L_r/h_1$ relation générale.....	61
Tableau 4.7: Coefficient $a_3$ des courbes d'ajustement.....	63
Tableau 4.8: Ecart entre $Y$ de la relation globale et $Y$ expérimentale .....	65

## Deuxième partie

### Chapitre II

Tableau 2.1: Valeurs du paramètre $C_r$ .....	90
Tableau 2.2: Erreur relative en (%) entre et $Y$ expérimentale. $Y$ semi- Théorique.....	93

### Chapitre III

Tableau 3.1: Récapitulation des valeurs du coefficient $a_1$ . ....	95
Tableau 3.2: Récapitulation des erreurs relatives entre $L_j/h_1$ d'ajustement et $L_j/h_1$ expérimentale dans le lit mineur. ....	97
Tableau 3.3: Récapitulation des valeurs $b_1$ en fonction des rugosités relatives. ....	99
Tableau 3.4: Ecart relatifs entre $L_j/h_1$ expérimentale et $L_j/h_1$ d'ajustement dans le lit majeur. ....	100

Tableau 3.5: Coefficients $a_2$ des courbes d'ajustements. ....	105
Tableau 3.6: Récapitulation de l'erreur relative entre $Lr/h_1$ expérimentale et $Lr/h_1$ d'ajustements dans le lit mineur.....	106
Tableau 3.7: coefficients $b_2$ des Courbes d'ajustements.....	109
Tableau 3.8: Récapitulation des écarts relatives entre $Lr/h_1$ d'ajustements et celles $Lr/h_1$ expérimentales dans le lit majeur. ....	110
Tableau 3.9: coefficient $a_3$ des courbes d'ajustements. ....	116
Tableau 3.10: Ecarts relatifs entre $h_2/h_1$ expérimentale et $h_2/h_1$ d'ajustements dans le lit mineur. ....	117
Tableau 3.11: coefficient $b_3$ des courbes d'ajustements. ....	121
Tableau 3.12: Ecarts relatifs entre $h_2/h_1$ expérimentale et $h_2/h_1$ d'ajustements dans le lit majeur. ....	123
Tableau 3.13: coefficient $a_4$ des courbes d'ajustements. ....	129
Tableau 3.14: Ecarts relatifs entre $S/h_1$ expérimentale et $S/h_1$ d'ajustements dans le lit mineur. ....	130
Tableau 3.15: Coefficient $b_4$ des courbes d'ajustements. ....	133
Tableau 3.16: Ecarts relatifs entre $S/h_1$ expérimentale et $S/h_1$ d'ajustements dans le lit majeur.....	135

## PRINCIPALES NOTATIONS

$A_1$	L'aire de la section mouillée initiale	[m]
$A_2$	L'aire de la section mouillée finale	[m]
<b>B et b</b>	Largeur de lit majeur et de lit mineur du canal	[m]
$C_r$	Coefficient de résistance	[-]
$F_1$	Nombre de Froude à l'amont du ressaut	[-]
$f_1 ; f_2$	Force hydrostatique au pied et à la fin du ressaut	[N]
$f_x$	Force de résistance	[N]
$f_x$	Force de résistance due à la rugosité appliquée au fond du canal	[N]
$\Sigma F_{ext}$	La somme des forces extérieures	[N]
$F_1$	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	[N]
$F_2$	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	[N]
$g$	Accélération de la pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Hauteur de plein bord du lit mineur	[m]
$h_1$	Hauteur initiale du ressaut	[m]
$h_2$	Hauteur finale du ressaut	[m]
$h_1^*$	Hauteur initiale du ressaut classique	[m]
$h_2^*$	Hauteur finale du ressaut classique	[m]
$\bar{h}$	Profondeur du centre de gravité de la section mouillée	[m]
$H_1$ et $H_2$	Charges totales au pied et à la fin du ressaut	[m]
$\Delta H$	Pertes de charge dues au ressaut	[m]
$H_{dev}$	Hauteur de la lame déversant	[m]
$K$	Coefficient	[-]
$L_j$	Longueur du ressaut	[m]
$L_r$	Longueur du rouleau	[m]
$L_j^*$	Longueur relative du ressaut classique	[m]
$L_r^*$	Longueur relative du rouleau classique	[m]
$M$	Désigne la hauteur relative initiale du ressaut $M=mh/b$	[-]
$m$	Cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du triangle par rapport à l'horizontal	[-]
$\Delta P$	La variation dans la quantité de mouvement	[kg.m. s <sup>-1</sup> ]
$P$	Pression	[N/m <sup>2</sup> ]
$P$	Périmètre du canal	[m]
$P_1$	Pression hydrostatique appliquée à la section amont du ressaut	[Pa]
$P_2$	Pression hydrostatique appliquée à la section aval du ressaut	[Pa]
$Q$	Débit volume	[m <sup>3</sup> /s]
$q$	Débit unitaire	[m <sup>2</sup> /s]

Re	Nombre de Reynolds	[-]
$R_h$	Rayon hydraulique	[m]
s	Hauteur d'un seuil	[m]
V	Le volume du liquide	[m <sup>3</sup> ]
V <sub>1</sub> et V <sub>2</sub>	Vitesses moyennes au pied et à la fin de ressaut	[m/s]
$\varpi$	Poids spécifique du liquide	[N/m <sup>3</sup> ]
X	Coordonnée longitudinale	[m]
X	Position d'un seuil	[m]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées	[-]
Y*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
$\beta$	Rapport de l'élargissement	[-]
$\tau$	Rapport des hauteurs	[-]
$\lambda$	Fonction seulement de la rugosité relative	[-]
$\lambda_B$	Longueur relative du bassin	[-]
$\lambda_S$	Position relative du seuil	[-]
$\lambda_r^*$	La variation de la longueur relative du rouleau	[m]
$\eta$	Rendement du ressaut	[-]
$\eta^*$	Rendement du ressaut classique	[-]
$\varepsilon$	Rugosité absolue	[mm]
$\Delta t$	Le temps de variation	[s]
$\rho$	Masse volumique	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> ]

## ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى التحليل، النظري والتجريبي للقفزة الهيدروليكية المراقبة بعناية رقيقة الجدران تتطور في قناة مستطيلة من قسم مركب ات قاع خشن. تبحث الدراسة عن تأثير خشونة القاع على خصائص القفزة. من خلال التحليل النظري، المدعوم بالبيانات التجريبية، سمح بالحصول على علاقة بالشكل  $f(Y, F_1, Cr, \beta, \tau)$ . كان من الضروري إجراء تحليل تجريبي لهذه الدالة لتقييم العلاقة التي تربط معامل الخشونة المطلقة. بالإضافة إلى ذلك، تم الحصول على العديد من العلاقات التجريبية، التي تمكننا من تحديد ابعاد حوض التبديد لنموذج القفزة الهيدروليكية.

**الكلمات الرئيسية:** القفز الهيدروليكية، القناة المستطيلة المركبة، خشونة القاع، حوض التبديد.

## Résumé

Cette présente thèse a pour but d'analyser, d'un point de vue théorique et expérimental, le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince évolue dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux. L'étude examine l'effet de la rugosité du fond sur les caractéristiques du ressaut. A travers une analyse théorique, soutenue par des données expérimentales, il a été possible d'obtenir, une relation de la forme  $f(Y, F_1, Cr, \beta, \tau)$ . Il a été nécessaire de procéder à une analyse expérimentale de cette expression pour évaluer la relation qui lie la rugosité absolue. En outre, plusieurs relations empiriques ont été obtenues, permettant le dimensionnement du bassin de dissipation.

**Mots clés :** Ressaut hydraulique, canal rectangulaire composé, rugosité du fond, bassin de dissipation.

## Abstract

This thesis aims to analyze, from a theoretical and experimental point of view, the hydraulic jump controlled by a thin-walled threshold evolve in a rectangular channel of the compound section with a rough minor bed. The study examines the effect of bottom roughness on the characteristics of the hydraulic jump. Through theoretical analysis, supported by experimental data, it was possible to obtain a relation of the form  $f(Y, F_1, Cr, \beta, \tau)$ . It was necessary to carry out an experimental analysis of this expression in order to evaluate the relation which links the roughness parameter to the absolute roughness. In addition, several empirical relationships were obtained, allowing the sizing of the dissipation basin.

**Keywords:** Hydraulic jump, compound rectangular channel, bottom roughness, dissipation basin.

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

## INTRODUCTION GENERALE

En période des crues, les barrages évacuent un débit important qui traverse l'évacuateur des crues vers l'aval d'un barrage pour être dirigé vers la vallée, mais ce débit important se traduit par une vitesse importante qui peut créer des distorsions dans la vallée, ce qui conduit à des catastrophes et pour éviter cela, on crée ce que l'on appelle des bassins de dissipation d'énergie. Les bassins de dissipation d'énergie peuvent occuper une grande surface et coûter cher, pour cela les chercheurs traitent ce phénomène par le moyen le moins onéreux qui appelé ressaut hydraulique. Pour cela on doit évaluer les caractéristiques géométriques de celui-ci, telles que : les profondeurs initiale et finale, le nombre de Froude de l'écoulement incident, les longueurs de ressaut et de rouleau de surface et celle du ressaut hydraulique, quelques chercheurs se sont intéressés également à la distribution des vitesses et des pressions à l'intérieur du ressaut hydraulique.

Le phénomène du ressaut hydraulique peut se produire à l'aval immédiat d'une vanne du fond, ou au piémont d'un barrage déversoir. Le ressaut est le siège d'une dissipation importante d'énergie. C'est à cet effet qu'il est évidemment utilisé en pratique. Le ressaut hydraulique est caractérisé principalement par les deux hauteurs conjuguées, initiale et finale tel que sa longueur du rouleau de surface.

On appelle ressaut classique quand il se forme en canal rectangulaire de pente faible ou nul, il peut s'appeler contrôlé quand sa création est conditionnée par l'emplacement d'un obstacle en travers de l'écoulement. On l'appelle ressaut forcé quand sa formation est créée de part et d'autre du seuil.

Cette présente thèse a pour but d'étudier, d'un point de vue expérimental et théorique, le ressaut hydraulique contrôlé par une paroi mince qui se forme en canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux. Des approches fonctionnelles en terme adimensionnel, liant les différentes caractéristiques du ressaut, apparaissant l'influence de la rugosité imposée au lit mineur du canal sur les caractéristiques du ressaut, seront exposées. Il est très important de noter que ce type ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée à fond rugueux n'a pas été entamé antérieurement, et c'est pour combler cette lacune que notre thème de recherche a été présentée.

Notre thèse est scindée principalement en deux parties fondamentales :

- ✚ La première partie concernera une étude bibliographique à travers laquelle nous passerons en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique, en canal rectangulaire composé, triangulaire à parois rugueuses et celui de forme « U » à fond rugueux.
  
- ✚ La seconde partie concernera notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux, d'un point de vue théorique et expérimentale.



**PARTIE I :**

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE

La première partie de notre thèse est consacrée aux travaux antérieurement réalisés touchant de près notre thème. 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 de dégradation du lit de la vallée et de l'aval des Barrages.

Pour bien mener notre plan de travail, nous avons scindé cette partie en quatre chapitres principaux.

Pour le premier chapitre, nous allons intéresser aux activités relatives au ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire. Trois aspects du ressaut vont être exposés :

- ✚ Le ressaut hydraulique classique, où nous exposons des travaux de *Hager (1990)* concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal.
- ✚ Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à fond rugueux, où on abordera les travaux de *Rajaratnam (1968)*, qui concernent le ressaut hydraulique en canal rectangulaire avec pente nulle.
- ✚ Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à fond ondulé, où nous avons présenté les travaux de *Rajaratnam (2002)*, qui concernent le ressaut hydraulique en canal rectangulaire avec pente nulle.

Pour le second chapitre nous avons présenté le ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire de section composée droit, il portera sur :

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

Pour le troisième chapitre nous avons présenté l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ , à parois rugueuses de : *M. Debabeche et al en 2006*.

Le quatrième et dernier chapitre par lequel on va exposer les travaux *A. Ghomri en 2012* concernant le ressaut hydraulique formé par paroi mince évoluant en canal de section en “U” avec demi circulaire rugueux d’un point de vue théorique et expérimental.

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

# Chapitre I

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

## I.1. INTRODUCTION

Nous traitons dans ce chapitre trois types de ressauts hydrauliques qui se forment dans un canal rectangulaire.

- ✚ Le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons des travaux de *Hager et al (1990)* qui concernent le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal.
- ✚ Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond rugueux, où nous parlerons des travaux de *Rajaratnam (1968)*.
- ✚ Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond ondulé, où nous parlerons des travaux de *Rajaratnam (2002)*.

## I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

Le ressaut hydraulique désigne le passage de l'écoulement torrentiel (ou supercritique) à l'écoulement fluvial (sub-critique). 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 de surface. Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible. Le ressaut hydraulique est défini par les caractéristiques suivantes :

- Les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$ , sont les hauteurs conjuguées.
- $L_r$  et  $L_j$  sont respectivement la longueur du rouleau de surface et la longueur du ressaut hydraulique.

Le rendement de dissipation du ressaut est estimé par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne. Après sa formation, la torrentialité de l'écoulement à l'amont du ressaut est définie par le nombre de Froude  $F_1$  dépassant l'unité qui est lié au débit d'écoulement, à la première hauteur conjuguée  $h_1$ .

En général, le ressaut hydraulique est géré par l'équation de la quantité de mouvement dans le but de développer le rapport  $Y = h_2/h_1$  des profondeurs conjuguées ainsi le nombre de Froude incident  $F_1$ .

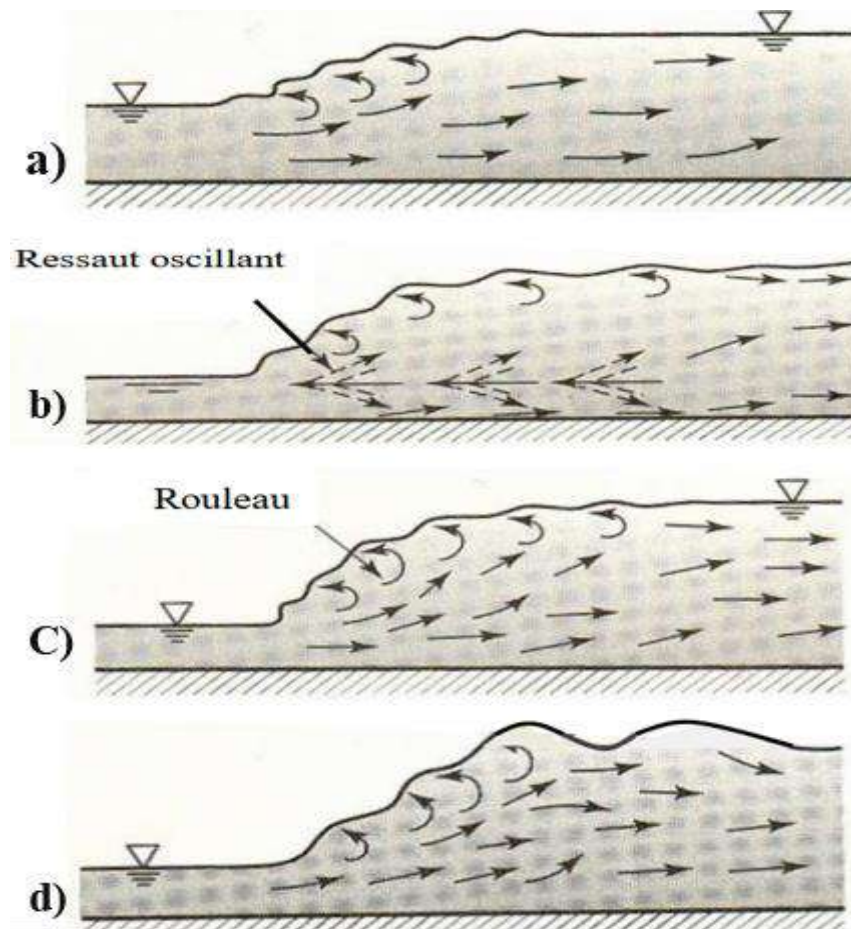
La formation du ressaut hydraulique peut se former par un seuil à paroi mince ou épaisse, discontinu ou continu, aussi pourrait être assuré par une marche positive ou négative. Ces différents obstacles ont pour but de créer la formation du ressaut en faisant élever le plan d'eau à l'aval et de contrôler sa position.

### I.1.2. Les différentes configurations du ressaut classique

Selon *Peterka et Bradley en 1957* ils ont classé le ressaut classique en quatre Configuration :

- ✚ PRE-RESSAUT dont le Froude est compris entre 1,7 et 2,5 (figure 1.1, a) : sa surface du ressaut est composée de petits rouleaux pour le nombre de Froude égale à 1,7 ; leurs rouleaux de surface augmentent chaque fois que le nombre de Froude  $F_1$  s'accroît.
- ✚ LE RESSAUT DE PASSAGE dont le nombre de Froude est compris entre 2,5 et 4,5. (figure 1.1, b) : il se forme avec de battements de vagues importantes pour des périodes irrégulières, pouvant créer un effet néfaste sur les parois du canal.
- ✚ LE RESSAUT STABLE s'obtient pour une gamme dont le nombre de Froude compris entre 4,5 et 9 (figure 1.1, c) : Ce type de ressaut est utilisé pour les bassins de dissipation d'énergie à cause de sa rentabilité bonne situant entre 45% et 70%.
- ✚ LE RESSAUT CLAPOTEUX est obtenu dont le nombre de Froude dépassant 9. Voir

Figure 1.1.d.



**Figure 1.1 :** Différentes configurations du ressaut classique selon *Peterka et Bradley (1957)*. a) Pré-ressaut, b) Ressaut de passage, C) Ressaut stable, d) Ressaut clapoteux.

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

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  $M = 0$ .

$$F_1^2 = Q^2 / (gb^2h_1^3) \quad (1.1)$$

$$Y^* = h_2^*/h_1 = 0.5[\sqrt{1 + 8IF_1^2} - 1] \quad (1.2)$$

L'équation (1.2) est celle de *Bélanger* permet d'estimer le rapport  $Y^*$  des hauteurs conjuguées du ressaut qui varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . *Sinniger et Hager en 1985* présentent une relation applicable pour le nombre de Froude dépasse la valeur 2 :

$$Y^* = h_2^*/h_1 = \sqrt{2} \cdot F_1 - 1/2 \quad (1.3)$$

### I.2.3. Les caractéristiques du ressaut

Le ressaut hydraulique est caractérisé par sa longueur du rouleau de surface ainsi que par sa longueur de ressaut sur laquelle il s'étend. Ces caractéristiques s'évaluent simplement par la voie d'expérimentation.

#### I.2.3.1. Longueurs du ressaut

La longueur du ressaut hydraulique  $L_j^*$  sur laquelle il s'étend, Ceci se mesure seulement par voie expérimentale et sa définition varie selon les auteurs. Par conséquent, on évalue cette longueur du ressaut hydraulique qui se mesure généralement entre le pied et l'aval des sections après sa formation de sorte que :

1. Sa surface libre est horizontale.
2. Sa surface du rouleau de surface est faible.
3. Les bulles d'air provoquées par les rouleaux de surface sont disparues.
4. L'écoulement graduellement varié se nait à l'aval du rouleau.

Ces définitions ont pour fin de montrer la limite aval du ressaut au-delà de laquelle la protection du bassin de tranquillisation n'est pas nécessaire. Les essais de *Peterka et Bradley en 1957* ont permis à *Hager et al. En 1990* de signaler une relation qui permet d'évaluer la longueur du ressaut hydraulique. La relation s'écrit comme suit :

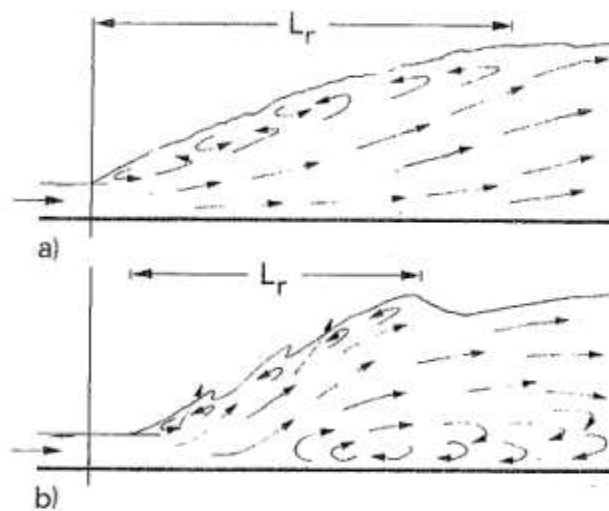
$$L_j^* / h_1 = 220 \cdot Tgh [(F_1 - 1)/22] \quad (1.4)$$

La relation de la longueur relative du ressaut hydraulique  $L_j^*/h_2^*$  peut être écrite selon *Hager et al. (1990)*, qui varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de pratique variant entre 4 et 12, comme suit :

$$L_j^*/h_2^* = 6 \quad (1.5)$$

### I.2.3.2. Longueur du rouleau de surface

La longueur du rouleau de surface  $L_r^*$ , *Hager et al* expliquent en 1990, deux caractéristiques de longueurs de rouleau de surface selon le type de ressaut étudié, la première s'appelle rouleau développé et le seconde non développé. Voir la figure 1.2.



**Figure 1.2:** Configuration du ressaut hydraulique. a) rouleau de surface développé. b) rouleau de surface non développé.

La configuration du rouleau de surface développé présente une allure lisse. Elle est quasiment-stabilité. Le jet qui se manifeste à la section initiale du ressaut hydraulique adhère sur une distance situant au fond du canal d'expérimentation puis se s'oriente vers l'aval.

Par contre la configuration du rouleau de surface non-développé se caractérise par une longueur moindre que celle du rouleau de surface développé et sa surface à l'aval se présente sous une configuration de vagues. On peut visualiser une zone du rouleau de séparation qui forme un tourbillon de fond, lors du mouvement de la masse liquide au fond du canal. En présence de cette zone, le jet qui se manifeste dans la partie initiale du ressaut est dévié vers la surface libre. Les expériences réalisées par *Hager et al. (1990)* montre que, pour le cas du ressaut classique, le rapport  $L_r^*/h_1$  varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et du rapport d'aspect égale à  $h_1/b$ . les chercheurs présentent deux relations ci-dessous :



$$\lambda_r^* = -12 + 160T_{gh}(F_1/20) \quad \text{Avec } w = h_1/b < 0.1 \quad (1.6)$$

$$\lambda_r^* = -12 + 100T_{gh}(F_1/12.5) \quad \text{Avec } 0.1 < w < 0.7 \quad (1.7)$$

« Tgh » indique la tangente hyperbolique.

Les auteurs montrent que pour le nombre de Froude  $F_1$  inférieur à 8, les relations (1.6) et (1.7) pourront être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

$$\lambda_r^* = L_r^*/h_1 = 8(F_1 - 1.5) \quad 2.5 < F_1 < 8 \quad (1.8)$$

#### I.2.4. Le rendement du ressaut hydraulique

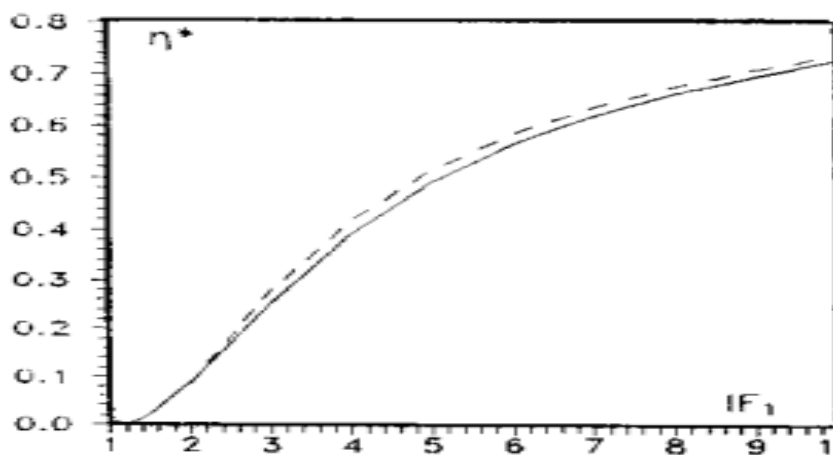
Le cas du canal de forme rectangulaire :

$$\eta^* = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (1.9)$$

La relation (1.9) permet le calcul du rendement  $\eta^*$ , *Sinniger et Hager (1986)* présentent une expression approximative, qui s'applique pour  $F_1 > 2$  :

$$\eta^* = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right]^2 \quad (1.10)$$

Les deux relations (1.9) et (1.10) sont montrées dans la figure 1.2.



**Figure 1.3:** Rendement  $\eta^*$  du ressaut classique qui varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . (—) Courbe tracée selon la relation (1.9). (---) Courbe tracée selon la relation (1.10).

La figure ci-dessus indique que le rendement  $\eta^*$  du ressaut classique dépasse à 50% pour  $F_1 \geq 5,1$  et que les rendements calculés à partir de la relation (1.10) dépassent légèrement à ceux obtenus par la relation (1.9) d'autre part ; l'écart maximum remarqué peut aboutir les 2%.

### I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT EN CANAL RECTANGULAIRE AVEC FOND RUGUEUX.

#### I.3.1. L'approche de RAJARATNAM (1968)

##### I.3.1.1. Le protocole d'expérimentation

L'expérimentation a été faite dans un canal rectangulaire de largeur 0,311 m, de longueur de 4,877 m et de profondeur de 0,61 m. les côtés du canal sont en plexiglas et le fond du canal est rugueux. Cinq rugosités ont été expérimentées :  $\varepsilon(\text{mm}) = 0,975 ; 2,225 ; 2,256 ; 2,469$  et  $9,144$ , «  $\varepsilon$  » est une rugosité équivalente des particules réparties uniformément sur le fond du canal.

Trente-trois expériences ont été effectuées. Les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique ont été mesurées. D'après l'auteur *Rajaratnam (1968)*, les mesures du rouleau de surface sont très crédibles, cependant que les mesures de la longueur du ressaut hydraulique sont moins fiables.

##### I.3.1.2. Discussion des résultats obtenus

###### I.3.1.2.1. La hauteur caractéristique du ressaut hydraulique : $h_2$

Après la création du ressaut hydraulique avec lit rugueux de rugosité équivalente imposées, et avec un écoulement torrentiel à l'amont de hauteur initiale  $h_1$  et de vitesse  $U_1$ , la caractéristique à l'aval  $h_2$  peut s'écrire dans la relation (1.11) :

$$h_2 = f_1(h_1, U_1, g, \rho, \nu, \varepsilon) \quad (1.11)$$

Avec : «  $\rho$  » désigne la masse volumique et «  $\nu$  » représente la viscosité cinématique du liquide. En s'inspirant sur le principe d'analyse adimensionnelle, nous pouvons présenter, que l'équation (1.11) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_1 \left[ F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, R = \frac{U_1 h_1}{\nu}, \frac{\varepsilon}{h_1} \right] \quad (1.12)$$

Avec **Re** est le nombre de Reynolds. Lorsque le nombre de Reynolds **Re** est très élevée, l'effet de la viscosité du liquide est négligé et l'équation (1.12) se réécrit sous la forme suivante :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_3 \left[ F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, \frac{\varepsilon}{h_1} \right] \quad (1.13)$$

La Figure ci-dessous montre la variation de  $y = h_2 / h_1$  en fonction de  $F_1$  pour différentes valeurs de la rugosité relative testées  $\varepsilon / h_1$ .

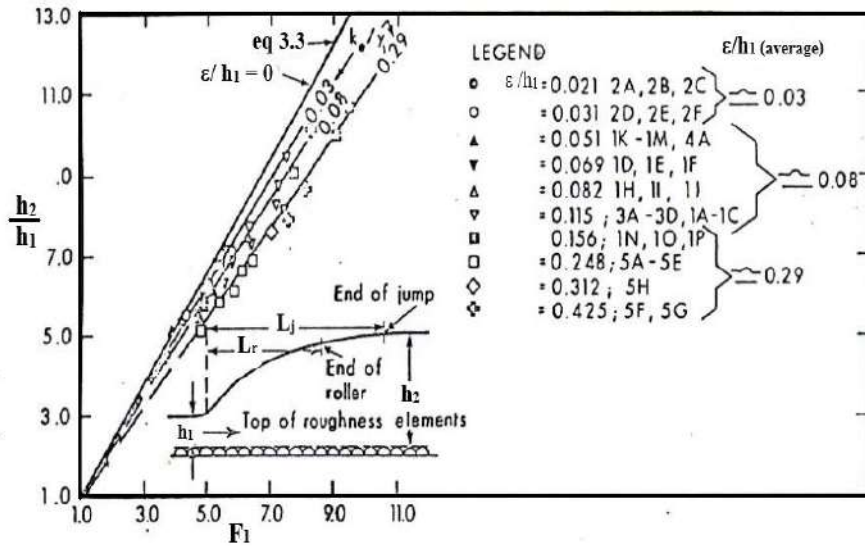


Figure 1.3: Variation de  $y= h_2 / h_1$  en fonction de  $F_1$ .

L'allure de l'équation indiquée dans la Figure (1.3), peut être considérée comme limite de la rugosité nulle. Trois allures pour trois rugosités relatives sont dessinées, pour  $\epsilon/h_1 = 0,03$  ;  $0,08$  et  $0,29$  ; ainsi les équations obtenues par *Rajaratnam* sont suivantes :

$$h_2/h_1 = 1.30 F_1 - 0.3 \text{ pour } \epsilon/h_1 = 0.03$$

$$h_2/h_1 = 1.22 F_1 - 0.24 \text{ pour } \epsilon/h_1 = 0.08 \tag{1.14}$$

$$h_2/h_1 = 1.10 F_1 - 0.10 \text{ pour } \epsilon/h_1 = 0.29$$

D'après *Rajaratnam (1968)*, l'équation de *Belanger* est réécrite sous la forme suivante :

$$h_2/h_1 = 1.41 F_1 - 0.5 \tag{1.15}$$

Selon *Rajaratnam*, en éliminant les constantes des équations (1.14) et (1.15), l'erreur n'étant pas considérables pour les nombres de Froude important, l'équation pourrait être réécrite comme suit :

$$\frac{h_2}{h_2^*} = \lambda \left[ \frac{\epsilon}{h_1} \right] \tag{1.16}$$

Avec  $\lambda$  varie en fonction de la rugosité relative. Pour les différentes valeurs de  $\epsilon/h_1$  dans l'équation (1.14),  $\lambda$  devient égal respectivement à  $0,92$  ;  $0,864$  et  $0,78$ . Les résultats obtenus sont injectés dans la Figure (1.5) qui montre la variation de  $h_2/h_2^*$  en fonction de  $\epsilon/h_1$  et une courbe moyenne peut être tracée comme résultat premier. Les différentes valeurs indiquées auparavant sont montrées également sur la Figure (1.5).

L'augmentation de la rugosité relative, engendre une réduction de  $h_2 / h_1^*$ . La rugosité varie de  $\epsilon / h_1 = 0$  jusqu' à environ 0,783. Par conséquent la réduction de la hauteur  $h_2$  est remarquable comparée avec la hauteur classique.

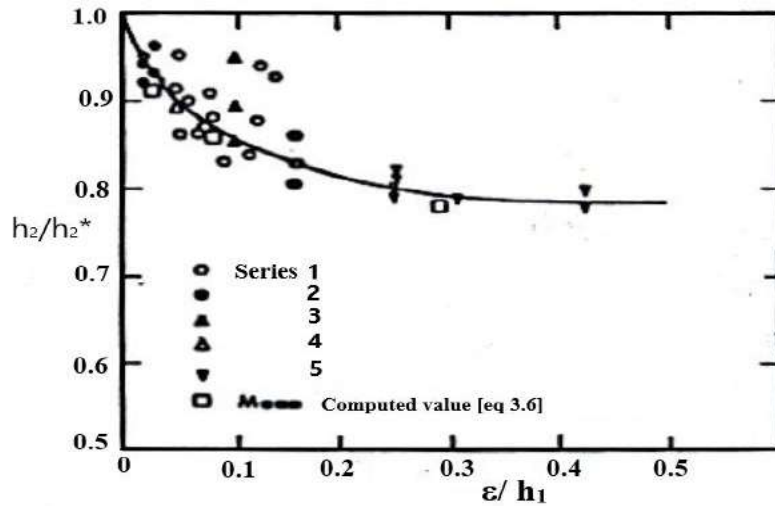


Figure 1.4: Variation de  $h_2/h_2^*$  en fonction de  $\epsilon / h_1$ .

**I.3.1.2.2. La longueur du rouleau de surface**

Les mesures expérimentales de la longueur du rouleau de surface sont indiquées dans la Figure (1.6, a) comparées avec la courbe du ressaut classique. On constate que la rugosité relative  $\epsilon / h_1$  dépasse 0,05, la longueur du rouleau du surface avec le lit rugueux est moindre comparée avec son homologue lisse.

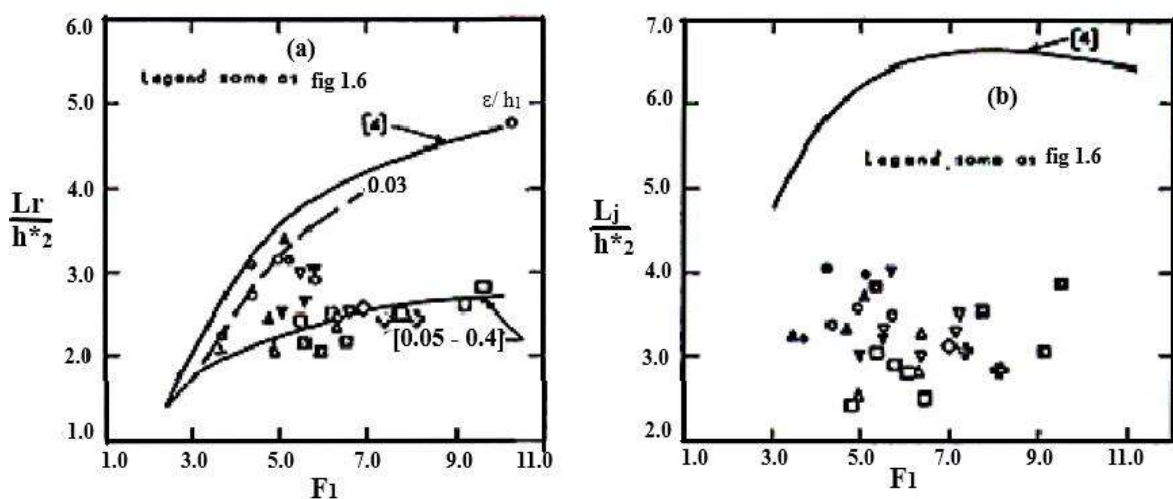


Figure 1.5: Variation de la longueur relative des caractéristiques du ressaut : (a)  $L_r/h^*_2$  en fonction de  $F_1$  ; (b)  $L_j/h^*_2$  en fonction de  $F_1$ .

## I.4. LE RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT EN CANAL RECTANGULAIRE AVEC LIT ONDULE

### I.4.1. L'approche de RAJARATNAM (2002)

#### I.4.1.1. Le protocole expérimental

L'expérimentation a été réalisée dans un canal de 0.446 m de largeur, 0.60m de profondeur et de longueur de 7.6 m avec les côtés du canal en plexiglas. La rugosité sous forme ondulation imposée au fond du canal est sous la forme du métal en aluminium (Figure 1.7). Le fond rugueux provoque des turbulences. La distance « s » séparant deux rugosités d'ondulation métalliques sinusoïdales est égale à 68 mm, et l'épaisseur "t" est de 13 à 22 mm. L'écoulement de l'eau dans le canal s'effectue par le moyen des trois pompes, et les débits sont mesurés par un débitmètre. Un écoulement torrentiel est produit avec une profondeur  $h_1$ . Afin de contrôler la profondeur dans la partie amont de l'écoulement dans le canal on utilise l'obstacle.

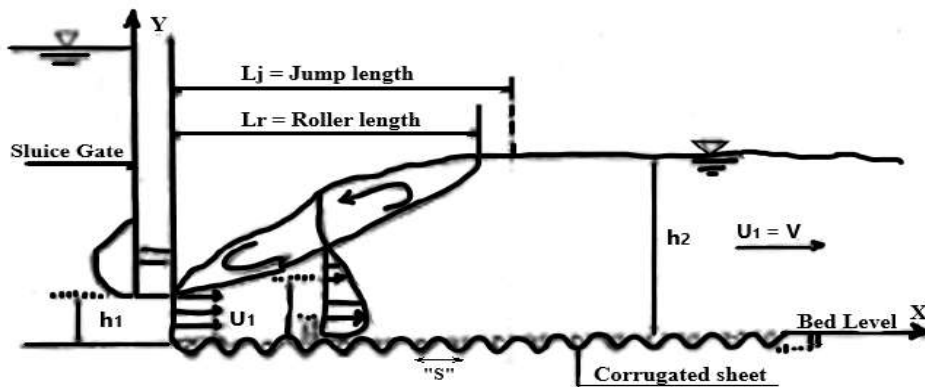


Figure 1.6: Configuration du ressaut hydraulique avec lit ondulé.

Pour la mesure du temps des vitesses longitudinales. Un tube de Prandtl de diamètre de 3.0 mm, a été connecté au manomètre vertical. Les différentes configurations de vitesse sont réalisées pour plusieurs sections verticales à l'intérieur du ressaut, exactement l au-dessus des crêtes de l'ondulation des rugosités. Le nombre de Reynolds  $Re = \frac{U_1 \times h_1}{\nu}$  est située entre 50800 et 206756. Différentes valeurs de l'ondulation sous forme des rugosités relatives, qui sont définies comme le rapport entre l'épaisseur de l'ondulation "t" et de la profondeur  $h_1$  de valeurs 0,50 ; 0,43 et 0,25 sont testées expérimentalement.

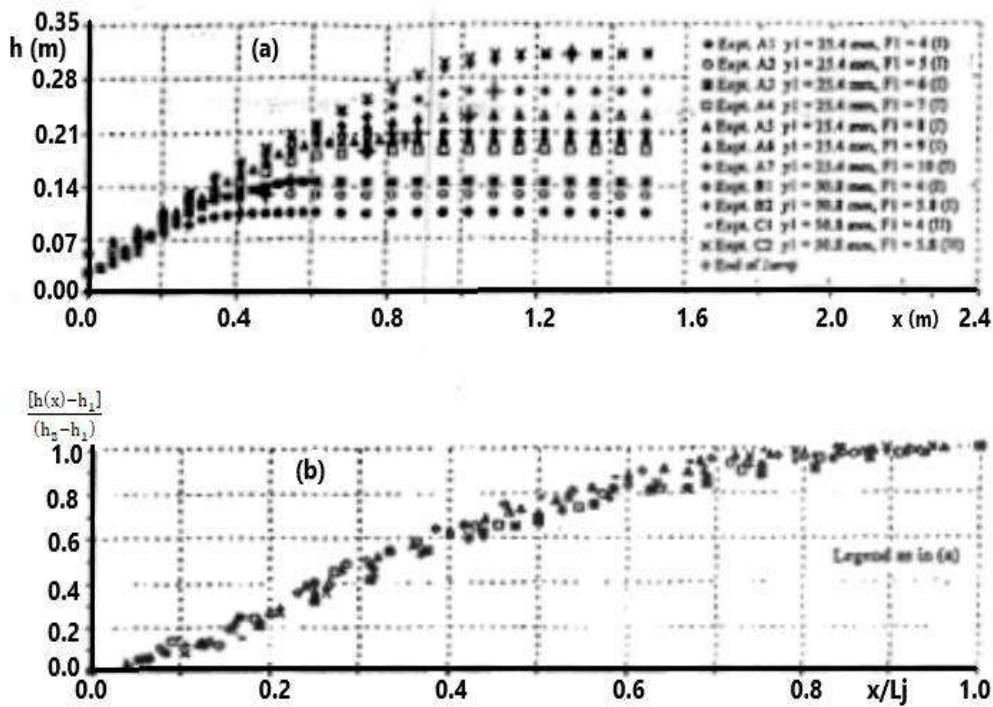
La profondeur relative aval est définie comme suit :  $y_2^* = \frac{h_2^*}{h_1}$  . Elle est formulée par l'équation de *Belanger* pour un canal rectangulaire avec lit lisse :

$$\frac{h_2^*}{h_1} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (1.17)$$

**I.4.1.2. Discussion des Résultats obtenus**

Les différentes configurations du ressaut hydraulique avec lit ondulé pour différentes expérimentations sont réalisées et indiquées dans la Figure (1.8.a), avec précision des mesures de 0,01 mm. Ces configurations de surfaces nous permettent la détermination de la profondeur  $h_2$  à l’aval de la surface du ressaut hydraulique avec le rapport  $\frac{[h(x)-h_1]}{(h_2-h_1)}$  varie en fonction de  $\frac{x}{L_j}$ , telle que :  $h(x)$  est la profondeur de l’écoulement pour la section  $x$ .

La Figure ci-dessous (1.8.b) illustre également les différentes configurations de surface du ressaut hydraulique qui sont presque identiques et peuvent être représentés par une seule courbe moyenne.



**Figure 1.7:** (a) Configuration de surface du ressaut hydraulique ; (b) Profil généralisé de surface du ressaut hydraulique.

Pour le ressaut avec lit ondulé, de rugosité d’épaisseur «  $t$  », et à l’amont du canal un écoulement torrentiel de profondeur amont  $h_1$ , de vitesse moyenne  $U_1$ , la profondeur aval  $h_2$  peut être représentée sous la forme suivante :

$$h_2 = f_1(h_1, U_1, g, \rho, \nu, t) \quad (1.18)$$

Avec :  $\rho$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) : masse volumique du liquide et  $\nu$  ( $\text{m}^2. \text{S}^{-1}$ ) : viscosité cinématique du liquide.

La relation (1.18) peut être aussi réécrite comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_1 \left[ F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, R = \frac{U_1 h_1}{\nu}, \frac{t}{h_1} \right] \quad (1.19)$$

La viscosité cinématique peut être négligée, Pour de grandes valeurs du nombre de Reynolds, selon *Rajaratnam 1976 ; Bremen et Hager en 1989*, la relation (1.19) peut être formulée comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_3 \left[ F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, \frac{t}{h_1} \right] \quad (1.20)$$

Toutes les mesures expérimentales obtenues sont montrées par la Figure ci-dessous 1.9, qui représentent la variation de  $\frac{h_2}{h_1}$  en fonction de  $F_1$ , et l'ondulation relative  $\frac{t}{h_1}$ .

L'approche (1.17) est aussi indiquée dans la même configuration. La Figure (1.9) illustre clairement que la rugosité relative  $\frac{t}{h_1}$  n'a pas un effet important sur le rapport  $\frac{h_2}{h_1}$ .

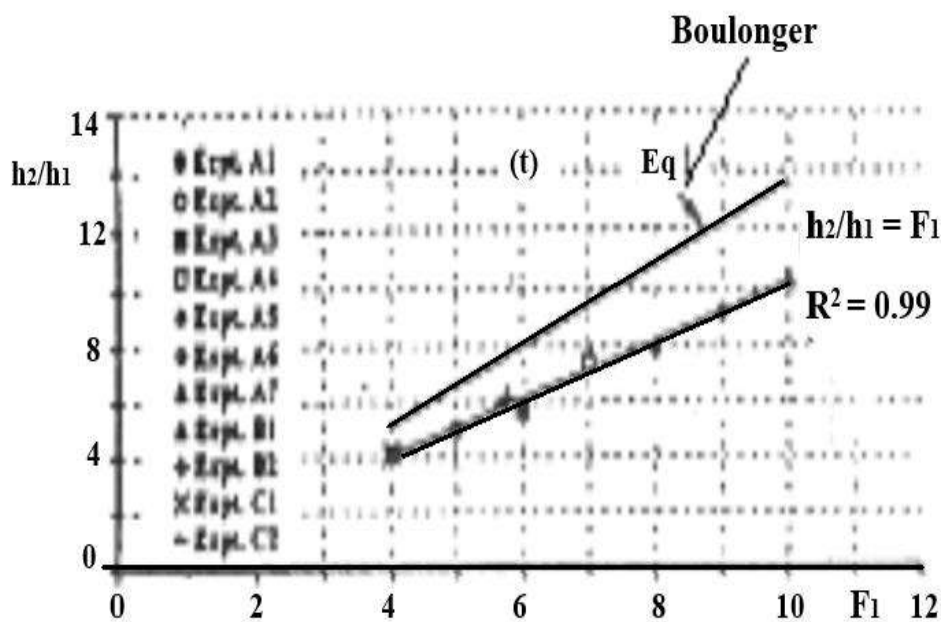


Figure 1.8: Variation de  $\frac{h_2}{h_1}$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

L'auteur a trouvé que le rapport des caractéristiques conjuguées  $\frac{h_2}{h_1}$  est approximativement égal au nombre de Froude incident  $F_1$ . D'après *Hence* la relation (1.20) peut être reformulée comme suit :

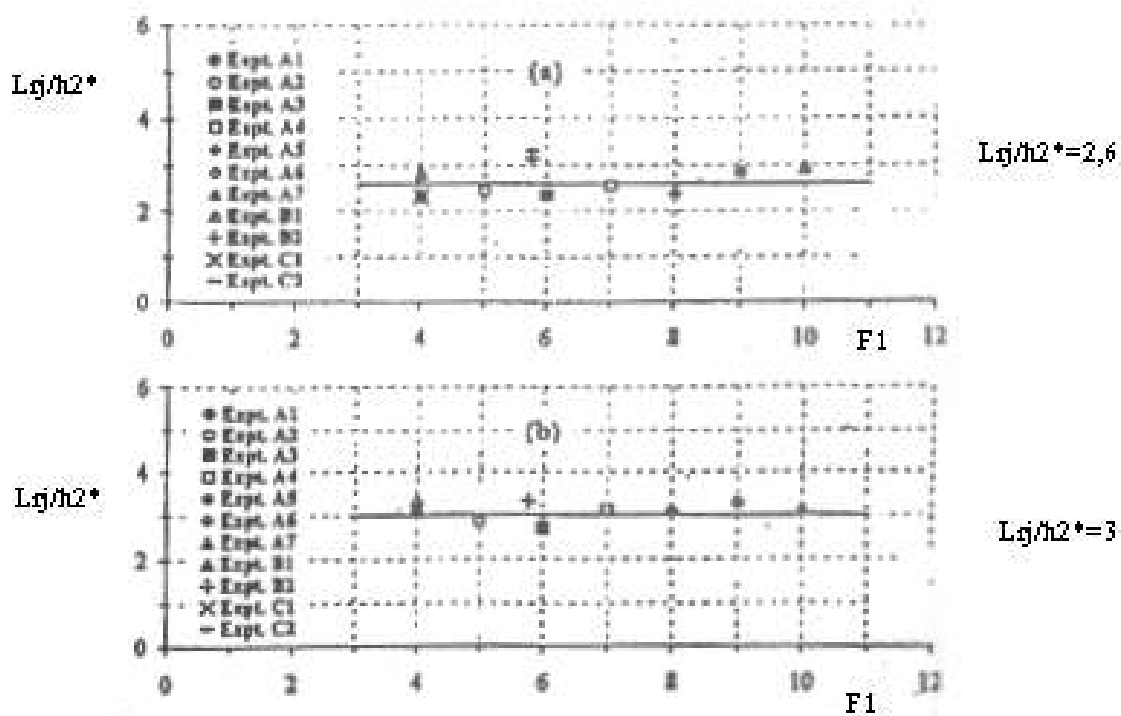
$$\frac{h_2}{h_1} \cong F_1 (R^2 = 0.99) \tag{1.21}$$

Cependant, selon *Rajaratnam en 1968* leurs essais réalisés dans le canal rectangulaire avec lit rugueux, la rugosité relative testée s'avère un paramètre très important. Par ailleurs, pour des nombres de Froude important, le rapport des caractéristiques des hauteurs conjuguées du ressaut classique peut être reformulés de la manière suivante :

$$\frac{h_2^*}{h_1} = \sqrt{2}F_1 - 1 \cong \sqrt{2}F_1 \tag{1.22}$$

Les différentes caractéristiques du ressaut hydrauliques classique mesurées expérimentalement sont indiquées dans la Figure (1.9.a). Le rapport  $L_r/h_2^*$  est au voisinage de 2,6.

La variation de la longueur relative du rouleau de surface du ressaut hydraulique est montrée dans la Figure (1.9.b) en fonction du nombre de Froude incident  $F_1$ . Il a été constaté que  $L_r/h_2^*$  est égal 3,0. Il a été constaté également que la longueur du ressaut avec un fond ondulé est égale la moitié que son homologue classique.



**Figure 1.9:** Configuration de la longueur relative du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

(a) du rouleau de surface ; (b) du ressaut.



**I.4. CONCLUSION**

En se basant sur les résultats obtenus des mesures expérimentales par *Rajaratnam en 1968* et pour les différents ressauts contrôlés et créés dans le banc d'expérimentation de forme rectangulaire à pente nulle avec un fond rugueux, dans lequel la rugosité imposée relative  $\varepsilon / h_1$  a été conçue entre de 0,02 à 0,43 et le nombre de Froude incident varie entre 3 à 10 des diverses conclusions sont ainsi retenues. Par conséquent, pour un ressaut qui se forme sur un fond rugueux, le rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  varie en fonction du nombre de Froude incident  $F_1$  et de la rugosité relative testées  $\varepsilon / h_1$ ,  $h_2^*$  étant comme la hauteur conjuguée aval du ressaut correspondant au ressaut hydraulique crée sur un lit lisse alors  $h_2/h_2^*$  varie seulement avec la rugosité relative testée. Il a été déduit que la longueur du ressaut hydraulique avec fond rugueux est égale approximativement la moitié que son homologue à fond lisse, pour des diverses rugosités relatives dépassant 0.10, cela apparait un avantage très significatif du ressaut hydraulique avec lit rugueux.

## **Chapitre II**

---

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée

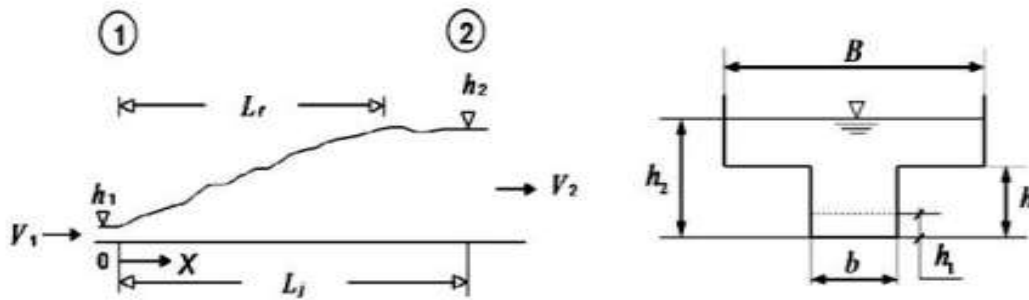
**II.1. INTRODUCTION :**

Deux axes seront traités pour ce présent chapitre, pour le premier axe, l’approche théorique sera présentée par *Khattoui et Achour en 2012* concernant le ressaut hydraulique en lit composé, le deuxième sera consacré à l’étude expérimentale la plus récente de *F. Riguet, M. Debabeche et A. Ghomri en 2019* reflétant l’étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée.

**II.2. APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR 2012**

**II.2.1. Les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique :**

La figure ci-dessous (2.1) indique les caractéristiques hydrauliques et géométriques du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée.



**Figure 2.1:** Configuration du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée

Selon l’auteur (*Bousmar et al. En 2004*), entre le lit mineur et le lit majeur du canal rectangulaire de section composée, un transfert de quantité de mouvement et de masse se produit. Entre le pied et la fin du ressaut hydraulique, la théorie de la quantité de mouvement entre le pied et la fin du ressaut, présenté par la figure 2.1, se résume de la manière suivante :

$$\rho Q (P_2 V_2 - P_1 V_1) = F_1 - F_2 \tag{2.1}$$

En se penchant sur les travaux de *Achour (2000)*, et en utilisant la relation de *Borda-Carnot* et compte tenue l’expression (2.1). Il semble acceptable d’ajouter une force de résistance dont la projection selon l’axe horizontal de l’écoulement aurait comme relation suivante :

$$f_x = -k\bar{\omega}(h_2 - h)^x h_1^y (B - b)^z \tag{2.2}$$

Cette expression représente la perte de charge engendrée par le transfert quantité de mouvement et de la masse entre le lit mineur et celui majeur. Les exposants x, y et z sont exprimées par la relation  $x + y + z = 3$ , le facteur k s’écrit comme suit :  $k = \varphi(L_j \text{ ou } L_r, h_1, h_2, h)$ . Tenant compte de l’expression de  $f_x$ , l’équation de la quantité de mouvement d’Euler se transforme comme suit :

$$\rho Q^2(1/A_2 - 1/A_1) = f_1 - f_2 + f_x \quad (2.3)$$

Étudions l'équation en prenant compte de cette relation suivante :

$$f_x = (1/2)\bar{\omega}(h_2 - h)h_1(B - b)$$

La supposition de la distribution des vitesses uniforme dans les sections au pied et à la fin du ressaut donne  $\beta_1 = \beta_2 = 1$ . Les deux sections  $A_1$  et  $A_2$  sont écrites par :  $A_1 = bh_1$  et  $A_2 = B(h_2 - h) + bh$ . Tenant compte en considération de l'hypothèse qui suppose que la distribution des pressions est hydrostatique pour deux sections 1 et 2 du ressaut, ainsi les deux relations des forces s'écrivent comme suit :

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

Tenant en considération de ces hypothèses et de la relation de continuité  $V_1A_1 = V_2A_2 = Q$ , l'expression (2.3) se transforme après réarrangement de la manière suivante :

$$2F_1^2 \left( \frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - \left( Y - \frac{1}{\tau} \right) \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (2.4)$$

$$\text{Ou :} \quad F_1 = Q / \sqrt{b^2 h_1^3 g} \quad (2.5)$$

L'équation finale serait, après l'annulation de la force de résistance  $f_x$ , comme suit :

$$2F_1^2 \left( \frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} \quad (2.6)$$

Les deux expressions (2.4) et (2.6) sont deux expressions fonctionnelles de forme  $\Phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$ . Sachant que les deux expressions 2.4 et 2.6 peuvent être formulée sous la forme  $Y^3 + aY^2 + bY + C = 0$ .

Le changement de variable  $Y = x - a/3$ , la relation de troisième degré devient alors :

$$Y^3 + pY + q = 0 \text{ dont la solution se fait facilement par l'utilisation le procédé trigonométrique.}$$

La variation de Y calculé par l'équation (2.6) en fonction de  $F_1$  est montrée par la figure (2.2). En faisant changer l'une des deux variables,  $\beta$  ou  $\tau$ , est fixée, la deuxième variable change de pas de 0.2. Les valeurs de  $F_1$  à prendre en considération doivent être strictement supérieure à la valeur minimale  $F_{1min} = [1/(2\sqrt{2})]\sqrt{(2/\tau + 1)^2 - 1}$  qui correspond à  $h_2 = h$ , dans le but que le ressaut se produise nécessairement dans le canal de forme composée ( $h_2 > h$ ). On

constate qu'à partir de ces deux figures montrées ci-dessous, que pour un  $\beta$  et  $\tau$  fixées,  $Y$  s'accroît avec l'augmentation de  $F_1$ . Lorsque les valeurs de  $\beta$  seront importantes, l'augmentation du rapport  $Y$  en fonction de  $F_1$  sera aussi plus rapide. Le rapport  $Y$  croît avec l'accroissement de  $\beta$  et diminue avec l'augmentation de  $\tau$ , Pour un nombre de Froude  $F_1$  fixé,

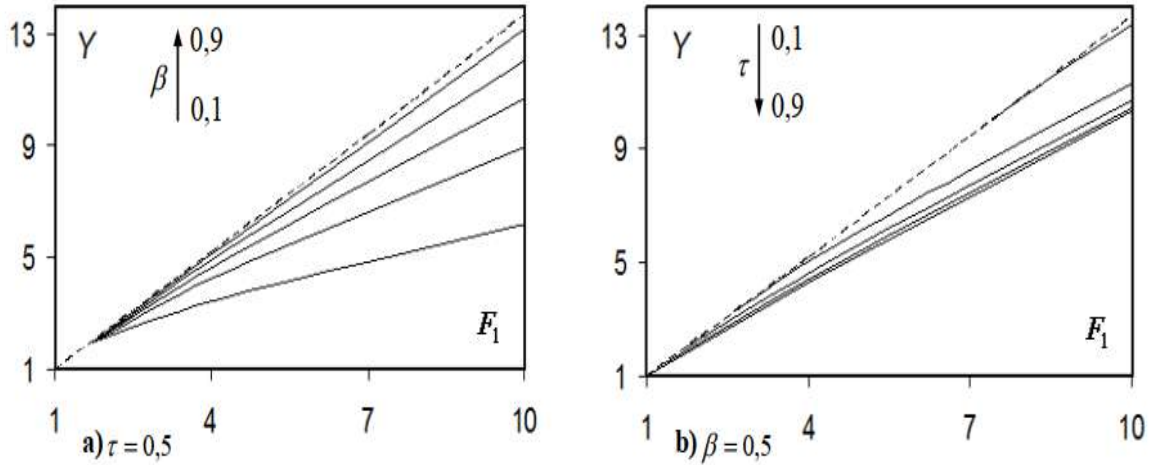


Figure 2.2: Rapport de  $Y$ , calculé par (2.4), varie en fonction de  $F_1$ . (---) :  $\beta = 1$ .

La figure ci-dessus montre la variation du rapport  $Y$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  avec  $\beta = \tau = 0,5$ . On note que les rapports  $Y$  calculés selon la relation (2.4) qui tient compte des forces de frottements sont inférieurs à celles calculés de la relation (2.6). Cette baisse est remarquée lorsque le nombre de Froude  $F_1$  sera important. La force  $f_x$  explique les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

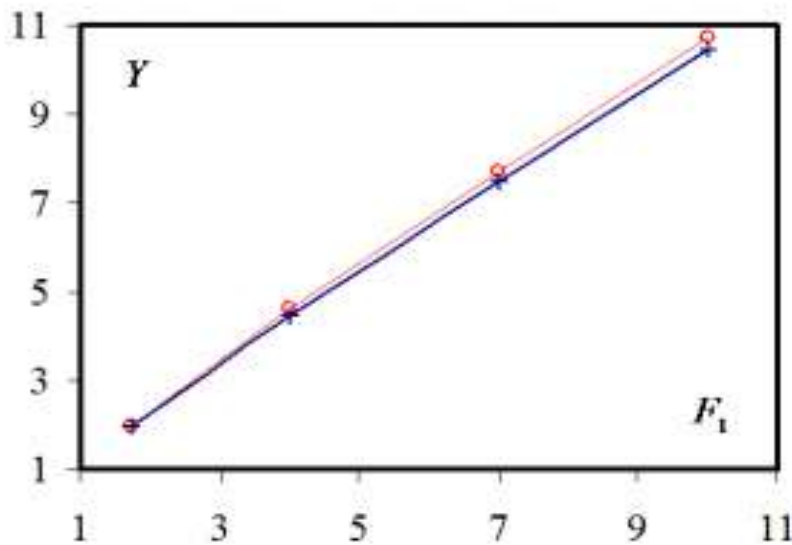


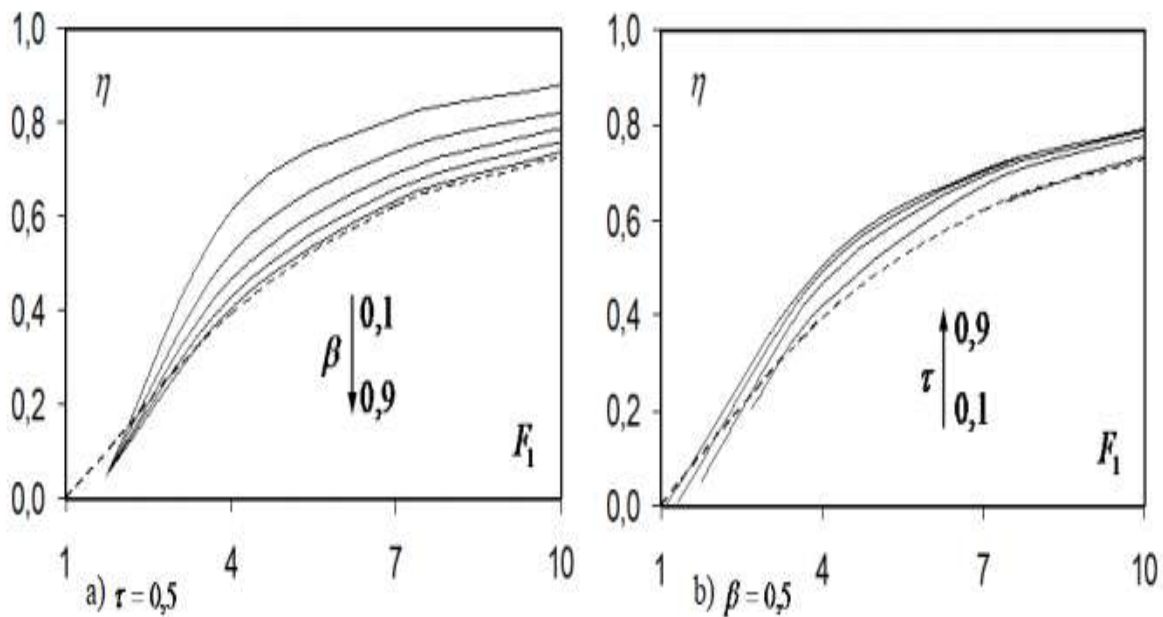
Figure 2.3: Rapport de  $Y$  varie en fonction de  $F_1$ . (o) : expression (2.6), (+) : expression (2.4).

**II.2.2. Le rendement du ressaut hydraulique :**

Le rendement,  $\eta = \Delta H/H_1$ , peut s'exprimer par l'expression (2.7), en tenant compte les mêmes suppositions que pour le rapport des Y.

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \tag{2.7}$$

Cette relation (2.7) permet de calculer explicitement, le rendement du ressaut hydraulique qui se produit en canal rectangulaire de forme composée, en connaissant  $F_1$ , Y,  $\beta$  et  $\tau$ , en supposant les valeurs de Y qui se calculent par la relation (2.6). La figure (2.4) présente la variation de  $\eta$  variant en fonction de  $F_1$ . Pour un  $\tau$  et un  $\beta$  donnés, il est montré clairement sur cette figure que le rendement  $\eta$  d'un ressaut hydraulique évoluant en canal composé, augmente proportionnellement avec l'augmentation de  $F_1$ . Pour un  $\tau$  donné, en fixant  $F_1$ , on peut voir facilement que le rendement  $\eta$  qui augmente avec l'accroissement de  $\tau$ .

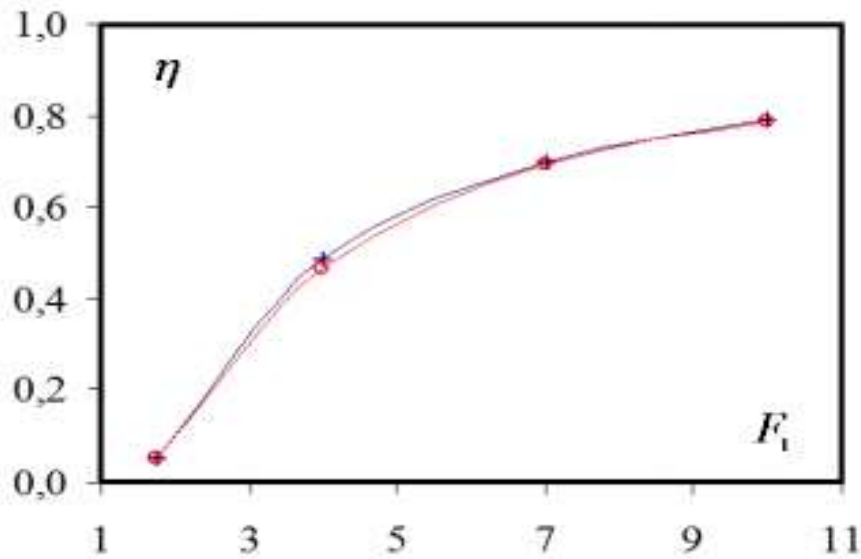


**Figure 2.4:** Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

(- - -) :  $\beta=1$ ,  $\eta$  est calculé par l'équation (2.7).

La présentation du rendement  $\eta$  qui varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour

$\beta = \tau = 0.5$ , est mentionnée dans la figure (2.5). Il est remarqué que les rendements  $\eta$  calculés en tenant compte de la force de frottement dépassent ceux calculés sans frottements.



**Figure 2.5:** Variation de  $\eta$  en fonction de  $F_1$ . (○) : équation (2.7), (\*) avec frottement.

### II.3. L'ETUDE EXPERIMENTALE DES CARACTRISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSEE

#### II.3.1. La problématique

Des différentes configurations du ressaut hydraulique peuvent être présentées, avec la modification des conditions à l'amont tel que débits, hauteurs etc... et à l'aval tel que le type d'obstacle, sa position, etc. Le ressaut s'appelle classique quand il se forme dans un canal rectangulaire de pente nulle ou faible, sans obstacle à l'aval. Il s'appelle contrôlé quand sa création est conditionnée par un obstacle mis à l'aval de l'écoulement. Il s'appelle forcé quand il se crée de part et d'autre de l'obstacle. L'évolution du ressaut hydraulique peut être formé dans des canaux non prismatiques ou prismatiques, avec lit rugueux ou lisse. Il s'agit pour notre cas le ressaut hydraulique formé par seuil mince évoluant dans un canal de forme composée avec des différentes ouvertures  $h_1$  (Figure 2.6). Pour une ouverture initiale  $h_1$  donné, l'évolution du débit engendre le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation aussi de la longueur de roulement de surface  $L_r$ . La distance  $\Delta x$  sur laquelle le ressaut se forme augmente aussi et pour rendre celui-ci dans sa position initiale, environ à 5 cm de la sortie du convergent, le seuil premier de hauteur « s » doit être augmenté. Par conséquent pour chaque nombre de Froude incident  $F_1$ ,

correspond la longueur du ressaut  $L_j$  et la longueur du rouleau de surface  $L_r$ , ainsi pour une hauteur  $h_2$  à l'aval du ressaut hydraulique et une hauteur du seuil «  $s$  » (Figure 2.6).

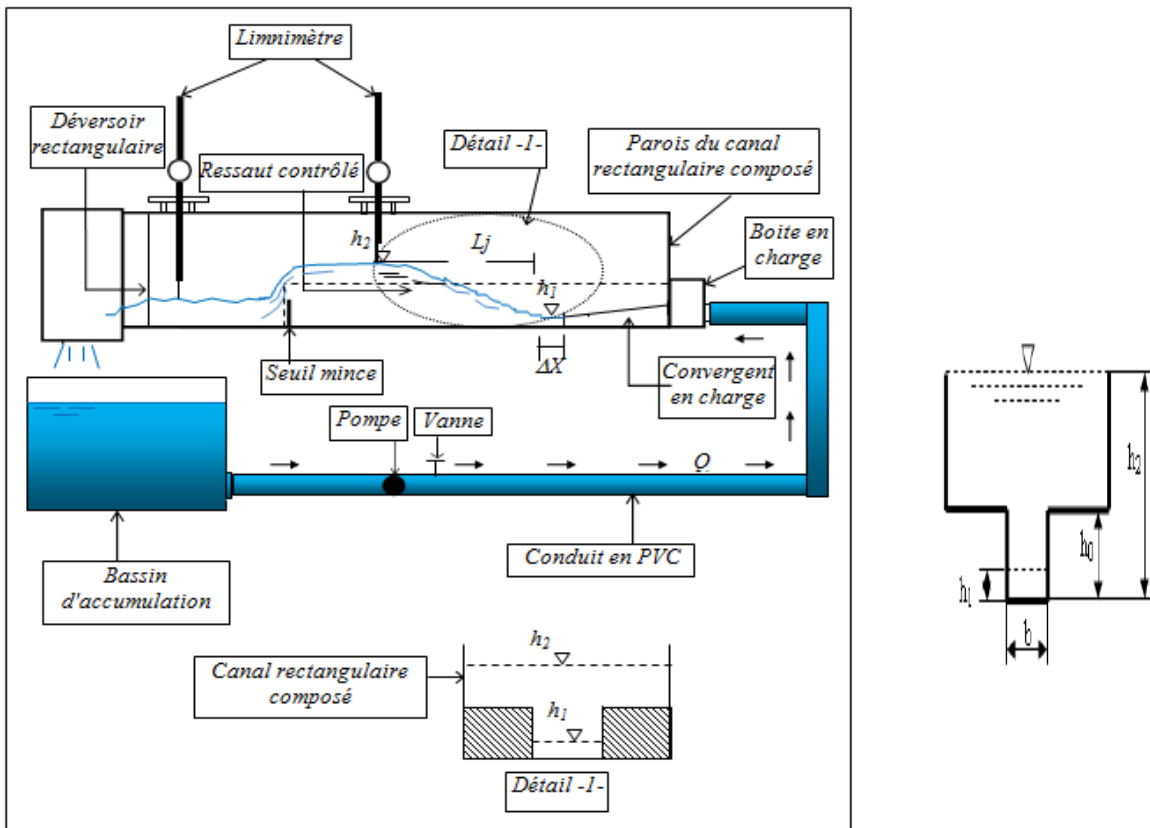


Figure 2.6: Configuration du ressaut contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire de forme composée.

### II.3.2. Analyse des essais expérimentaux

Une série de mesures expérimentales ont été obtenues lors de l'expérimentation faite au laboratoire, pour chacune des mesures obtenues intervient au phénomène du ressaut hydraulique formé, a permis aussi, d'aboutir à des résultats fiables. Ces caractéristiques obtenues sont : la hauteur amont  $h_1$ , le débit d'écoulement  $Q$ , la hauteur du seuil mince «  $s$  », la hauteur aval  $h_2$ , Ces mesures permettent de composer les produits adimensionnels tel que : le rapport des profondeurs  $Y = h_2/h_1$ , et le nombre de Froude  $F_1$  :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{b^2 h_1^3 g} \quad (2.8)$$

Ainsi lorsque nous obtenons une configuration du ressaut contrôlé, nous effectuons, pour une hauteur initiale  $h_1$  et une position  $x$  de seuil fixée, les opérations suivantes :

1. La mesure de la hauteur déversant  $H_{dev}$  se détermine par le déversoir rectangulaire.



2. La détermination du débit spécifique en appliquant la relation du débitmètre rectangulaire (Hachemi Rachedi L.2006) :

$$Q = 0,3794\sqrt{2g}\beta(1 + 0,16496\beta^{2,0716})^{3/2}H_{dev}^{3/2} \quad (2.9)$$

OÙ :

Q : Le débit volumique en (m<sup>3</sup>/s).

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

b : L'échancrure du canal (m).

B : La largeur au miroir du canal (m).

g : l'accélération gravitationnelle (m/s<sup>2</sup>).

$H_{dev}$  : La lame déversant en (m).

3. Le nombre de Froude se calcule, par application de l'expression (2.8).

4. La lecture de la hauteur aval  $h_2$  du ressaut hydraulique.



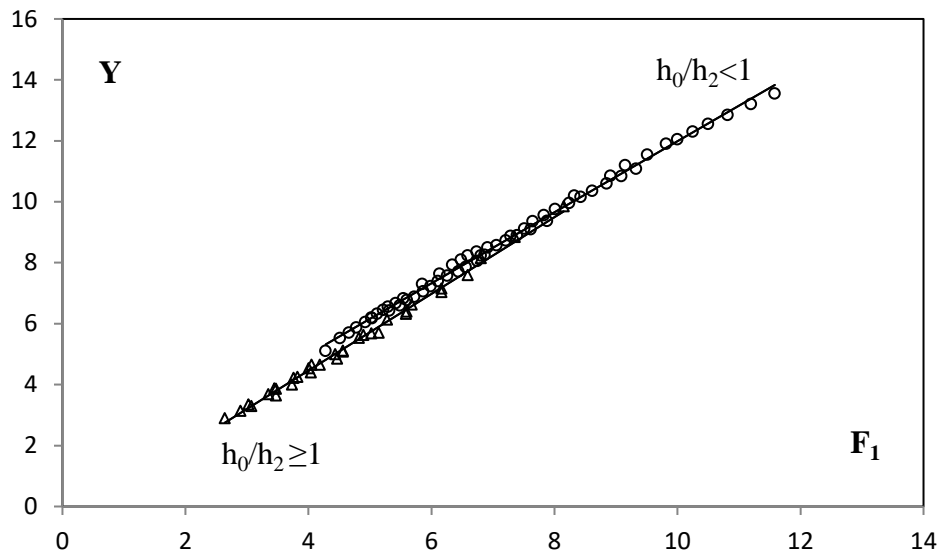
**Figure 2.7:** Canal ayant servi à l'expérimentation (F. Riguet et al 2019).

### II.3.3. Résultats expérimentaux

#### II.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées

Y est le rapport de la hauteur aval du ressaut  $h_2$  sur la hauteur amont  $h_1$  tel que  $Y = h_2/h_1$ .

La figure ci-dessous représente la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut variant en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour cinq ouvertures  $h_1$  : 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 et 4 cm pour le lit mineur et celui majeur du canal rectangulaire de forme composée.



**Figure 2.8:** Rapport des hauteurs conjuguées Y varie en fonction de Froude  $F_1$  pour le canal composée.

(o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; ( $\Delta$ ) les mesures expérimentales pour le lit mineur.

(—) Courbes d'ajustements.

L'ajustement des mesures expérimentales, du rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  et des nombres de Froude incident  $F_1$  est de type linéaire, d'équation suivante :

Pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $2.64 < F_1 < 8.14$

$$Y = 1,258 F_1 - 0,573 \quad (2.10)$$

Pour  $h_0/h_2 < 1$  et  $4.27 < F_1 < 11.58$

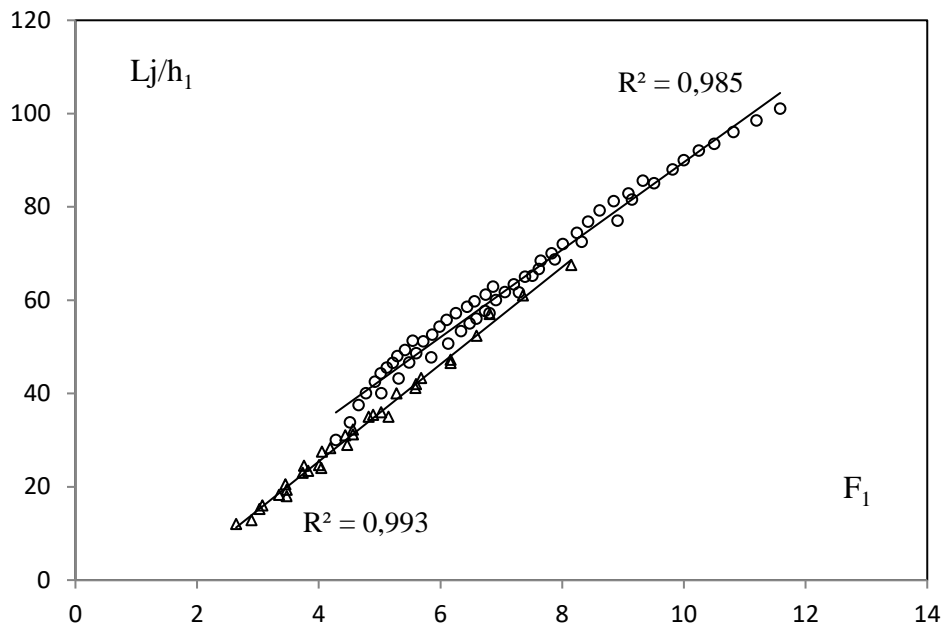
$$Y = 1,165 F_1 + 0,328 \quad (2.11)$$

#### II.3.3.2. Les caractéristiques du ressaut hydraulique

##### II.3.3.2.1. La longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut varie en fonction du nombre de Froude $F_1$

La longueur du ressaut hydraulique  $L_j$  est la distance qui sépare la section amont du ressaut et la section aval. Le but fondamental de cette étude est de mesurer la longueur relative du ressaut hydraulique  $L_j/h_1$  pour une gamme testée.

Cette variation est montrée par la figure ci-dessous (2.9).



**Figure.2.9 :** Représentation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude  $F_1$ ,

(o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (  $\Delta$  ) les mesures expérimentales pour le lit mineur.  
 (—) Courbes d'ajustement.

Pour le lit mineur :  $h_0/h_2 \geq 1$  :

$$L_j/h_1 = 10,41F_1 - 16,23 \quad R^2 = 0,993 \quad (2.12)$$

Pour le lit majeur :  $h_0/h_2 < 1$  :

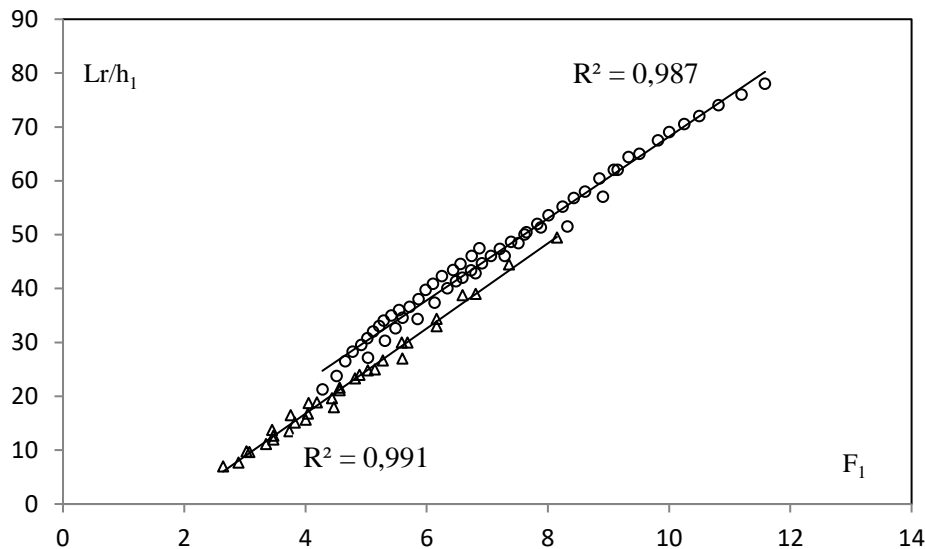
$$L_j/h_1 = 9,378F_1 - 4,211, \quad R^2 = 0,985 \quad (2.13)$$

La figure ci-dessus montre que pour un nombre de Froude fixé, la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut hydraulique en lit majeur est plus importante que son homologue pour le lit mineur.

### II.3.3.2.2 La longueur relative $L_r/h_1$ du rouleau de surface varie en fonction du nombre de Froude $F_1$ .

Cette caractéristique  $L_r$  est étant la distance qui sépare la section amont du ressaut et la section aval du rouleau de surface.

Cette variation de la longueur relative  $L_r/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  est montrée par la figure (2.10).



**Figure 2.10:** Représentation de la longueur relative  $Lr/h_1$  du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; ( $\Delta$ ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.

On peut conclure qu'à partir de cette figure que la section composée présente un rouleau de surface compacte en lit mineur que celui en lit majeur.

#### II.4. CONCLUSION

A travers ce deuxième chapitre de la première partie bibliographique nous avons cité les travaux en premier lieu de *Khattoui et Achour en 2012* liées avec le ressaut hydraulique formé en canal rectangulaire de section composée. Cette relation fonctionnelle est de forme  $\phi(Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$ . Sans tenir compte des forces de frottement, une relation deuxième a été exposée y compris les forces de frottement. L'approche globale est déduite par le développement théorique mené par *Achour (2000)* sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie.

En second lieu et à partir des mesures expérimentales obtenues au niveau du laboratoire (LARHYSS), on constate 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.

L'étude s'est intéressée, en premier temps à la variation de rapport  $Y$  qui varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour différentes ouvertures pour les deux lits du canal rectangulaire de forme composée. On constate que ce rapport  $Y$  s'accroît avec l'augmentation du nombre de Froude  $F_1$  et que pour un nombre de Froude fixé  $F_1$ ,  $Y$  est plus important en lit majeur. On note que pour une série des nombres de Froude et pour différentes ouvertures testées  $h_1$ , le ressaut

hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée, présente deux relations expérimentales globales adimensionnelles telles que  $Y = f(F_1)$  par lesquelles on dimensionnerait les ouvrages hydrauliques (bassin de tranquillisation).

En second temps, L'étude expérimentale s'est intéressée, à l'estimation des longueurs qui caractérisent le ressaut hydraulique. Pour chaque lit du canal, Il a été prouvé qu'une relation de type linéaire est obtenue. Finalement, On peut conclure que le ressaut hydraulique qui s'évolue dans le canal rectangulaire de forme composée a pour effet réducteur à leurs caractéristiques au lit mineur que celui au lit majeur.

## **Chapitre III**

---

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  $90^\circ$ , à parois rugueuses *M. Debabeche, S. Kateb et A. Ghomri (2006)*. Nous allons présenter à travers cette étude des relations fonctionnelles qui lient 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 :  $\varepsilon$  (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 «  $\varepsilon$  » des parois du canal. En outre, les paramètres adimensionnels obtenus sont :

- ✚ Le nombre de Froude  $F_1$  tel que :

$$F_1^2 = 2Q^2 / (gm^2 h_1^5)$$

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

- ✚ 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 3.1), 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 (Figure3.2).



**Figure 3.1:** Tapis rugueux de rugosité équivalente  $\varepsilon = 8,73\text{mm}$ .





Figure 3.2: Tapis collé soigneusement sur les parois du canal

### III.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

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

Cette Figure (3.3) représente la variation  $L_j/h_1$  du ressaut hydraulique qui varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , avec quatre tapis rugueux testés. On constate quatre allures perceptibles, qui correspondent 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  $L_j/h_1$  pourrait être écrite selon la relation suivante :

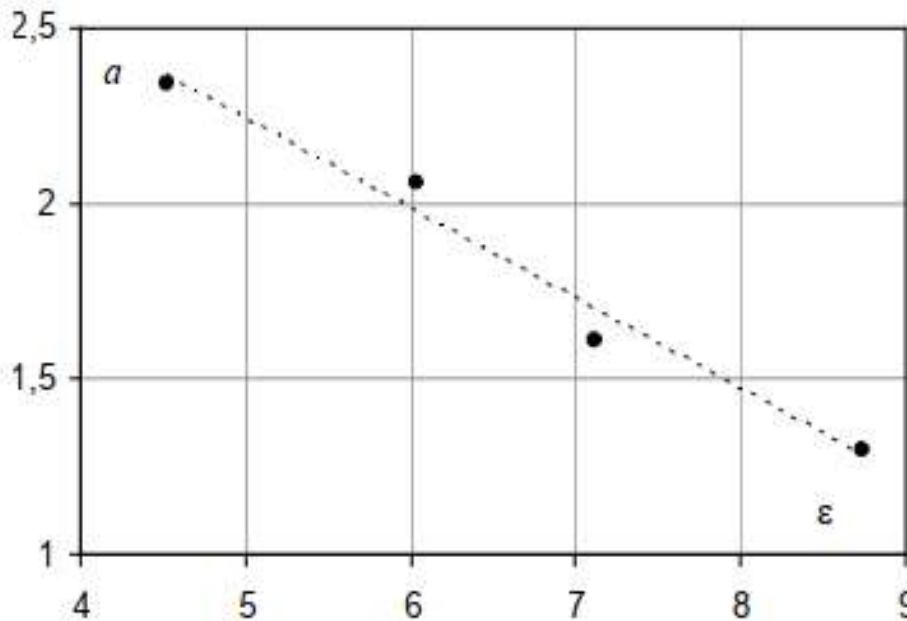
$$L_j / h_1 = a (F_1 - 1) \quad (3.1)$$

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 3.1.

**Tableau 3.1:** Les valeurs du coefficient  $a$  issues de la relation (3.1).

$\varepsilon$ (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 3.4.



**Figure 3.3:** Coefficient  $a$  issu de la relation (3.1) 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 :

$$a = 3,53 - 0,26\varepsilon \quad (3.2)$$

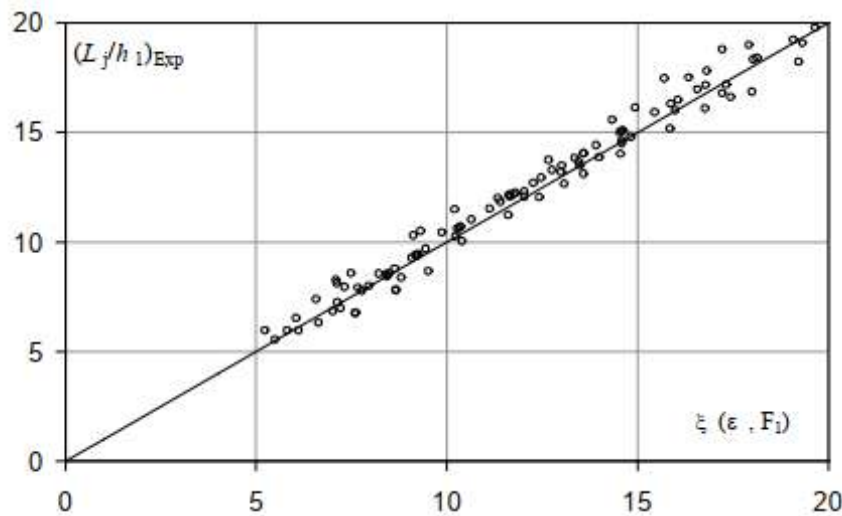
En éliminant le coefficient  $a$  entre les relations (3.1) et (3.2), nous pouvons alors écrire :

$$L_j / h_1 = (3,53 - 0,26\varepsilon) (F_1 - 1) \quad (3.3)$$

L'application de la relation (3.3) 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 (3.3) est montrée par la figure (3.5). Par conséquent, la confirmation que  $(L_j / h_1)_{Exp}$  est raisonnablement définie par

la relation (3.3) car la majorité des mesures expérimentales se répartissent autour de la première bissectrice.

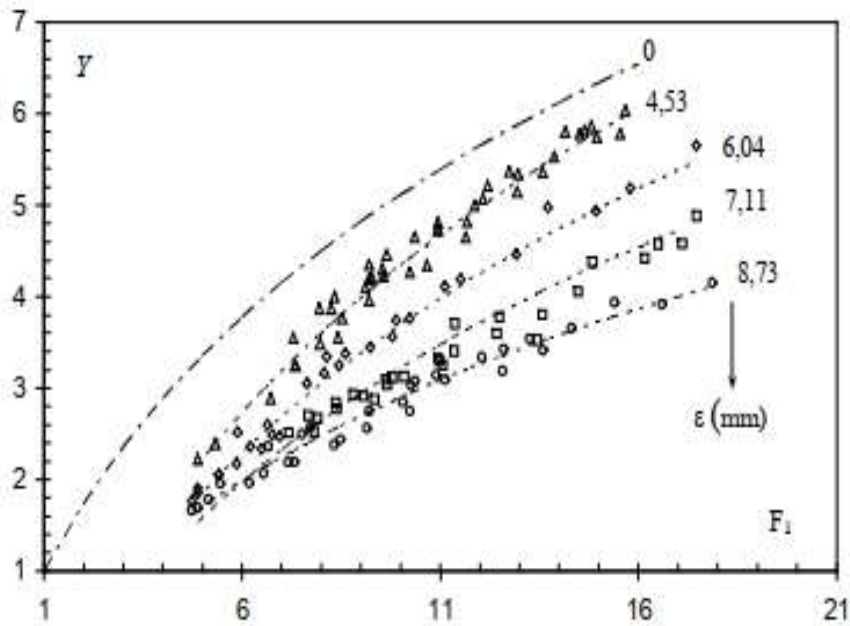


**Figure 3.4:** Longueur relative expérimentale  $(L_j / h_1)_{Exp}$  varie en fonction de  $\xi(\epsilon, F_1)$  montrée par la relation (3.3). (o) Les motifs expérimentaux du ressaut hydraulique.

### 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 3.6. 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 «  $\epsilon$  ». Quatre allures de points, correspondant chacune à une valeur donnée de la rugosité absolue «  $\epsilon$  », sont montrés par la figure (3.6), une représentation de la variation  $Y(F_1)$  correspondant à une rugosité équivalente  $\epsilon \rightarrow 0$  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 :

$$Y = \frac{2Y^2(Y^2+Y+1)}{3(Y+1)} \tag{3.4}$$



**Figure 3.5:** 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 :

$$Y = b \ln \left( \frac{F_1 + 4}{5} \right) + c \tag{3.5}$$

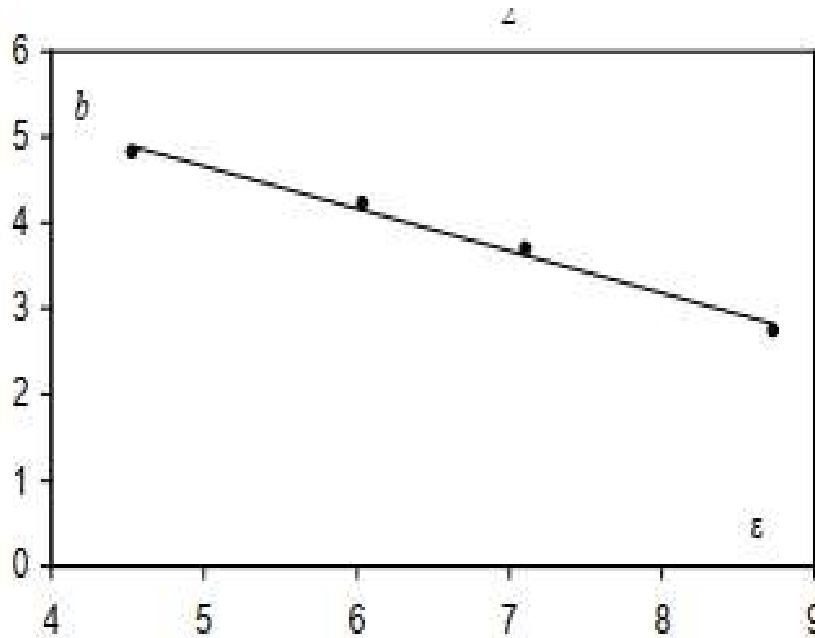
Récapitulation des valeurs des coefficients  $b$  et  $c$ , ainsi que les coefficients de corrélation  $R^2$  issues de l'ajustement est montrée par le tableau (3.2).

**Tableau 3.2:** Coefficients  $b$  et  $c$  issus de la relation (3.5).

$\varepsilon(\text{mm})$	$b$	$c$	$R^2$
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 (3.2), 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 :

$$b = 7.14 - \frac{1}{2} \varepsilon \quad (3.6)$$



**Figure 3.6:** Illustration du coefficient  $b$  de la relation (3.5) en fonction de la rugosité équivalente  $\varepsilon$

(—) Courbe tracée issue par la relation (3.6).

D'après Le tableau (3.2) 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.

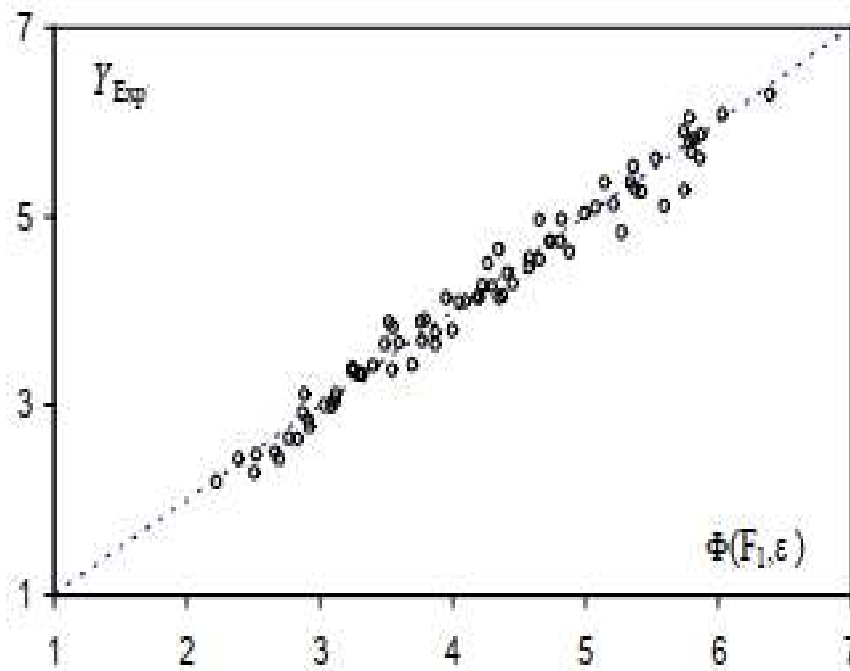
$$c = -\frac{3}{5} \quad (3.7)$$

Par conséquent, selon les équations (3.6) et (3.7), la relation (3.5) s'écrit comme suit :

$$Y = \left(7.14 - \frac{1}{2} \varepsilon\right) \text{Ln} \left(\frac{F_1 + 4}{5}\right) - \frac{3}{5} \quad (3.8)$$

L'approche expérimentale (3.8) 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 (3.8) est illustrée graphiquement sur la figure (3.8) variant en fonction des valeurs expérimentales  $Y_{Exp}$ .



**Figure 3.7:** Représentation  $Y_{Exp}$  en fonction de  $\Phi(F_1, \varepsilon)$ .

(- - -) : 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  $L_j/h_1$  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  $L_j/h_1$  par une approche expérimentale adimensionnelle obtenue (3.3). 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 (3.8)], déduite par l'analyse statistique des mesures expérimentales.

## **Chapitre IV**

---

Ressaut hydraulique en canal profilé en “U” à fond  
rugueux

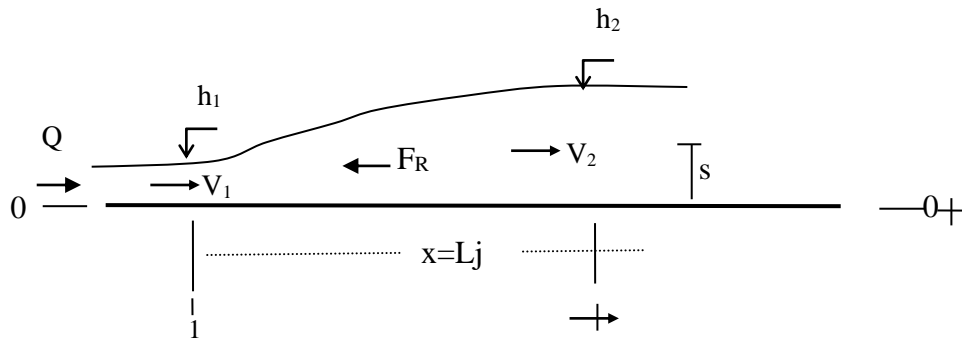


**IV.1. INTRODUCTION**

Dans ce chapitre nous allons passer en revue les travaux réalisés par *ALI Ghomri 2012* concernant le ressaut hydraulique évolué en un canal de section en “U” avec lit rugueux théoriquement et expérimentalement. En effet, l’approche théorique s’intéresse à étudier une relation qui varie en fonction du rapport  $Y = h_2/h_1$ , le nombre de Froude  $F_1$  et du coefficient de résistance  $C_r$ .

**IV.2. ETUDE DE L’APPROCHE THEORIQUE**

Dans la figure ci-dessous nous présentons le ressaut hydraulique contrôlé par seuil de hauteur « s » évolue en canal de section en “U” de fond rugueux et de diamètre D. Cet obstacle est mis en travers de l’écoulement à une distance x égale à la longueur  $L_j$  du ressaut hydraulique dont les profondeurs conjuguées à la section amont et à la section aval sont successivement  $h_1$  et  $h_2$ . L’écoulement étant en régime torrentiel à la partie amont et fluvial à la partie aval.



**Figure 4.1:** Ressaut hydraulique formé par un obstacle mince évolué en canal De section “U” avec lit rugueux.

En se penchant sur la théorie d’Euler sous forme classique entre les parties 1-1 et 2-2 (figure 4.1), en tenant en considération de la force de frottement  $F_R$  due à la rugosité imposée au lit du canal. Cette équation est :

$$\bar{h}_1 A_1 + Q^2 / (g A_1) = \bar{h}_2 A_2 + Q^2 / (g A_2) + F_R / \rho g O \text{ù,}$$

$\bar{h}_1 = (D^3 / 12 A_1) \sin^3 \theta_1 - (D / 2) \cos \theta_1$  est le centre de gravité de la section  $A_1$ ,

$\bar{h}_2 = (D / 2) [(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_o) + 1/6] / (y_2 - C_o)$  est le centre de gravité de la section  $A_2$ ,  $\theta_1 = \cos^{-1}(1 - 2y_1)$ .

$$F_R = \rho g L_j C (V_1^2 / 2g) p,$$

Avec  $p$  : est le périmètre du fond rugueux circulaire de la canalisation.

En tenant compte des hypothèses tenues en considération pour l'application de la théorie d'Euler qui sont :

- Pour la section 1-1 et 2-2 La pression est hydrostatique ;
- La pente du canal est presque horizontale ;
- L'écoulement est uniforme à la section amont du canal ;
- Les frottements de l'air sont négligeables.

$L_j$  : longueur du ressaut hydraulique (m),

$C$  : Coefficient du au frottement et de la résistance.

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

Sachant que 
$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{Q}{\frac{D^2}{4}(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)}$$

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g(A_1)^2} = \frac{8Q^2D}{gD^5[(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)]^2} = \frac{8q^2D}{[(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)]^2}$$

Avec 
$$F_1^2 = \frac{Q^2D \sin \theta_1}{g\left[\frac{D^2}{4}(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)\right]^3} = \frac{64q^2 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^3} \quad \text{et} \quad q^2 = \frac{Q^2}{gD^5}$$

D'ou : 
$$\frac{V_1^2}{2g} = F_1^2 \frac{D(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)}{8 \sin \theta_1}$$

$$A_1 = \frac{D^2}{4}(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1); \quad A_2 = \frac{\pi D^2}{8} + \left(h_2 - \frac{D}{2}\right)D = \frac{\pi D^2}{8} + h_2D - \frac{D^2}{2} \quad \text{et} \quad P = \frac{\pi D}{2}$$

L'expression selon la théorie d'Euler se résume de la manière suivante :

$$\frac{Q^2}{gA_1} - \frac{Q^2}{gA_2} - C \frac{V_1^2}{2g} L_j P = h_2 A_2 - h_1 A_1 \quad (4.1)$$

Remplaçant  $V_1^2/2g$  dans la relation (4.1) on aura comme suit :

$$\frac{Q^2}{g} \left( \frac{A_2 - A_1}{A_2 A_1} \right) - C F_1^2 \frac{D(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)}{8 \sin \theta_1} L_j P = h_2 A_2 - h_1 A_1 \quad (4.2)$$

Multipliant les deux membres de la relation (4.2) par  $\frac{A_2 A_1}{A_2 - A_1}$  on aura ce qui suit :

$$\frac{Q^2}{g} - C F_1^2 \frac{D(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)}{8 \sin \theta_1} L_j \frac{\pi D}{2} \frac{A_2 A_1}{A_2 - A_1} = h_2 A_2 \frac{A_2 A_1}{A_2 - A_1} - h_1 A_1 \frac{A_2 A_1}{A_2 - A_1} \quad (4.3)$$

En injectant  $h_1, h_2, A_1,$  et  $A_2$  par leurs expressions dans la relation (4.3) avec la division des deux membres par  $D^5$  on aura :

$$q^2 - \frac{CD(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)F_1^2 L_j \pi (D/2) \frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \left( \frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right)}{8D^5 \sin \theta_1 \left[ \left( \frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right) - \left( \frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right) \right]} =$$

$$\left( \frac{D}{2(y_2 - C_0)} \right) \frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6] \left( \frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right)^2 \left( \frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right)}{D^5 \left[ \left( \frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right) - \left( \frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right) \right]}$$

$$\frac{\frac{D^3 \sin^3 \theta_1}{12 \left( \frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right)} \left( \frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right)^2 \left( \frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right) + (D/2) \left( \frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right)^2 \left( \frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right)}{D^5 \left[ \left( \frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right) - \frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}$$

En mettant  $D^7$  comme facteur entre les deux membres avec  $L_j^* = L_j/D$  il s'en suit :

$$q^2 - \frac{C F_1^2 L_j^* (\pi/2) \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2 \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{8 \sin \theta_1 \left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \left( \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right) \right]} =$$

$$\frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6] \left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)^2 \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}{\left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)} +$$

$$\frac{-\frac{\sin^3 \theta_1}{12} \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) + \frac{\cos \theta_1}{2} \left( \frac{\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1}{4} \right)^2 \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)} \quad (4.4)$$

En sortant aussi le rapport ci-dessous pour le deuxième membre comme facteur commun :

$$\frac{\left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}{\left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}$$

on déduit ce qui suit :

$$q^2 - \frac{C F_1^2 L_j^* (\pi/2) \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2 \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{8 \sin \theta_1 \left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \left( \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right) \right]} = \frac{\left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}{\left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}$$

$$\left[ \frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{2(y_2 - C_0)} \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{\sin^3 \theta_1}{12} + \frac{\cos \theta_1}{2} \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right] \quad (4.5)$$

En multipliant les deux membres de la relation (4.5) par l'expression :  $\frac{64 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^3}$

Cette relation devient ainsi :

$$F_1^2 - \frac{CF_1^2 L_j^* (\pi/2) \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2 \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{8 \sin \theta_1 \left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \left( \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right) \right]} \frac{64 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^3} =$$

$$\frac{64 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^3} \frac{\left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}{\left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}$$

$$\left[ \frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{2(y_2 - C_0)} \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{\sin^3 \theta_1}{12} + \frac{\cos \theta_1}{2} \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right] \quad (4.6)$$

Finalement, l'équation obtenue après réarrangement est comme suite :

$$F_1^2 \left( 1 - \frac{CL_j^* \pi \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \left( \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right) \right] (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)} \right) =$$

$$\frac{8 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2} \frac{\left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}$$

$$\left[ \frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{(y_2 - C_0)} \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{\sin^3 \theta_1}{6} + \frac{\cos \theta_1}{4} \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right] \quad (4.7)$$

La relation (4.7) est sous la forme  $F_1^2 (1 - C_r) = f(y_1, y_2)$

Avec :

$$C_r = \frac{CL_j^* \pi \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \left( \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right) \right] (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)}$$

Par conséquent la relation finale est la suivante :

$$F_1^2 (1 - C_r) = \frac{8 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2} \frac{\left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}$$

$$\left[ \frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{6} - \frac{\sin^3 \theta_1}{6} + \frac{\cos \theta_1}{4} \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right] \quad (4.8)$$

Alors, cette relation finale obtenue est semi théorique du moment que le coefficient de frottement  $C_r$ , ne peut être obtenue qu'à partir des données expérimentales.

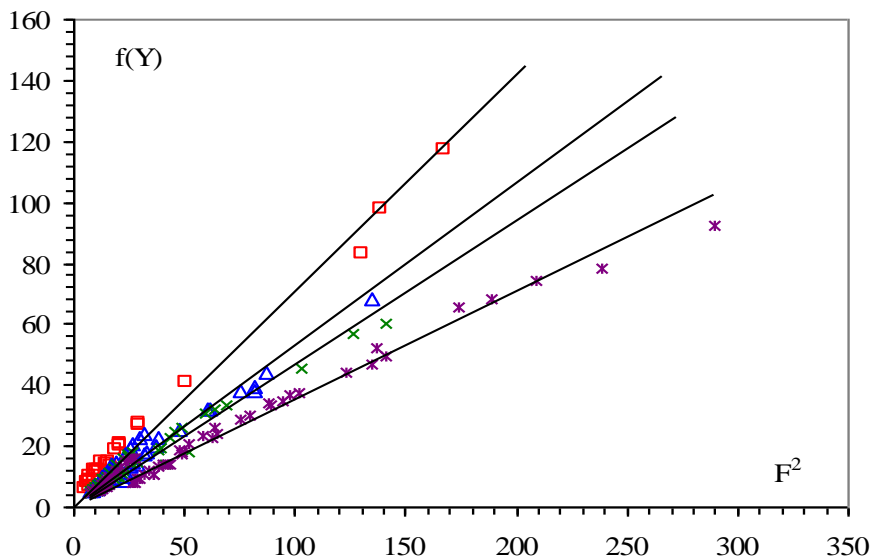
On remarque que pour le coefficient  $C_r$  égale à zéro, la relation obtenue (4.8) devient la relation théorique de *Debabeche (2003)* pour un ressaut hydraulique qui s'évolue en canal de forme en "U" à fond lisse.

### IV.3. ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ÉQUATION SEMI-THÉORIQUE

#### IV.3.1. Coefficient $C_r$ de résistance en fonction de la rugosité relative $\varepsilon/D$

Nous représentons sur la figure 4.2, la variation de l'expression  $f(Y)$  montrée ci-dessous en fonction de  $F_1^2$  pour les quatre rugosités équivalentes :  $\varepsilon(\text{mm}) = 4,30 ; 5,63 ; 7,14$  et  $9,11$ , dans le but de déduire le coefficient  $C_r$  de résistance qui varie en fonction de la rugosité relative  $\varepsilon/D$ ,

$$\frac{8 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2} \frac{\left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]} \left[ \frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{6} - \frac{\sin^3 \theta_1}{6} + \frac{\cos \theta_1}{4} \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]$$



**Figure 4.2:** Illustration de  $f(Y)$  et de  $F_1^2$ , pour quatre rugosités testées :

$\varepsilon$  (mm) = (\*) 9,11 ; (x) 7,14 ; ( $\Delta$ ) 5,63 et ( $\square$ ) 4,3.

Cette figure indique quatre allures distinctes, chacune correspond une valeur fixée de la rugosité relative  $\varepsilon/D$ .

L'analyse des mesures expérimentales obtenues, montre que chacune peut s'ajuster avec une relation de la forme :

$$\frac{8 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2} \left[ \left( \frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right] = dF_1^2$$

$$\left[ \frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{6} - \frac{\sin^3 \theta_1}{6} + \frac{\cos \theta_1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]$$

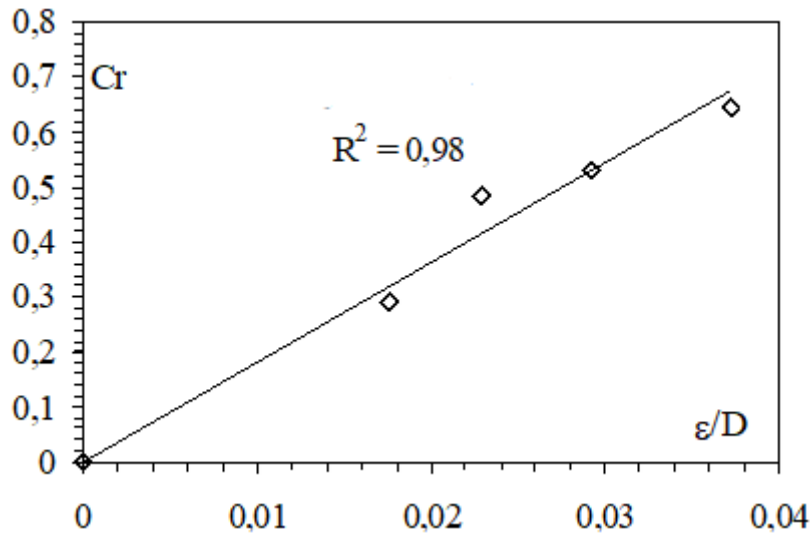
En faisant comparer avec l'expression obtenue (4.8), on déduit que le terme 'd' représente le facteur (1-C<sub>r</sub>).

Récapitulation des valeurs des coefficients C<sub>r</sub> dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 4.1:** Les valeurs du coefficient Cr.

$\varepsilon/D$	Coefficient C <sub>r</sub>	R <sup>2</sup>
0,0175	0,29	0,98
0,0229	0,48	0,98
0,0291	0,53	0,96
0,0371	0,65	0,98

A partir du tableau 4.1 on constate que le coefficient C<sub>r</sub> s'accroît avec l'accroissement de la rugosité relative  $\varepsilon/D$ . L'ajustement statistique des couples des valeurs ( $\varepsilon/D, Cr$ ) donne une relation linéaire suivante :  $Cr = 18,14(\varepsilon/D)$ .



**Figure 4.3:** Variation du coefficient Cr en fonction de la rugosité relative  $\varepsilon/D$ .

En injectant le coefficient (1-C<sub>r</sub>) par son expression dans la relation ci-dessous :

$$\frac{8 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2} \frac{\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2}\right)}{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2}\right) - \frac{1}{4}(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)\right]} \left[ \frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{6} - \frac{\sin^3 \theta_1}{6} + \frac{\cos \theta_1}{4} \frac{1}{4}(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right] = (1 - Cr) F_1^2$$

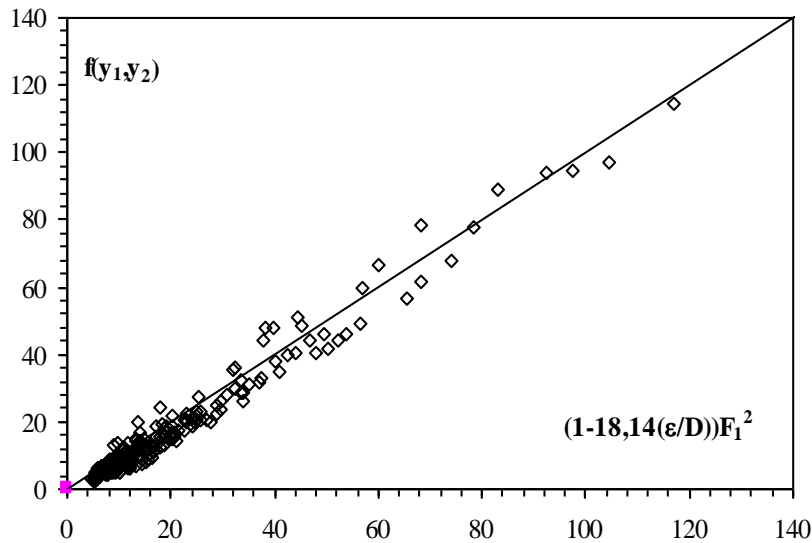
L'équation (4.8) ci-dessus peut s'écrire alors :

$$(1 - 18,14(\varepsilon/D)). F_1^2 =$$

$$\frac{8 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2} \frac{\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2}\right)}{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2}\right) - \frac{1}{4}(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)\right]} \left[ \frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{6} - \frac{\sin^3 \theta_1}{6} + \frac{\cos \theta_1}{4} \frac{1}{4}(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right] \quad (4.9)$$

Avec :  $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$

La relation  $f(y_1, y_2) = \xi(\varepsilon/D, F_1)$  est schématisée dans la figure 4.4 qui montre la bonne corrélation des mesures expérimentales et ces dernières tournent en majorité autour de la première bissectrice, justifiant ainsi la fiabilité de la relation (4.9).



**Figure 4.4:** Schématisation de  $f(y_1, y_2)$  qui varie en fonction de la relation  $(1 - 18,14(\varepsilon/D)) F_1^2$   
 (—) première bissectrice

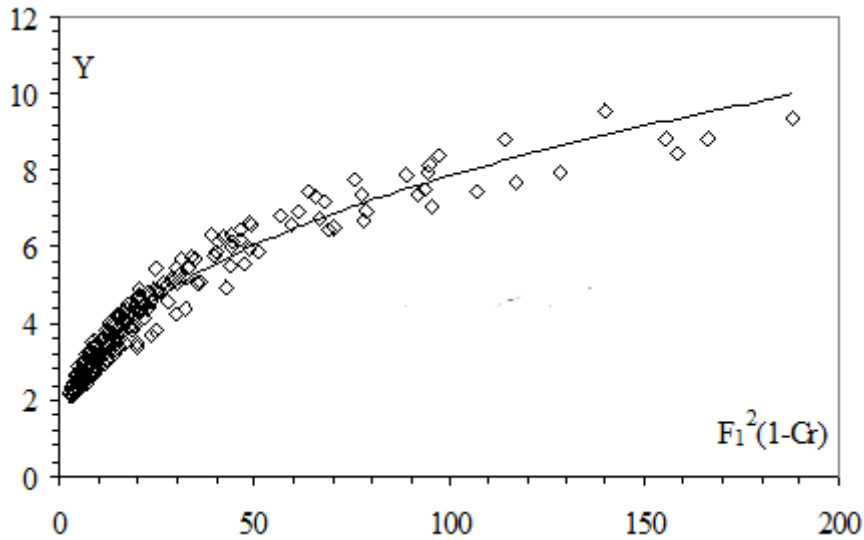
### IV.3.2. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient Cr de résistance et du nombre de Froude F1

L'équation semi-théorique (4.9) étant implicite en  $y_2$ , nous avons trouvé une relation approchée qui permet de trouver aisément le rapport  $Y = h_2/h_1$  en fonction du coefficient  $C_r$  de résistance du fond du canal et du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.

La figure (4.5) montre un nuage de points qui suit parfaitement l'allure d'une courbe unique. L'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés non linéaire donne avec une très bonne corrélation la relation puissance suivante :

$$Y = 1,38F_1^{0,76} \left(1 - 18,14 \frac{\varepsilon}{D}\right)^{0,38} \tag{4.10}$$

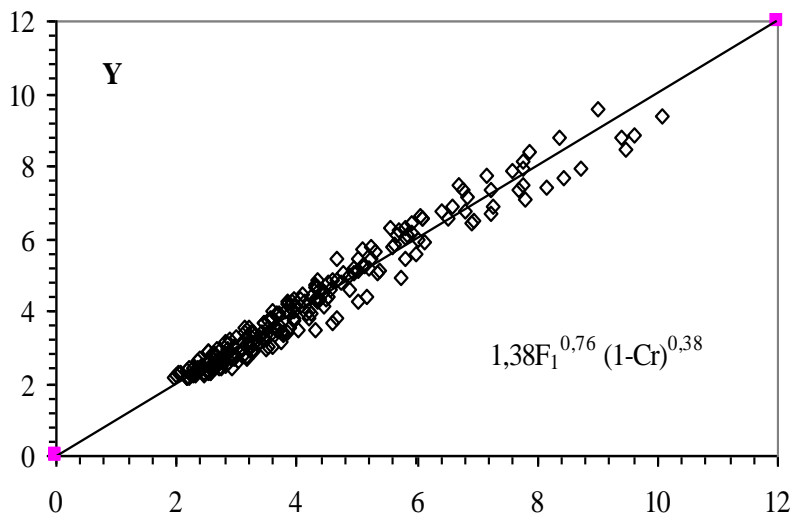
Avec :  $0,0144 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$



**Figure 4.5:** Variation de Y en fonction de  $F^2(1-C_r)$ .

(o) Points expérimentaux.

A partir de cette figure (4.6), On constate que la majorité des points expérimentaux suit exactement la première bissectrice, ce qui justifie la fiabilité de ces mesures et se représentent essentiellement par cette approche adimensionnelle.



**Figure 4.6:** Comparaison des points expérimentaux avec la relation obtenue ( $F_1, \varepsilon/D$ ),

(□) mesures expérimentales, (—) la première bissectrice.



En plus, les écarts relatifs entre les valeurs Y des mesures expérimentales et celles issues de l'équation semi-théorique (4.10) sont indiqués dans le tableau 4.2, dans le but d'examiner la fiabilité de la relation semi-théorique (4.10). On constate clairement que les écarts relatifs sont en majorité inférieur à 5%.

**Tableau 4.2:** L'écart relatif en (%) entre Y expérimentale et Y semi- Théorique.

Y(approche)	Y(exp)	$\Delta Y/Y$	Y(approche)	Y(exp)	$\Delta Y/Y$
3,94	4,02	-2,02	6,14	5,88	4,20
4,53	4,41	2,68	2,45	2,31	5,66
4,79	5,07	-5,78	2,55	2,42	4,85
3,72	3,49	6,19	2,58	2,45	4,89
4,30	4,34	-0,78	2,65	2,56	3,32
4,51	4,81	-6,56	2,69	2,60	3,36
4,60	4,87	-5,88	2,82	2,79	1,27
5,58	5,75	-2,96	2,84	2,83	0,47
2,32	2,22	4,06	2,95	3,02	-2,28
2,41	2,41	-0,22	3,09	3,15	-2,21
2,79	2,76	1,18	3,17	3,27	-3,08
3,27	3,09	5,55	3,27	3,44	-5,22
3,36	3,24	3,49	3,46	3,67	-6,10
3,43	3,39	0,94	3,69	3,94	-6,75
3,53	3,72	-5,55	3,09	2,95	4,60
3,59	3,82	-6,35	3,20	3,00	6,29
2,63	2,81	-6,96	3,23	3,16	2,03
3,20	3,37	-5,23	6,90	6,43	6,80
3,24	3,42	-5,61	3,22	3,00	6,75
3,66	3,91	-6,96	3,25	3,03	6,76
3,87	4,12	-6,53	3,34	3,09	7,66
3,96	4,16	-4,90	3,38	3,26	3,29
3,48	3,33	4,10	3,53	3,53	0,07
3,83	4,03	-5,33	3,69	3,59	2,66
4,13	4,25	-2,85	4,15	3,94	5,07
7,78	8,12	-4,36	4,20	4,00	4,67
8,36	8,81	-5,47	4,36	4,32	0,76

**Tableau 4.2(suite) :** L'écart relatif en (%) entre Y expérimentale et Y semi-Théorique.

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

**Tableau 4.2 (suite et fin) :** L'écart relatif en (%) entre Y expérimentale et Y semi- Théorique.

Y(approche)	Y(exp)	$\Delta Y/Y$	Y(approche)	Y(exp)	$\Delta Y/Y$
2,37	2,44	-3,10	2,25	2,23	0,72
2,43	2,46	-1,36	2,27	2,26	0,52
2,62	2,73	-4,24	2,33	2,36	-1,10
2,72	2,90	-6,72	3,12	2,97	4,75
2,84	2,98	-5,14	3,17	3,07	3,16
2,86	3,06	-7,05	3,94	3,74	5,09
2,71	2,54	6,37	3,94	3,83	2,88
2,76	2,61	5,60	4,34	4,26	1,78
2,87	2,70	5,59	4,39	4,35	0,96
2,93	2,79	4,96	4,75	4,78	-0,68
3,12	2,97	4,75	4,95	5,04	-1,84
3,17	3,07	3,16	5,13	5,26	-2,61

#### IV.4. L'ETUDE EXPERIMENTALE

Cette étude a pour objectif essentiel de tester l'effet de la rugosité imposé au fond du canal, sur les caractéristiques hydrauliques. Par ailleurs, des relations adimensionnelles qui lient les caractéristiques du ressaut pour les rugosités équivalentes imposées au lit du canal ( $\varepsilon = 3,55\text{mm}$  ;  $\varepsilon = 4,3\text{mm}$ ;  $\varepsilon = 5,63\text{mm}$  ;  $\varepsilon = 7,14\text{mm}$  et  $\varepsilon = 9,11\text{mm}$ ) seront présentées.

##### IV.4.1. Protocol expérimental

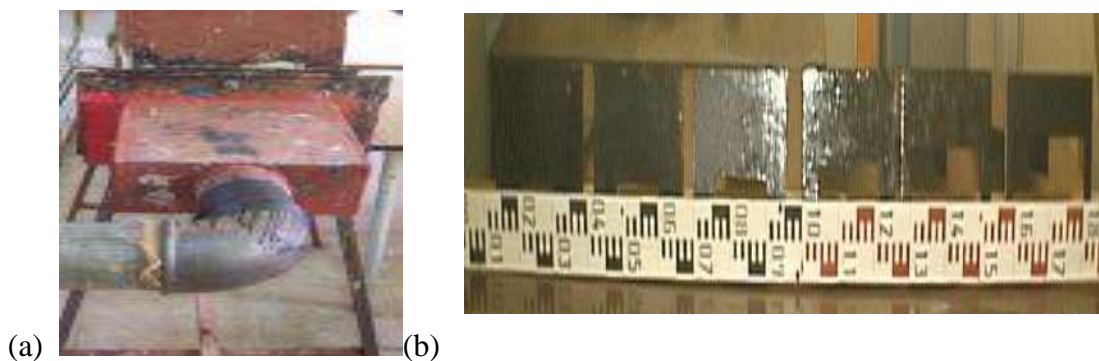
Le Protocol expérimental utilisé à l'expérimentation (Fig 4.7) est formé fondamentalement par une rigole demi-circulaire en 'pvc' de 5,67 m de longueur. Et il est surmonté aussi d'un côté une tôle de 0,50 m de hauteur et de l'autre côté une série de 7 panneaux transparents permettant les prises de vues et observations. Ces panneaux sont reliés entre eux par collage au chloroforme. Le tout est fixé par boulonnage à une structure métallique rigide.

L'étanchéité du canal est réalisée par silicone et des joints en caoutchouc.



**Figure 4.7:** Canal d'expérimentation.

Le canal utilisé à l'expérimentation est de pente horizontale. Le bassin d'alimentation en eau lie le canal d'essai par une conduite de section circulaire de diamètre 110 mm. Celle dernière est raccordée à la boîte sous pression (Figure 4.8a), dans laquelle une ouverture a été insérée de paroi plane (Figure 4.8b) en tôle de largeur fixée qui débouche dans le canal (Figure 4.10).



**Figure 4.8:** (a) boîte sous pression (b) gamme des ouvertures

Cette ouverture joue le rôle de créer un écoulement torrentiel. Cette section de sortie possède des hauteurs qui correspondent à la hauteur initiale  $h_1$  du ressaut.

Le débit spécifique s'effectue par manipulation d'une vanne et se mesure à l'aide d'un débitmètre numérique. L'alimentation du banc s'effectue par une pompe (Figure 4.9 (c)) donnant un débit allant vers 44 l/s.



Figure 4.9(c) : Pompe

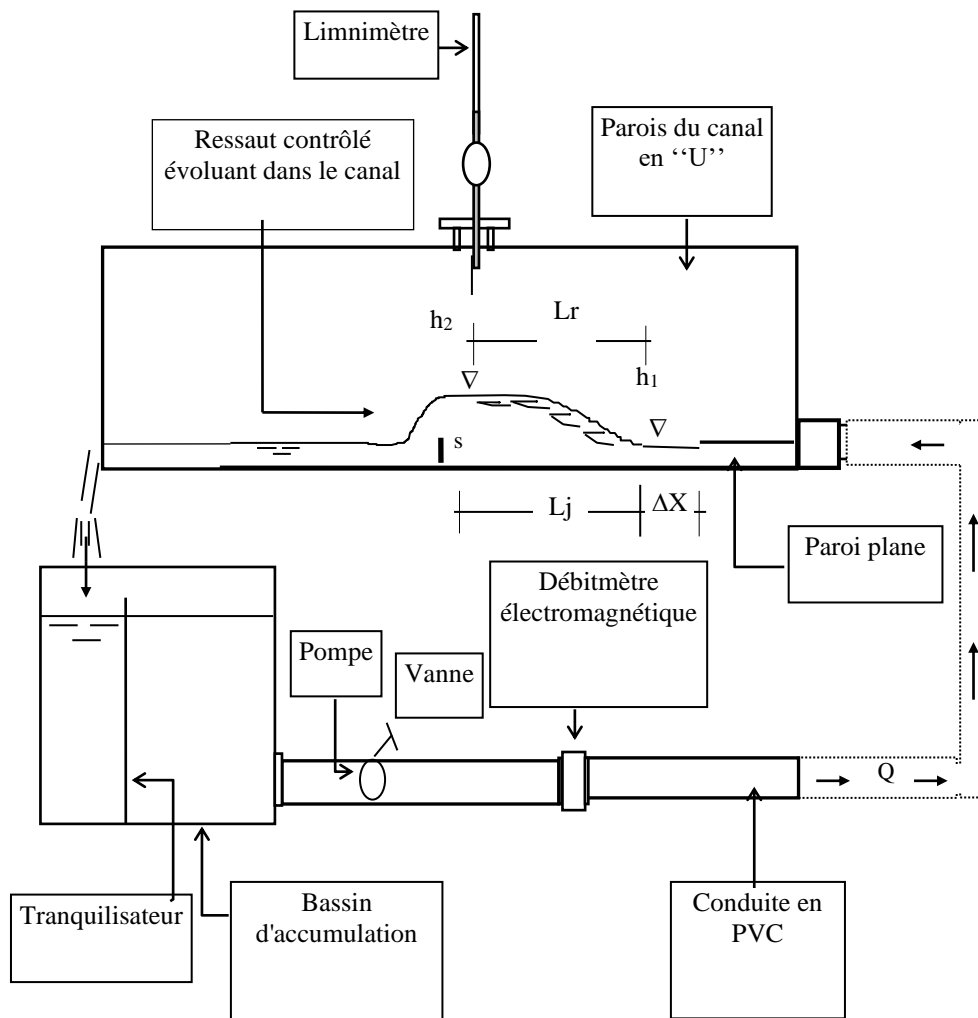


Figure 4.10: Schématisation de l'installation servant à l'expérimentation.

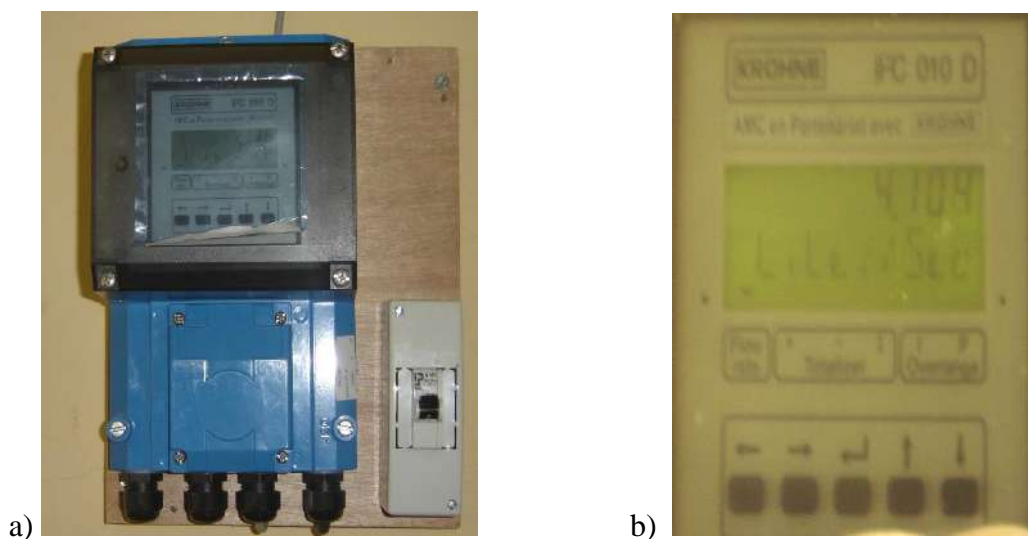
## IV.4.2. Instrumentation de mesure

### IV.4.2.1. Le Débitmètre

Le débitmètre électromagnétique est un instrument qui sert à la mesure des débits. Il se compose par un capteur de mesures (Figure 4.11) mis au travers de l'écoulement, ajusté par un câble électrique à un convertisseur de mesures à affichage digital (Figure 4.12). Selon le diamètre de la conduite, cet appareil accepte un débit minimal et un débit maximal. Pour notre cas le capteur de mesures présente un diamètre nominale  $D = 110\text{mm}$ , pour cela le débit spécifique est cerné dans l'intervalle :  $2 \text{ l/s} \leq Q \leq 44 \text{ l/s}$ .



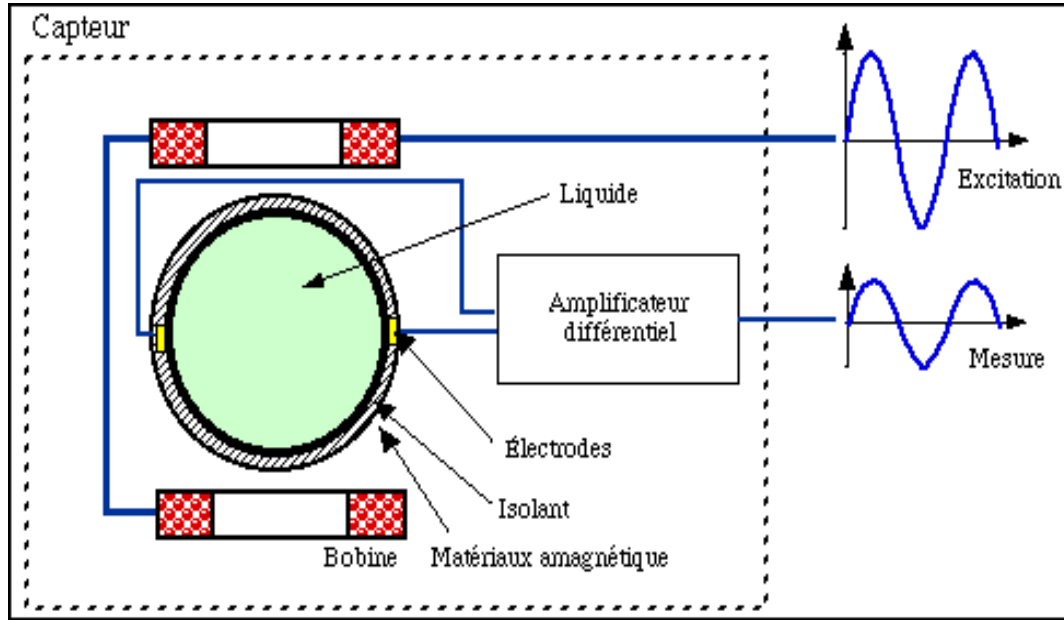
**Figure 4.11:** Capteur de mesures des débits.



**Figure 4.12:** a) Convertisseur de mesures des débits  
b) l'écran d'affichage des débits.

Le principe de fonctionnement de cet appareil est fondé sur la loi d'induction de *Faraday*.

Le liquide qui traverse le débitmètre constitue un élément conducteur qui génère une tension induite par le champ magnétique créé par les bobines d'induction de cet appareil électromagnétique (Figure 4.13). Cette tension est linéairement proportionnelle à la vitesse de passage du liquide.



**Figure 4.13:** Capteur des débits.

L'induction magnétique, se produit par deux bobines placées au niveau de la conduite de mesure. Deux électrodes de mesure sont placées aux extrémités du diamètre perpendiculaire au champ. Les bobines sont alimentées par une tension alternative, afin d'éviter une polarisation des électrodes.

**IV.4.2.2. Limnimétrie**

Les profondeurs d'eau dans la canalisation d'essai de mesure ont été estimées par un l'appareil Limnimétrique (Figure 4.14). Il est formé par règle graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe Limnimétrique dont le rôle est d'effleurer la surface libre de l'eau. Le Limnimètre permet la lecture en deux étapes : en premier lieu, une lecture de la graduation sur la règle, située en haut du zéro du vernier, en second lieu une lecture du nombre de cinquantième en face de la division qui coïncide à la division de la règle.



Figure 4.14: Limnimètre



Figure 4.15: Gamme de tamis



Figure 4.16: Palmer numérique

#### IV.4.2.3. Tamiseuse

Nous avons procédé au tamisage du sable de concassage au moyen d'une tamiseuse (Figure 4.15) dans le but d'obtenir les cinq rugosités équivalentes : 3,55 mm ; 4,30 mm ; 5,63 mm ; 7,14 mm et 9,11mm,

#### IV.4.2.4. Palmer

Nous avons utilisé un Palmer à affichage digital (Figure 4.16) dans le but de mesurer la hauteur des aspérités des particules de sable près-tamisées, étalées et collées,

### IV.4.3. Aperçu des essais

#### IV.4.3.1. Procédure des essais

Cette étude fondamentale s'est consacrée au ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant en canal de section en "U", avec lit demi-circulaire rugueux. (Figure 4.19).

L'expérimentation a été faite avec quatre hauteurs initiales ( $h_1$  (cm)) = 2,3 ; 3,40 ; 5,20 ; 6,10). Une gamme de Froude a été obtenue ( $2 < F_1 < 20$ ). Des seuils de différentes hauteurs ont été examinés (Figure 4.17), dans le but de voir leur influence sur le contrôle du ressaut ; treize seuils ont par conséquent été réalisés, dont la hauteur « s » varie entre 3,2 cm et 13,5 cm.

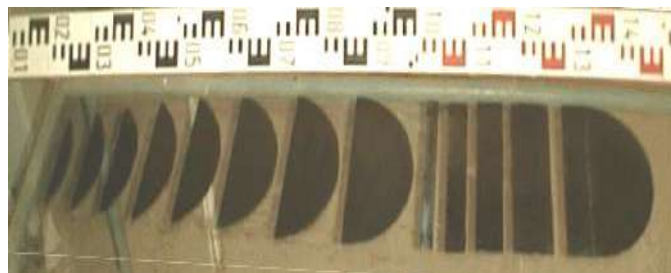


Figure 4.17: Série de seuils minces servant au contrôle du ressaut.



Pour une hauteur du seuil fixée et une position  $x$  du seuil et pour une hauteur  $h_1$  de l'ouverture, l'accroissement du débit spécifique  $Q$ , engendre la création du ressaut. Le couple de valeur  $(Q, h_1)$  permet de calculer le nombre de Froude  $F_1$ . L'augmentation de  $F_1$  provoque à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'accroissement de sa longueur de ressaut  $L_j$ . Par conséquent pour chaque valeur du nombre de Froude  $F_1$  correspond une valeur de la longueur  $L_j$  du ressaut et une valeur de la hauteur «  $s$  » du seuil.

Une série de quarantaine de points expérimentaux, pour chaque caractéristique, a permis d'aboutir à des résultats importants. Ces paramètres sont : la hauteur  $h_1$ , la hauteur  $h_2$ , la hauteur «  $s$  » du seuil, la longueur  $L_r$ , la longueur  $L_j$  du ressaut, compté à partir du début du ressaut et le débit  $Q$ . Ceux-ci permettent de composer les produits adimensionnels suivants :

- Le débit relatif  $q$  ou le nombre de Froude incident  $F_1$ ,

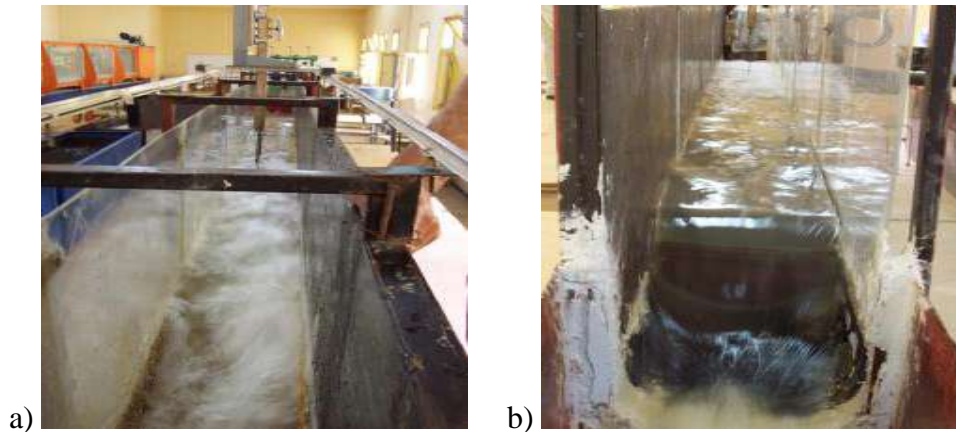
$$F_1 = \sqrt{\frac{Q^2 D \sin \alpha}{g \left[ \frac{D^2}{4} (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) \right]^3}}$$

$$F_1 = \frac{8q \sqrt{\sin \alpha}}{(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)^{3/2}}$$

$$\alpha(rd) = \arccos(1 - 2y_1)$$

$$q = \frac{Q}{\sqrt{gD^5}}$$

- La hauteur relative amont  $y_1 = h_1/D$ ,
- La hauteur relative aval  $y_2 = h_2/D$ ,
- Le rapport  $y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées du ressaut.
- La hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil,
- La longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut,
- La longueur relative  $L_j/h_2$  du ressaut.
- La rugosité relative  $\varepsilon/D$  du fond du canal.



**Figure 4.18:** Ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en "U" à fond rugueux.

a) Vue de l'amont du ressaut. b) Vue de l'aval du ressaut

#### IV.4.3.2. Procédure de préparation de la rugosité

Nous avons suivi les étapes suivantes, dans le but d'avoir un fond rugueux :

- un tamisage du gravier de granulométrie différente est exécuté par un appareil électrique composé par des tamis de différents diamètres normalisés qui varient entre 3 et 12,5 mm (Figure 4.20), pour un temps de tamisage fixés et lié avec la gamme de gravier à tamiser.

- La gamme sera lavée et séchée après l'obtention de la gamme de gravier voulue.

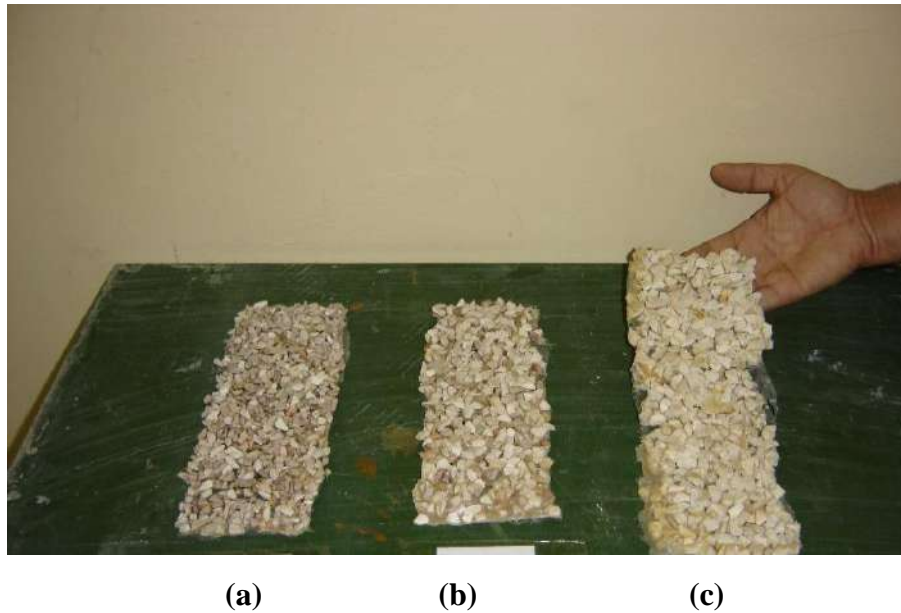
- La gamme choisie, varie entre 3 et 12,5 mm selon le refus du tamis normalisé. Cette gamme de gravier obtenue est uniformément répartie sur une toile en plastique, puis collée par une colle forte (Becta 10000).

Une fois les tapis rugueux préparés, l'estimation de leurs rugosités absolues sera faite mesurés par un appareil de mesure dit : "PALMER NUMERIQUE ", de précision 1/1000.

- Enfin, les rugosités absolues obtenues sont :  $\varepsilon = 3,55\text{mm}$  ;  $\varepsilon = 4,3\text{mm}$  ;  $\varepsilon = 5,63\text{mm}$  ;  $\varepsilon = 7,14\text{mm}$  et  $\varepsilon = 9,11\text{mm}$ .



**Figure 4.19:** Fond rugueux du canal.



(a) (b) (c)

Figure 4.20: Tapis rugueux :

a)  $\epsilon = 5,63$  mm; b)  $\epsilon = 7,14$  mm; c)  $\epsilon = 9,11$  mm.

IV.4.4.1. La variation de  $L_j/h_1$  en fonction du  $F_1$

La Figure ci-dessous indique la représentation de la variation de  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour quatre valeurs de rugosités équivalente  $\epsilon = 4,30$  mm ;  $\epsilon = 5,63$  mm ;  $\epsilon = 7,14$  mm et  $\epsilon = 9,11$  mm. On constate quatre allures de points distincts, pour chacune dépend d'une rugosité fixée. En outre, l'analyse des points expérimentaux, montre que pour chaque rugosité " $\epsilon$ " correspond une courbe de type linéaire de la forme  $\frac{L_j}{h_1} = a_1(F_1)$ .

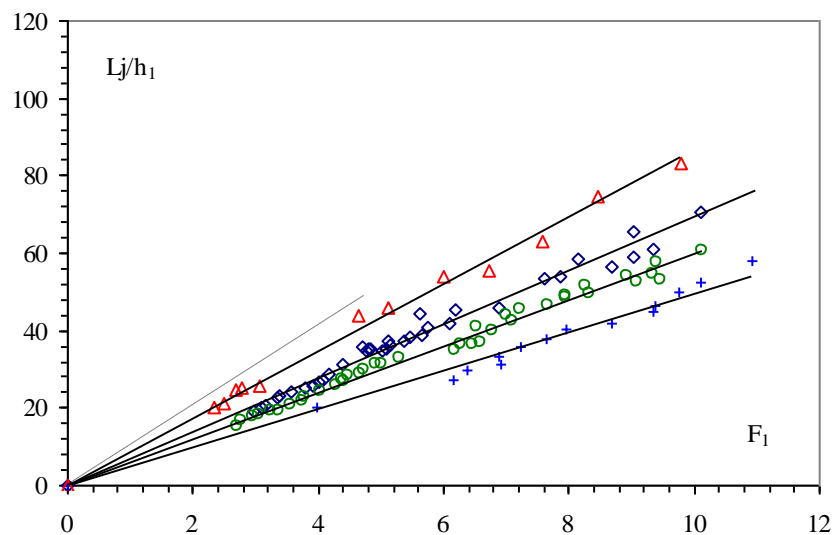


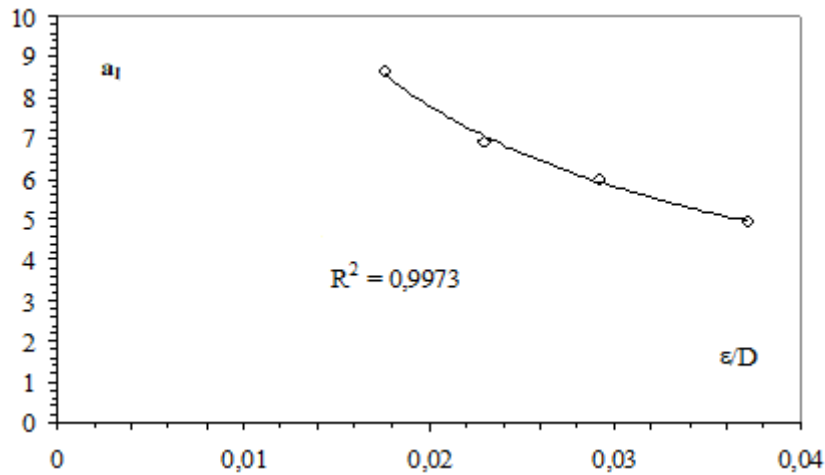
Figure 4.21: Représentation du ressaut évolué en canal de forme en "U" avec lit rugueux. Quatre rugosités différentes «  $\epsilon$  » : ( $\Delta$ ) 4,30mm ; (o) 5,63mm ; ( $\square$ ) 7,14mm et ( $\times$ ) 9,11mm. (---) courbe du ressaut lisse selon Debabeche (2003). (—) Courbes d'ajustements.

Cette figure montre la variation de la longueur relative  $Lj/h_1$  qui s'accroît avec le nombre de Froude  $F_1$  et ceci pour les rugosités testées. Par ailleurs, pour un nombre de Froude fixé, la longueur relative  $Lj/h_1$  diminue avec l'accroissement de la rugosité, ce qui montre l'effet de la rugosité pour la dissipation d'énergie.

Récapitulation des valeurs du coefficient  $a_1$  dans le tableau 4.3.

**Tableau 4.3:** Valeurs  $a_1$  issues des courbes d'ajustements.

$\varepsilon/D$	Coefficients $a_1$	$R^2$
0,0176	8,66	0,99
0,0229	6,93	0,98
0,0291	5,98	0,99
0,0371	4,96	0,98



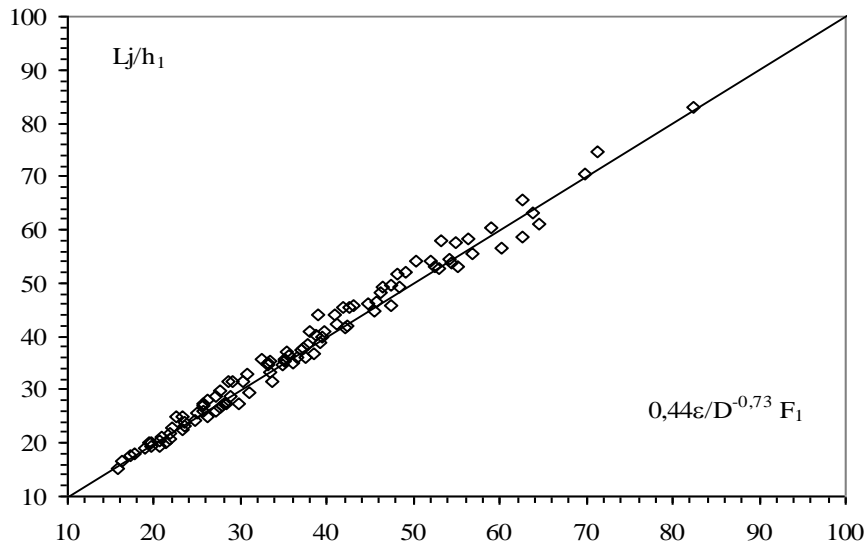
**Figure 4.22:** Représentation «  $a_1$  » en fonction de  $\varepsilon/D$

L'ajustement des couples de valeurs ( $a_1, \varepsilon/D$ ) donne une relation de type puissance suivante :  $a_1 = 0,44\varepsilon/D^{-0,73}$ . Cette équation est illustrée dans la figure ci-dessus. L'équation liant la longueur relative amont  $\frac{Lj}{h_1}$ , le nombre de Froude  $F_1$  et la rugosité relative  $\varepsilon/D$  est la suivante :

$$\frac{Lj}{h_1} = 0,44 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{-0,73} F_1 \quad (4.11)$$

Avec  $0,0175 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$

La Figure ci-dessous indique également que la relation  $Lj/h_1 = f(\varepsilon/D, F_1)$  ajuste avec une corrélation bonne de la majorité des mesures expérimentales et ces dernières suivent la première bissectrice.



**Figure 4.23:** Représentation de la longueur relative  $L_j/h_1$  en fonction de  $f(\epsilon/D, F_1)$ .

(□) Les mesures expérimentales du ressaut avec lit fond rugueux.

Par ailleurs, les erreurs relatives entre les mesures expérimentales  $L_j/h_1$  et les mesures issues de l'équation globale d'ajustement (4.11) sont estimées et indiquées au tableau 4.3, en but de montrer la fiabilité de l'équation empirique. Le tableau 4.4, montre clairement que les erreurs relatives sont dans la majorité inférieure à 5%.

**Tableau 4.4:** L'erreur relative entre  $L_j/h_1$  expérimentale et  $L_j/h_1$  d'ajustement

$L_j/h_1$ exp.	$L_j/h_1$ relation.	$\Delta L_j/L_j$ (%)	$L_j/h_1$ exp.	$L_j/h_1$ relation.	$\Delta L_j/L_j$ (%)
45,87	43,13	5,97	35,50	33,47	5,71
54,13	50,38	6,93	35,38	35,08	0,86
55,65	56,72	-1,91	37,47	37,08	1,04
63,04	63,76	-1,13	37,21	35,28	5,18
74,78	71,30	4,66	38,97	39,09	-0,30
83,04	82,35	0,83	40,88	39,69	2,92
25,00	23,36	6,55	41,68	42,09	-1,00
20,25	19,60	3,18	45,41	42,69	5,98
21,23	20,96	1,27	45,88	47,50	-3,54
25,90	25,68	0,86	56,50	60,13	-6,43
27,05	27,74	-2,56	58,76	62,54	-6,42
27,38	28,40	-3,72	61,15	64,54	-5,55
53,26	52,52	1,40	20,19	21,31	-5,56
58,26	56,42	3,16	20,71	21,75	-5,01
65,43	62,50	4,49	22,50	23,23	-3,24
70,43	69,88	0,79	23,08	23,40	-1,41
35,15	33,27	5,33	24,29	24,62	-1,37

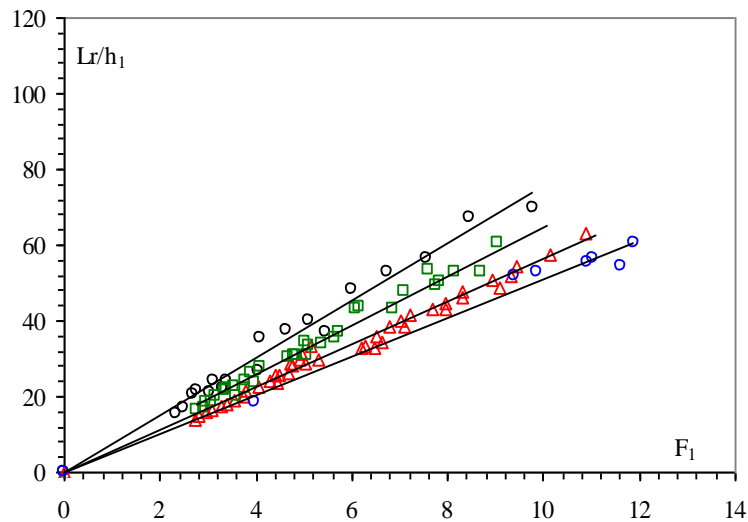
**Tableau 4.4 (suite) :** L'erreur relative entre  $L_j/h_1$  expérimentale et  $L_j/h_1$  d'ajustement

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

#### IV.4.4.2. Variation de la longueur relative du rouleau $L_r/h_1$ de surface en fonction du nombre de Froude $F_1$

La figure (4.24) illustre la variation de  $L_r/h_1$  en fonction de  $F_1$  pour différentes rugosités équivalentes testées :  $\varepsilon = 4,30$  mm ;  $\varepsilon = 5,63$  ;  $\varepsilon = 7,14$  mm et  $\varepsilon = 9,11$  mm. L'analyse des points expérimentaux, montre que pour chacune des rugosités " $\varepsilon$ " testée correspond une

courbe de type linéaire suivante :  $\frac{L_r}{h_1} = a_2(F_1)$ .

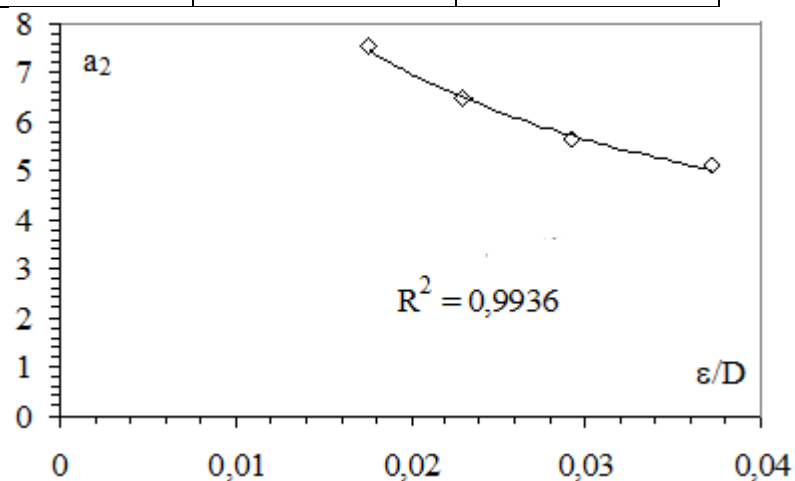


**Figure 4.24:** Représentation de la longueur relative du rouleau de surface  $Lr/h_1$  en fonction de nombre Froude, pour quatre rugosités équivalentes «  $\epsilon$  » : (o) 4,30mm ; (□) 5,63mm ; (Δ) 7,14mm et (◊) 9,11mm.

On constate que la longueur relative du rouleau de surface  $Lr/h_1$  augmente au fur et à mesure que le nombre de Froude augmente et ceci pour toutes les rugosités testées et Pour chaque allure de points. Néanmoins, la longueur relative diminue avec l'accroissement de la rugosité.

**Tableau 4.5:** Coefficients  $a_2$  des courbes d'ajustements.

$\epsilon/D$	Coefficients $a_2$	$R^2$
0,0176	7,52	0,98
0,0229	6,47	0,98
0,0291	5,61	0,98
0,0371	5,09	0,98



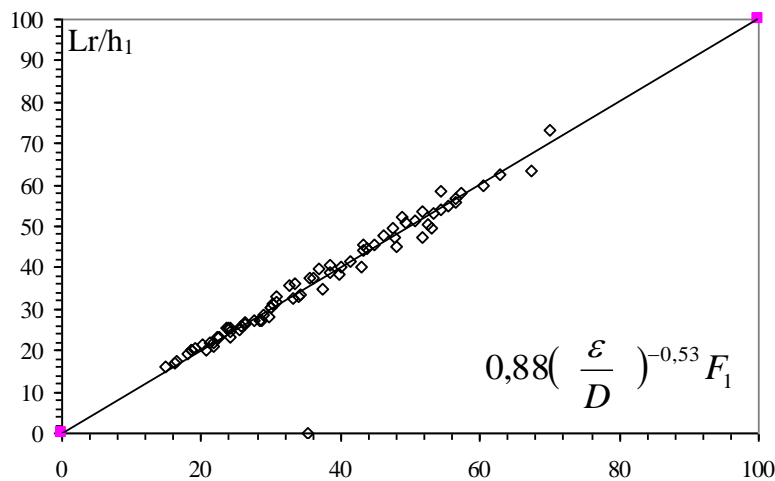
**Figure 4.25:** Variation du coefficient "  $a_2$  " en fonction de la rugosité relative  $\epsilon/D$ .

L'ajustement des couples de valeurs ( $a_2, \varepsilon/D$ ) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type puissance est :  $a_2 = 0,88 \varepsilon/D^{-0,53}$ . Cette relation est indiquée à la Figure (4.25). La relation qui représente la longueur du rouleau de surface variant avec la rugosité relative et le nombre de Froude incident est la suivante :

$$\frac{Lr}{h_1} = 0,88 \frac{\varepsilon}{D}^{-0,53} F_1 \quad (4.12)$$

Pour  $0,0175 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$

La figure (4.26) montre que la relation  $Lr/h_1 = f(\varepsilon/D, F_1)$  ajuste les mesures expérimentales avec une très bonne corrélation. Ces dernières suivent parfaitement la première bissectrice.



**Figure 4.26:** Représentation de la longueur relative  $Lr/h_1$  du rouleau de surface en fonction de  $f(\varepsilon/D, F_1)$ . ( $\square$ ) mesures expérimentales du ressaut contrôlé avec lit rugueux.

D'après cette figure, On peut conclure que les erreurs relatives entre les mesures expérimentales  $Lr/h_1$  avec celles issues de la relation générale (4.12) sont très acceptables et sont indiqués au tableau 4.6. Ainsi, cette approche empirique est très fiable.

**Tableau 4.6:** Erreurs relatives entre  $Lr/h_1$  expérimentale et  $Lr/h_1$  relation générale.

$Lr/h_1$ exp.	$Lr/h_1$ relation	$\Delta Lr/Lr$ (%)	$Lr/h_1$ exp.	$Lr/h_1$ relation	$\Delta Lr/Lr$
39,78	38,43	3,40	43,03	40,15	6,70
48,04	44,89	6,56	43,74	44,67	-2,14
52,61	50,54	3,94	49,35	51,08	-3,50
56,52	56,81	-0,51	21,63	22,01	-1,72
67,39	63,53	5,73	22,25	23,15	-4,06
70,00	73,38	-4,83	24,00	25,44	-6,01



**Tableau 4.6 (suite et fin) :** Erreurs relatives entre  $L_r/h_1$  expérimentale et  $L_r/h_1$  de la relation d'ajustement.

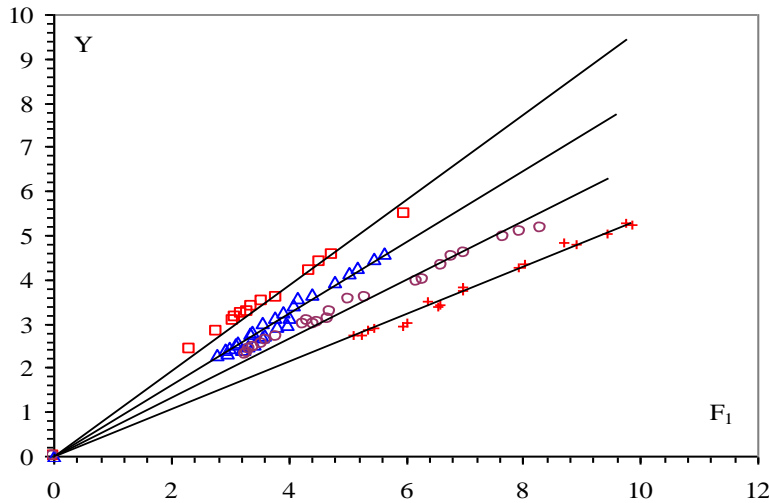
$L_r/h_1$ exp.	$L_r/h_1$ relation	$\Delta L_r/L_r$ (%)	$L_r/h_1$ exp.	$L_r/h_1$ relation	$\Delta L_r/L_r$ (%)
21,73	20,82	4,21	26,15	26,51	-1,35
24,23	23,28	3,93	27,50	27,08	1,53
20,74	20,17	2,72	33,21	32,72	1,47
24,10	25,30	-4,99	34,12	33,54	1,68
47,61	49,38	-3,73	36,00	37,42	-3,95
53,39	53,06	0,63	38,48	40,66	-5,68
30,00	30,54	-1,78	41,30	41,38	-0,19
30,29	31,29	-3,29	43,17	45,70	-5,85
30,74	31,48	-2,42	47,74	47,50	0,50
33,82	33,17	1,92	48,91	52,18	-6,67
35,44	37,32	-5,30	25,65	25,76	-0,44

$L_r/h_1$ exp.	$L_r/h_1$ relation	$\Delta L_r/L_r$ (%)
26,18	26,76	-2,21
28,53	27,09	5,05
28,82	28,75	0,25
30,00	30,41	-1,37
38,53	38,89	-0,93
40,00	40,22	-0,54
43,24	44,04	-1,86
44,71	45,54	-1,86
46,18	47,70	-3,29
50,59	51,19	-1,18
51,76	53,51	-3,38
54,41	54,01	0,74
57,21	58,17	-1,68
62,94	62,32	0,99
16,06	17,00	-5,85
16,56	17,56	-6,07
20,19	21,53	-6,62
21,35	21,74	-1,85
22,58	23,23	-2,89
24,15	24,57	-1,74
25,58	25,21	1,43
28,46	27,19	4,45
29,71	28,26	4,90
53,04	49,65	6,40
55,43	55,03	0,74
56,52	55,66	1,53
60,44	59,88	0,92

**IV.4.4.3. Le rapport de Y en fonction du nombre de Froude  $F_1$**

La représentation de la variation de Y en fonction du nombre de Froude  $F_1$  incident est montrée par la figure (4.27), pour quatre valeurs de rugosités absolues :  $\varepsilon = 4,3 \text{ mm}$  ;  $\varepsilon = 5,63$  ;  $\varepsilon = 7,14 \text{ mm}$ , et  $\varepsilon = 9,11 \text{ mm}$ .

Quatre allures de points distincts, qui correspond chacune à une rugosité fixée. Par ailleurs, l'analyse des mesures expérimentales montre que pour chaque rugosité " $\varepsilon$ ", correspond une courbe linéaire de la forme suivante :  $Y = a_3 F_1$



**Figure 4.27:** Ressaut formé en canal de section en “U” avec lit rugueux. Quatre rugosités différentes de " $\varepsilon$ " : ( $\square$ ) 4,3mm ; ( $\Delta$ ) 5,63mm ; (o) 7,14mm et ( $\times$ ) 9,11mm. (—) Courbes d'ajustements.

Récapitulation les valeurs du coefficient  $a_3$  dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 4.7:** Coefficient  $a_3$  des courbes d'ajustement

$\varepsilon / D$	Coefficient $a_3$	$R^2$
0,0175	0,97	0,99
0,0229	0,81	0,98
0,0291	0,66	0,98
0,0371	0,53	0,99

L'ajustement des couples de valeurs ( $a_3, \varepsilon/D$ ) du tableau ci-dessus, donne la relation linéaire suivante :  $a_3 = -22.31 \varepsilon / D + 1.34$  Cette équation est indiquée à la figure (4.28).

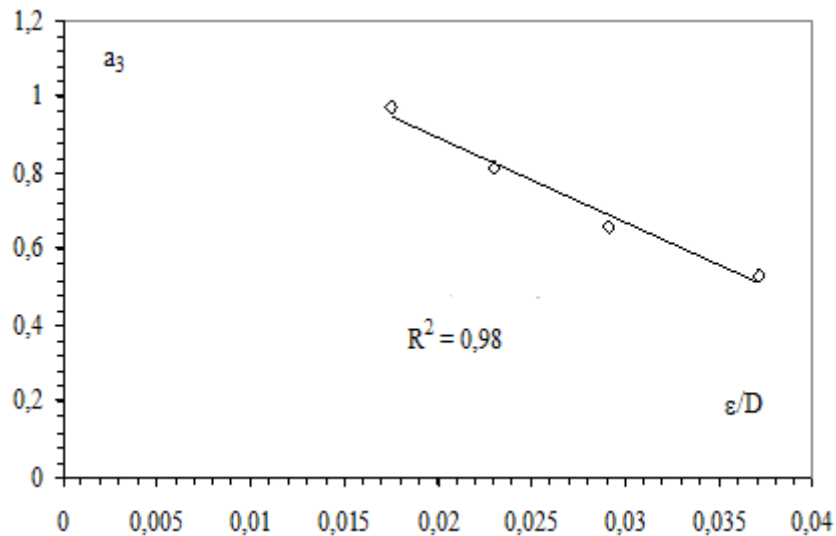


Figure 4.28: Variation du coefficient "a<sub>3</sub>" en fonction de la rugosité "ε/D".

En injectant l'expression a<sub>3</sub> dans la relation :  $Y = a_3 F_1$ , l'équation globale en fonction du Froude et de la rugosité relative s'écrit ainsi comme suit :

$$Y = (-22.31 \epsilon/D + 1.34) F_1 \tag{4.13}$$

Pour  $0,0175 \leq \epsilon / D \leq 0,0371$

La relation globale obtenue Y est montrée à la figure 4.29 ainsi, la fiabilité est justifiée par la majorité des mesures expérimentales qui tournent autour de la première bissectrice.

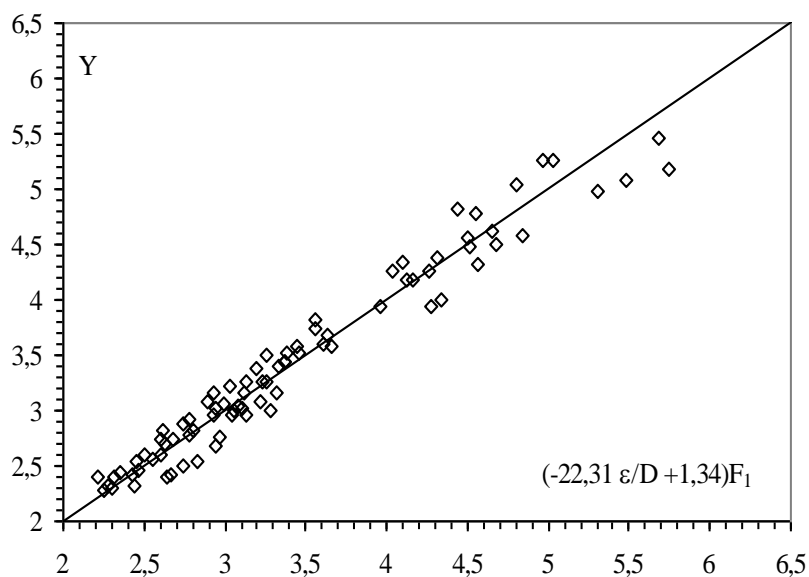


Figure 4.29: Variation du rapport Y du ressaut en fonction du nombre Froude F<sub>1</sub> pour quatre valeurs de rugosité relative "ε/D".

(◇) Points expérimentaux .

Par ailleurs, les erreurs relatives entre les mesures  $Y_{Exp}$ , et celles obtenues par la relation globales (4.13) sont calculées et indiquées au tableau (4.8). Cet écart est inférieur à 5% en totalité, ce qui prouve la fiabilité de la relation (4.13).

**Tableau 4.8:** Ecart entre Y de la relation globale et Y expérimentale

Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)	Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)
5,68	5,47	3,74	3,46	3,53	-2,00
3,03	3,23	-6,53	3,66	3,59	1,97
3,39	3,52	-3,95	4,28	3,94	7,92
2,89	3,08	-6,33	4,34	4,00	7,84
3,13	3,26	-4,19	4,56	4,32	5,19
3,20	3,39	-5,89	4,68	4,50	3,85
3,61	3,60	0,26	4,84	4,59	5,21
4,12	4,18	-1,25	5,30	4,97	6,22
4,32	4,39	-1,65	2,25	2,28	-1,42
4,50	4,55	-1,10	2,28	2,33	-2,19
2,30	2,31	-0,29	2,32	2,41	-4,08
2,43	2,42	0,12	2,35	2,44	-4,09
2,47	2,45	0,57	2,45	2,54	-3,86
2,55	2,56	-0,27	2,50	2,61	-4,15
2,60	2,60	0,26	2,63	2,70	-2,95
2,78	2,79	-0,31	2,93	2,97	-1,16
2,80	2,83	-0,94	3,00	3,07	-2,33
2,95	3,02	-2,47	3,04	2,96	2,88
3,12	3,15	-0,97	3,08	3,04	1,07
3,24	3,27	-0,96	3,33	3,39	-1,76
3,37	3,44	-2,04	3,36	3,43	-2,08
3,45	3,58	-3,79	3,56	3,74	-5,12
3,63	3,67	-1,09	4,04	4,26	-5,53
3,96	3,94	0,36	4,10	4,35	-6,00
4,16	4,17	-0,20	4,55	4,78	-5,10
4,27	4,27	-0,01	4,81	5,04	-4,92
4,51	4,48	0,61	5,03	5,26	-4,57
4,65	4,62	0,83	2,60	2,74	-5,01
2,44	2,33	4,58	2,68	2,74	-2,11
3,13	2,95	5,82	2,74	2,88	-5,27
3,28	3,00	8,48	2,78	2,91	-4,65
			4,97	5,26	-5,87

**IV.4.4.4. Le rendement du ressaut hydraulique.**

L'intérêt technique du ressaut hydraulique est créé fondamentalement pour dissiper d'énergie cinétique. L'équation standard de *Bernoulli* entre les deux sections du ressaut formé s'écrit comme suit :

$$H_1 = h_1 + Q^2 / (2.g.A_1^2) = h_2 + Q^2 / (2.g.A_2^2) + \Delta H \tag{4.14}$$

Le rendement est défini par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \quad (4.15)$$

Avec :

$H_1$  : La charge amont,  $H_2$  : La charge aval, le rendement est cerné entre 0 et 1.

- L'aire de la section amont est :  $A_1 = D^2/4(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1)$

- L'aire de la section aval, pour :  $y_2 \leq 0,5$  est :  $A_2 = D^2/4(\theta_2 - \sin\theta_2 \cos\theta_2)$

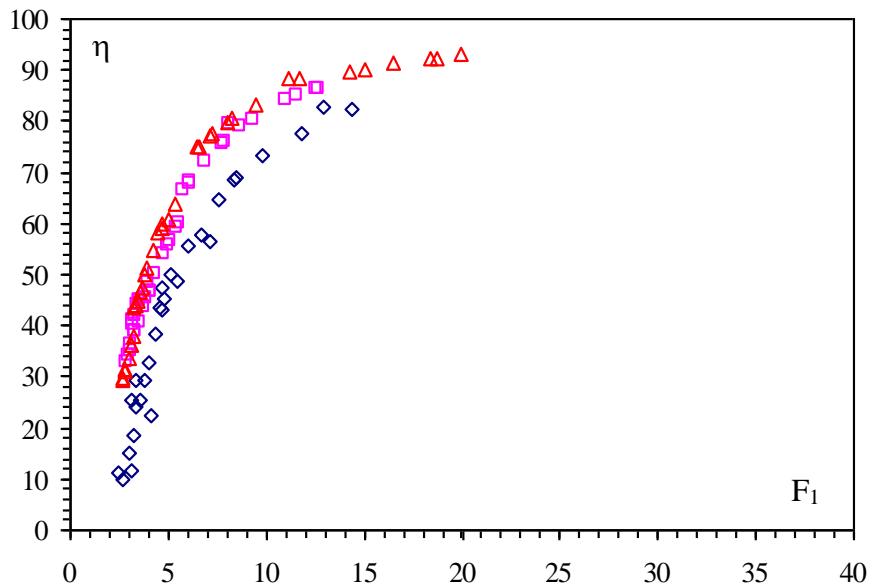
La relation du rendement se formule ainsi comme suit :

$$\eta = \frac{h_1 - h_2 + \frac{8.D.q^2}{[(\theta_1 - \sin(\theta_1) \cdot \cos(\theta_1))^2 - (\theta_2 - \sin(\theta_2) \cdot \cos(\theta_2))^2]}}{h_1 + \frac{8.D.q^2}{[(\theta_1 - \sin(\theta_1) \cdot \cos(\theta_1))^2]}} \quad (4.16)$$

Pour  $y_2 > 0,5 \Rightarrow A_2 = D^2 (\pi/8 + y_2 - 1/2)$  :

$$\eta = \frac{h_1 - h_2 + \frac{D.q^2}{2} \left[ \frac{16}{(\theta_1 - \sin(\theta_1) \cdot \cos(\theta_1))^2} - \frac{1}{(\pi/8 + y_2 - 1/2)^2} \right]}{h_1 + \frac{8.D.q^2}{[(\theta_1 - \sin(\theta_1) \cdot \cos(\theta_1))^2]}} \quad (4.17)$$

La représentation du rendement du ressaut qui varie en fonction du nombre de Froude incident est illustrée par la figure ci-dessous.

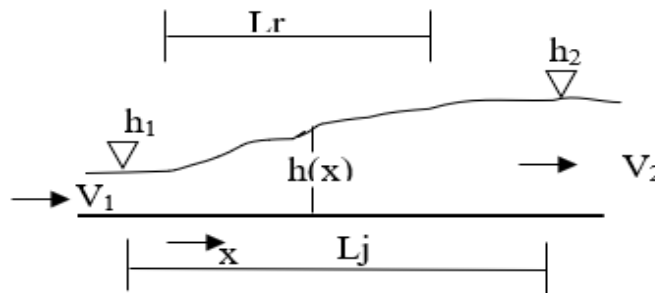


**Figure 4.30:** Représentation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . Les motifs colorés sont les mesures expérimentales pour quatre rugosités relatives  $\varepsilon/D$  : ( $\square$ )= 0,0175 ; ( $\square$ )= 0,0229 et ( $\Delta$ )=0,0291.

On conclure que l'accroissement du rendement engendre l'accroissement aussi du nombre de Froude  $F_1$ , par ailleurs pour un nombre du Froude fixé, le rendement s'accroît avec l'augmentation de la rugosité, par conséquent la dissipation de l'énergie est importante avec l'importance de la rugosité équivalente.

**IV.4.4.5. Profil de surface du ressaut**

L'étude expérimentale du ressaut a permis de définir le profil de la surface du ressaut hydraulique depuis la section amont jusqu'à la section aval.

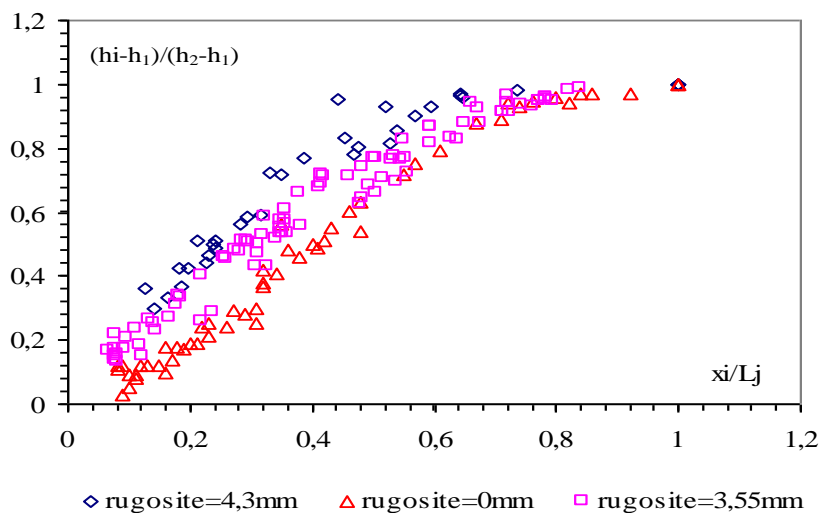


**Figure 4.31:** L'allure de la surface du ressaut hydraulique.

Le schéma ci-dessus (4.31) montre, la coordonnée  $x$  est cernée entre  $0 \leq x \leq L_j$ , tandis que la profondeur  $h(x)$  est cernée entre  $h_1 \leq h(x) \leq h_2$ ;  $h_1$  et  $h_2$  sont les profondeurs conjuguées.

Les paramètres  $x$  et  $h(x)$  servent à composer les variables  $y$  et  $X$ , en notant que  $y = (h(x)-h_1)/(h_2-h_1)$  et  $X=x/L_j$  sont limitées comme suit :  $0 \leq X \leq 1$  et  $0 \leq y \leq 1$ .

Cette figure montre la variation du rapport  $y$  en fonction du rapport  $X$  pour toutes les mesures expérimentales et différentes rugosités testées.



**Figure 4.32:** Profil de la surface du ressaut pour trois rugosités différentes : ( $\diamond$ ) 4,3mm ; ( $\square$ ) 3,55mm et ( $\Delta$ ) 0,00mm.

On constate d 'après cette figure trois allures différentes qui correspondent trois rugosités testées par conséquent, pour un rapport  $x/L_j$  fixé, la valeur  $y$  s'accroît avec l'augmentation de la rugosité testée, ce qui justifie nettement l'influence de la rugosité sur la diminution de la profondeur  $h_2$ .

#### **IV.4.4.6. Exemple d'application**

Exemple de calcul simple concernant les approches expérimentales obtenues, pour le ressaut hydraulique crée dans un canal de forme en "U" avec fond rugueux.

#### **Exemple de calcul**

- un débit spécifique  $Q=110$  l/s, qui passe par le bassin d'amortissement de forme en "U" avec fond rugueux.

-  $h_1=12$  cm la hauteur amont du ressaut.  $D=24,5$ cm et  $\varepsilon/D=0,03$

- Le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement se calcule comme suit :

$$F_1^2 = Q^2 \cdot D \cdot \sin(\theta) / [9.81 \cdot [(D^2/4(\theta_1 - \sin(\theta_1)) \cdot \cos(\theta_1))^3 \text{ soit } F_1 \cong 5$$

- La longueur relative du ressaut est  $L_j/h_1 \cong 28,43$ , ainsi  $L_j=341,2$ cm.
- La longueur relative du rouleau du surface est  $L_r/h_1 \cong 28,20$  donc  $L_r=338,41$ cm.
- Le rapport expérimental  $Y = ((-23,57 \cdot \varepsilon/D + 1,37)) \cdot F_1 \cong 3,35$  ainsi  $h_2 \cong 40,21$ cm.
- Selon la relation semi théorique  $Y=1,38 \cdot F_1^{0,76} (1-18,14 \cdot \varepsilon/D)^{0,38} \cong 3,46$  donc  $h_2=41,73$ cm
- Erreur relative entre  $Y$  théorique et  $Y_{exp}$  est :  $\Delta Y/Y \cong 3,61\%$ .

### **IV.5. CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous avons fait une étude expérimentale et théorique. A dont l'étude semi-théorique on a essayé de trouver une relation approchée explicite en faisant remplacer à la relation semi théorique implicite en  $Y$ . Celle-ci permet de calculer le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient  $C_r$  de résistance du fond du canal en forme "U" et du nombre de Froude  $F_1$  incident de l'écoulement. Finalement, on a pu d'avoir une expression semi théorique  $f(Y, F_1, C_r)$  qui s'écrit sous de la forme  $f(Y, F_1, \varepsilon/D)$ .

Pour la partie fondamentale de notre contribution on a étudié expérimentalement le ressaut hydraulique évoluant dans canal en forme "U" avec lit rugueux. Cinq tapis rugueux ont été confectionnés et testées de rugosité absolue :  $\varepsilon=3,55$ mm ;  $\varepsilon=4,50$ mm ;  $\varepsilon=5,63$ mm ;  $\varepsilon=7,14$ mm et  $\varepsilon=9,11$ mm. Pour chaque rugosité absolue testée, l'expérimentation a été réalisée sous

quatre ouvertures de hauteurs cernées comme suit :  $2,3\text{cm} \leq h_1 \leq 6,1\text{cm}$  avec une gamme de seuils à paroi minces. Une gamme de débit et nombre de Froude a été obtenue.

Les débits spécifiques  $Q$  sont mesurés directement, Dans tous nos essais, par un débitmètre à affichage numérique.

En premier temps, nous avons traité la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction de nombre de Froude  $F_1$  incident pour quatre valeurs de rugosité testée. On a constaté quatre allures de points distinct qui correspond pour chacune à une valeur fixée de la rugosité. En outre, le nombre de Froude s'accroît avec l'accroissement de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut cependant la longueur du ressaut s'abaisse avec l'augmentation de la rugosité imposée. D'autre part, l'analyse statistique des points expérimentaux du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal profilé en "U" avec lit rugueux, montre qu'un ajustement de type puissance entre  $L_j/h_1$  et  $F_1$  est possible.

En second temps, nous avons également étudié les mesures expérimentales des longueurs relatives du rouleau  $L_r/h_1$  de surface qui varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$  incident de l'écoulement, par conséquent cette étude a permis d'avoir une relation de type puissance entre  $L_r/h_1$  et  $F_1$ .

Aussi, nous avons étudié la variation du rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  du ressaut en fonction de nombre de Froude  $F_1$  incident pour quatre valeurs différentes de rugosité :  $\varepsilon = 4,3\text{mm}$  ;  $\varepsilon = 5,63\text{mm}$  ;  $\varepsilon = 7,14\text{mm}$  et  $\varepsilon = 9,11\text{mm}$ . Quatre allures distinctes, correspond chacune à une rugosité fixée. Par ailleurs, le nombre de Froude incident augmente proportionnellement avec le rapport des hauteurs conjuguées mais ce dernier diminue avec l'importance de la rugosité testée.

L'ajustement statistique des points expérimentaux de couple ( $Y$  et  $Fr$ ) du ressaut hydraulique a donné une relation de type linéaire :  $f(Y, Fr, \varepsilon/D)$  justifiée par une très bonne corrélation.

En dernier temps, l'étude expérimentale a traité la dissipation d'énergie cinétique qui s'est représentée par le rendement. Ainsi, la variation du rendement du ressaut hydraulique évolué en canal en U à fond rugueux dissipe mieux l'énergie quand la rugosité sera importante.

En fin de cette étude expérimentale, le profil du ressaut hydraulique a été étudié. Par ailleurs, la variation du rapport adimensionnel vertical  $y$  en fonction du rapport adimensionnel horizontal  $X$  a été analysée pour trois rugosités équivalentes  $\varepsilon = 0,00\text{mm}$  ;  $\varepsilon = 3,55\text{mm}$  et  $\varepsilon = 4,30\text{mm}$ . Cette analyse montre que, pour nombre fixé de  $X$ , la valeur de  $y$  s'accroît avec l'accroissement de la rugosité équivalente ce qui justifie l'effet de la réduction des caractéristiques et la compacité du ressaut hydraulique.



## CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Dans cette première partie, par laquelle nous avons exposé certaines des recherches menées par de nombreux chercheurs dans le domaine des écoulements brusquement variés tel que le ressaut hydraulique, nous avons traité quelques sujets qui sont les plus proches de notre thème d'étude, à travers lesquels nous avons pu construire une idée sur notre sujet de recherche.

A cet effet notre partie bibliographique est subdivisée en quatre chapitres fondamentaux : Pour le premier chapitre d'intitulé le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire, à travers lequel on l'a divisé en trois axes :

- Le ressaut hydraulique classique, concernant les travaux de *Hager (1990)*, par lequel l'auteur a démontré la caractérisation de ce type du ressaut. En premier lieu, une classification de *Peterka et Bradley* a été présentée (*1957*) qui se base essentiellement sur le facteur du nombre de Froude  $F_1$ . L'auteur a noté que l'utilisation de la théorie d'Euler entre les deux sections du ressaut formé, sans frottement, conduit à l'approche de *Bélanger* qui une relation entre le rapport  $Y^*$  des hauteurs conjuguées et le facteur du nombre de Froude  $F_1$ .
- Les travaux de l'auteur « *Rajaratnam en 1968* », effectué dans un canal rectangulaire avec lit rugueux, se basent sur les résultats obtenus des mesures expérimentales, et pour les différents ressauts contrôlés et créés dans le banc d'expérimentation de forme rectangulaire à pente nulle, dans lequel la rugosité imposée relative  $\varepsilon / h_1$  a été conçue entre de 0,02 à 0,43 et le nombre de Froude incident varie entre 3 à 10. Des diverses conclusions sont ainsi retenues. Par conséquent, pour un ressaut qui se forme sur un fond rugueux, le rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  varie fonction du nombre de Froude incident  $F_1$  et de la rugosité relative testées  $\varepsilon / h_1$ .  $h_2^*$  étant comme la hauteur conjuguée aval du ressaut correspondant au ressaut hydraulique créée sur un lit lisse alors que  $h_2/h_2^*$  varie seulement avec la rugosité relative testée. Il a été déduit que la longueur du ressaut hydraulique avec fond rugueux est égale approximativement à la moitié que son homologue à fond lisse, pour des diverses rugosités relatives dépassant 0.10, cela apparaît un avantage très significatif du ressaut hydraulique avec lit rugueux.
- Les travaux du « *Rajaratnam 2002* » réalisés dans un banc d'expérimentation à fond ondulé. Ils ont noté également de bonnes performances vis-à-vis de la réduction de la profondeur aval du ressaut.

Pour le deuxième chapitre de la partie bibliographique nous avons exposé les travaux suivants

- En premier lieu les travaux de *Khattoui et Achour en 2012* liés avec le ressaut hydraulique formé en canal rectangulaire de forme composée. Une relation fonctionnelle est de forme  $\phi (Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$  sans tenir compte des forces de frottements a été démontrée. 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.
- En second lieu, 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.

L'étude s'est intéressée ensuite à la variation du rapport  $Y$  qui varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour différentes ouvertures pour les deux lits du canal rectangulaire de forme composée. Il a été remarqué que ce rapport  $Y$  s'accroît avec l'augmentation du nombre de Froude  $F_1$  et que pour un nombre de Froude fixé  $F_1$ ,  $Y$  est plus important en lit majeur. Ils ont aussi noté que pour une série des nombres de Froude et pour différentes ouvertures testées  $h_1$ , le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée, présente deux relations expérimentales globales adimensionnelles telles que  $Y = f(F_1)$  par lesquelles on dimensionnerait les ouvrages hydrauliques.

En dernier lieu, L'étude expérimentale s'est consacrée à l'estimation des longueurs qui caractérisent le ressaut hydraulique. Pour chaque lit du canal, Il a été prouvé qu'une relation de type linéaire est obtenue. Finalement, les auteurs on conclure que le ressaut hydraulique qui s'évolue dans le canal rectangulaire de forme composée a pour effet réducteur à leurs caractéristiques.

Pour le troisième chapitre concernant les travaux réalisés par *M. Debabeche, S. Kateb, A. Ghomri (2006)* dans un canal triangulaire à parois rugueuses ils ont noté, 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 a été remarquée.

En premier temps, l'étude s'est entamée par la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  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, que 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  $L_j/h_1$  par une approche expérimentale adimensionnelle obtenue (3.3). 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. Ils ont 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 (3.8)], déduite par l'analyse statistique des mesures expérimentales.

Dans le dernier chapitre nous avons présenté l'étude expérimentale et théorique du ressaut hydraulique évoluent en un canal de section en "U", cette étude expérimentale du ressaut a permis d'obtenir quelques résultats importants :

A propos l'étude semi- théorique de *ALI Ghomri en 2012* qui a démontré une relation approchée explicite en faisant remplacer à la relation semi théorique implicite en  $Y$ . Celle-ci permet de calculer le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient  $C_r$  de résistance du fond du canal en forme "U" et du nombre de Froude  $F_1$  incident de l'écoulement. Finalement, il a pu d'avoir une expression semi théorique  $f(Y, F_1, C_r)$  qui s'écrit sous de la forme  $f(Y, F_1, \varepsilon/D)$ .

Pour la partie fondamentale, l'auteur a étudié expérimentalement le ressaut hydraulique évoluant dans canal en forme "U" avec lit rugueux. Cinq tapis rugueux ont été confectionnés et testées de rugosité absolue :  $\varepsilon=3,55\text{mm}$  ;  $\varepsilon=4,50\text{mm}$  ;  $\varepsilon=5,63\text{mm}$  ;  $\varepsilon=7,14\text{mm}$  et  $\varepsilon=9,11\text{mm}$ . Pour chaque rugosité absolue testée, l'expérimentation a été réalisée sous quatre ouvertures de hauteurs cernées comme suit :  $2,3\text{cm} \leq h_1 \leq 6,1\text{cm}$  avec une gamme de seuils à paroi minces. Une gamme de débit et nombre de Froude a été obtenue.

Les débits spécifiques  $Q$  sont mesurés directement, pour tous les essais, par un débitmètre à affichage numérique.

En premier temps, un traitement a été fait concernant la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction de nombre de Froude  $F_1$  incident pour quatre valeurs de rugosité testée. Il a été constaté quatre allures de points distinct qui correspond pour chacune à une valeur fixée de la rugosité. Par ailleurs, le nombre de Froude s'accroît avec l'accroissement de la

longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut cependant la longueur du ressaut s'abaisse avec l'augmentation de la rugosité imposée.

D'autre part, l'analyse statistique des points expérimentaux du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal profilé en "U" avec lit rugueux, montre qu'un ajustement de type puissance entre  $L_j/h_1$  et  $F_1$  est possible.

En second temps, une étude a été faite concernant les mesures expérimentales des longueurs relatives du rouleau  $L_r/h_1$  de surface variant avec le nombre de Froude  $F_1$  incident de l'écoulement, par conséquent cette analyse a permis d'avoir une relation de type puissance entre  $L_r/h_1$  et  $F_1$ .

Aussi, une étude a été faite qui concerne la variation du rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  du ressaut en fonction de nombre de Froude  $F_1$  incident pour quatre valeurs différentes de rugosité :  $\varepsilon= 4,3\text{mm}$  ;  $\varepsilon=5,63\text{mm}$  ;  $\varepsilon= 7,14\text{mm}$  et  $\varepsilon=9, 11\text{mm}$ . Quatre allures distinctes, correspond chacune à une rugosité fixée. Par ailleurs, le nombre de Froude incident augmente proportionnellement avec le rapport des hauteurs conjuguées mais ce dernier diminue avec l'importance de la rugosité testée.

L'ajustement statistique des points expérimentaux de couple  $(Y, Fr)$  du ressaut hydraulique a donné une relation de type linéaire :  $f(Y, Fr, \varepsilon /D)$  justifiée par une très bonne corrélation.

En dernier temps, l'étude expérimentale a traité la dissipation d'énergie cinétique qui a été représentée par le rendement. Ainsi, la variation du rendement du ressaut hydraulique évolué en canal en U à fond rugueux dissipe mieux l'énergie quand la rugosité sera importante.

En fin de cette étude expérimentale, le profil du ressaut hydraulique a été étudié. Par ailleurs, la variation du rapport adimensionnel vertical  $y$  en fonction du rapport adimensionnel horizontal  $X$  a été analysée pour trois rugosités équivalentes  $\varepsilon=0,00\text{mm}$  ;  $\varepsilon=3,55\text{mm}$  et  $\varepsilon= 4,30\text{mm}$ . Cette analyse montre que, pour un nombre fixé de  $X$ , la valeur de  $y$  s'accroît avec l'accroissement de la rugosité équivalente ce qui justifie l'effet de la réduction des caractéristiques et la compacité du ressaut hydraulique.

## **Deuxième partie : Etude expérimentale**

## INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE

Le phénomène du ressaut hydraulique qui évolue dans les canaux de forme composée est devenu une destination de recherche pour de nombreux chercheurs dans ce domaine. Les travaux les plus récents dans ce domaine, sont ceux du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée de (*Khattaoui et Achour 2012*) et ceux de (*F. Riguet et al en 2019*).

Dans cette partie, nous allons examiner l'effet de la rugosité imposée au fond du canal rectangulaire de section composée sur les caractéristiques hydrauliques du ressaut contrôlé. Nous allons également tenter développer une approche théorique fonctionnelle adimensionnelle régissant le ressaut hydraulique qui sera validée expérimentalement.

La deuxième partie de cette thèse est subdivisée en trois chapitres.

- Pour le premier chapitre, le modèle d'expérimentation sera présenté ainsi que les appareils de mesure et le protocole expérimental à suivre.
- Pour le deuxième chapitre, à travers lequel nous allons tenter de développer une approche théorique qui donne une relation de la forme  $f(Y, F_1, Cr, \beta, \tau)$ . Ce dernier exprime l'effet de la rugosité du fond du canal rectangulaire de section composée sur le ressaut hydraulique. Aussi on va essayer de valider cette approche théorique, expérimentalement dans le but de l'exploiter aux utilisations diverses en pratique.
- A travers le troisième et dernier chapitre, nous allons analyser expérimentalement le ressaut hydraulique formé dans le canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux. Cette étude va permettre d'obtenir des approches empiriques adimensionnelles régissant les caractéristiques du ressaut hydraulique.

# **Chapitre I**

Description du modèle expérimental

## I.1. INTRODUCTION

Nous allons étudier dans ce premier chapitre de la deuxième partie, les dispositifs de mesure, le modèle expérimental et les dispositifs de mesure ainsi que le protocole expérimental.

## I.2. Appareil de mesures

Les essais ont été effectués dans un banc montré à la figure (1.1) de longueur 10 m et de hauteur 0,5 m surmonté par des parois latérales en plexiglas transparent. Le canal disposé est de section composée, de longueur 4 m, de hauteur  $h=20$  cm, de largeur pour le lit mineur  $b=15$  cm et de lit majeur  $B=25$  cm.



**Figure 1.1:** Canal d'expérimentation.

Le canal d'expérimentation est horizontal avec une pente nulle. La conduite circulaire de 150 mm de diamètre est reliée au bassin d'alimentation par un canal. Cette conduite est reliée à une boîte métallique fermée, dans laquelle est insérée une ouverture à paroi plane en tôle de largeur fixée débouchant dans le canal. Le rôle fondamental de cette ouverture insérée est de créer un écoulement torrentiel, sa section de l'ouverture est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale  $h_1$  du ressaut hydraulique. Les débits spécifiques s'effectuent par manipulation de la vanne. L'alimentation en eau dans le canal sera effectuée par une pompe axiale assurant un débit arrivant à 55,55 l/s. Les essais ont été réalisés dans un canal conçu au « Laboratoire d'exploitation et valorisation des ressources naturelles en zones aride » de l'Université de Ouargla.



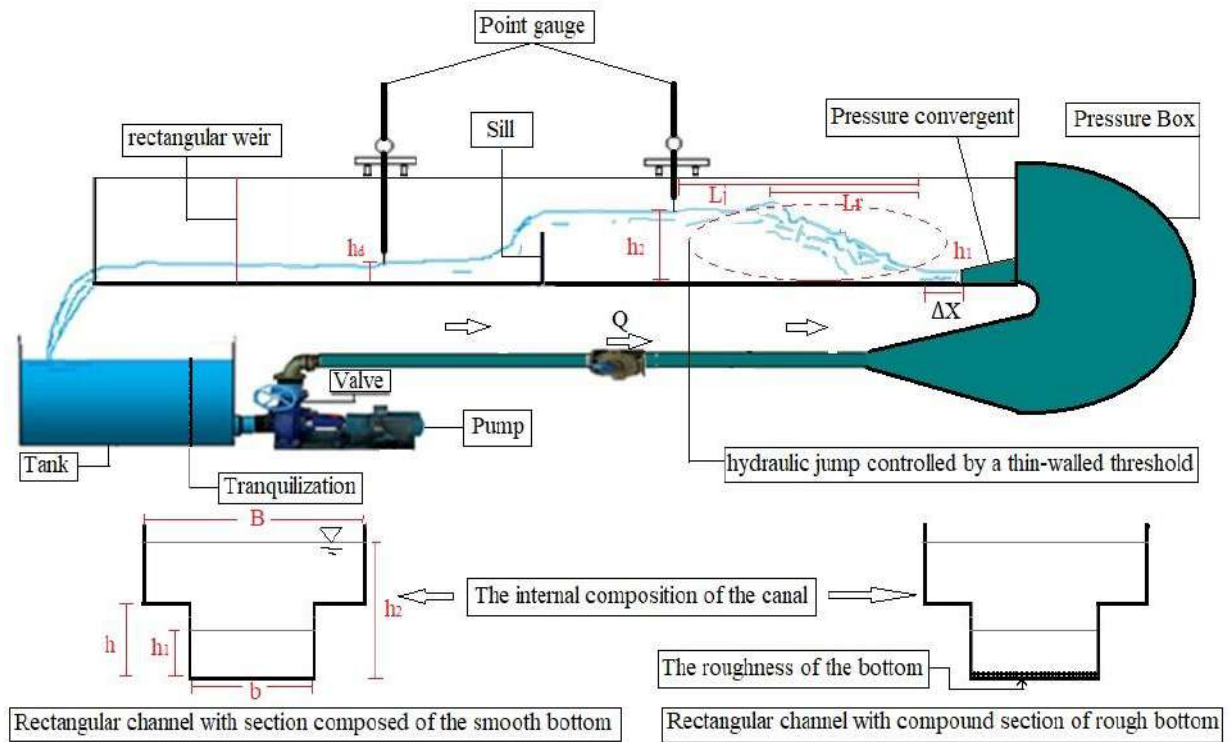


Figure 1.2: Schématisation de déroulement de l'expérimentation.



Figure 1.3 : Pompe axiale.



Figure 1.4: Vanne de régulation du débit.

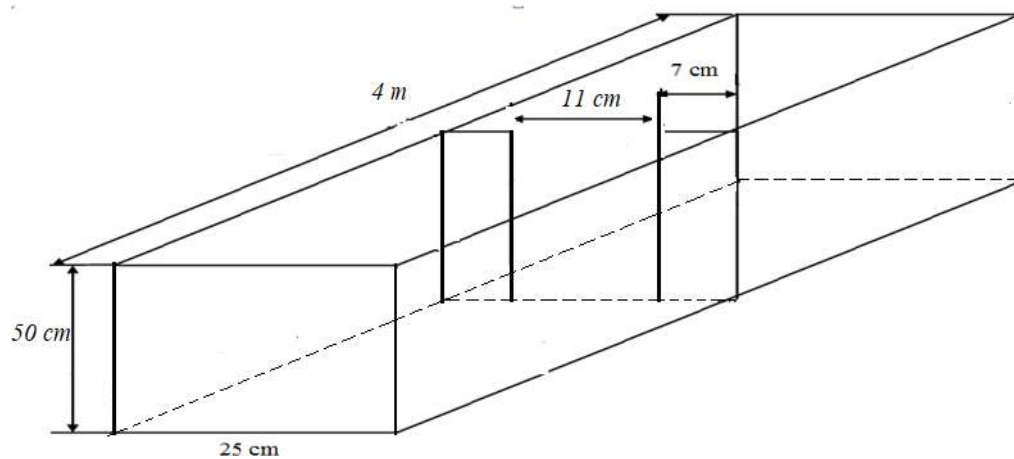
### I.3. APPAREILLAGES DE MESURE

#### I.3.1. Procédure de mesure des débits

Le banc de mesure de forme composée avec un lit mineur rugueux sur une longueur de 4 m, est relié dans sa partie aval à un canal de forme rectangulaire dans lequel est inséré un déversoir de section rectangulaire de hauteur avec contraction latérale et sans hauteur de pelle. Celui-ci est conçu et testé par *Hachemi Rachdi (2007)*, permettant de mesurer directement les débits d'écoulement.



**Figure 1.5:** Déversoir rectangulaire avec contraction latérale pour mesurer les débits pompés.



**Figure 1.6:** Schéma de définition de la deuxième partie du canal avec déversoir, *Hachemi, 2007*.

En effet, lors du passage du débit  $Q$  à travers les deux parois du débitmètre, la hauteur  $h_{dev}$  de la lame d'eau qui traverse ce débitmètre est lue sur l'appareil limnométrique placé au-dessus du déversoir. Par conséquent, le débit spécifique est obtenu en injectant la hauteur  $h$  dans l'équation (1.1) du déversoir.

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

Avec :

$Q$  : Le débit spécifique en (m<sup>3</sup>/s).

$\beta = b/B$  : Aspect de forme.  $\beta = b/B=0.44$

$b$  : Largeur de l'échancrure (m)  $b=11$  cm.

$B$  : Largeur au miroir du canal (m)  $B=25$  cm.

$g$  : L'accélération gravitationnelle (m/s<sup>2</sup>).

$h_{dev}$  : Hauteur de la lame déversant en (m).

La condition d'application est justifiée :  $\beta < 0.45$

La relation du débit spécifique :  $Q = 0.193 h_{dev}^{3/2}$

### I.3.2. L'appareil Limnimétrique

L'évaluation des profondeurs d'eau d'écoulement dans le banc d'expérimentation sont faite par un l'instrument Limnimétrique (Figure 1.7).

Les étapes de lecture des profondeurs sont : On lit la graduation sur la règle, qui est située directement au-dessus du zéro du vernier, puis on lit le nombre cinquante devant la division qui coïncide à la division de cette règle.

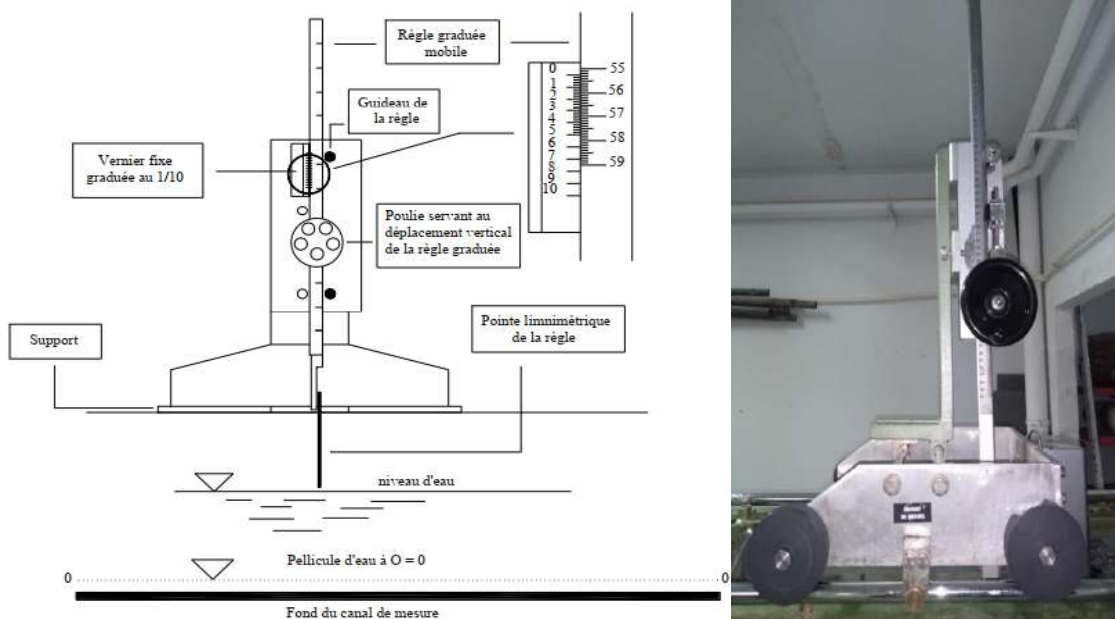
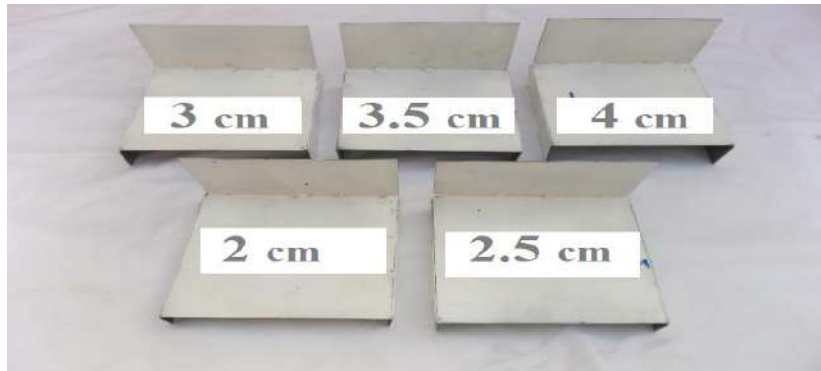


Figure 1.7: Profondeur d'eau mesuré par pointe Limnimétrique.

## I.4. APERÇU DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

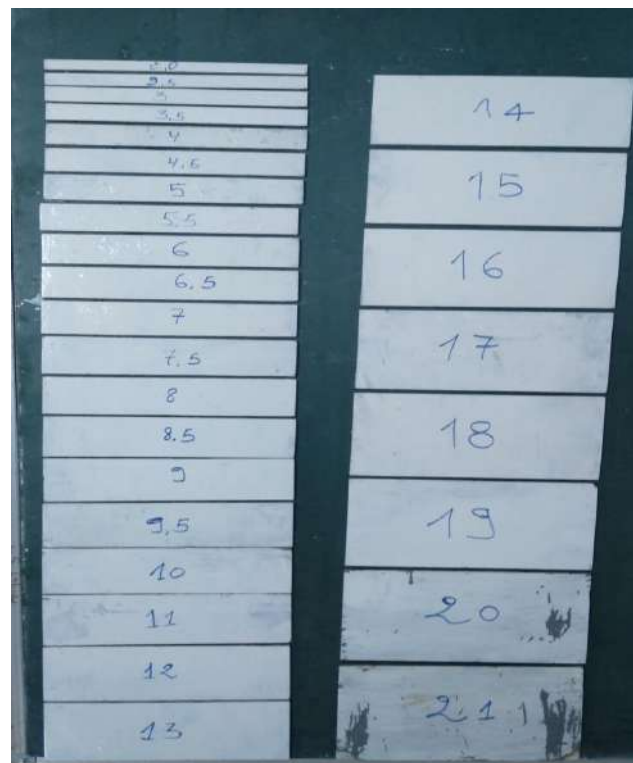
### V.4.1. Protocole expérimental des essais

L'expérimentation concerne le ressaut hydraulique formé par seuil à paroi mince en canal rectangulaire de forme composée avec un fond rugueux. Elle a été réalisée avec cinq ouvertures de la section amont ( $h_1$  (cm) = 02 ; 02.5 ; 03 ; 03.5 et 04). Une gamme des mesures des nombres de Froude a été obtenue ( $2 < F_1 < 20$ ).



**Figure 1.8:** Ouvertures ( $h_1$  (cm) = 02 ; 02.5 ; 03 ; 03.5 et 04).

Les parois de différentes hauteurs « S » ont été examinées (Figure 1.9), dans le but de contrôler et former le ressaut hydraulique par conséquent, 28 parois de contrôle ont été conçues, dont leurs hauteurs situées dans l'intervalle 2 cm et 21 cm.



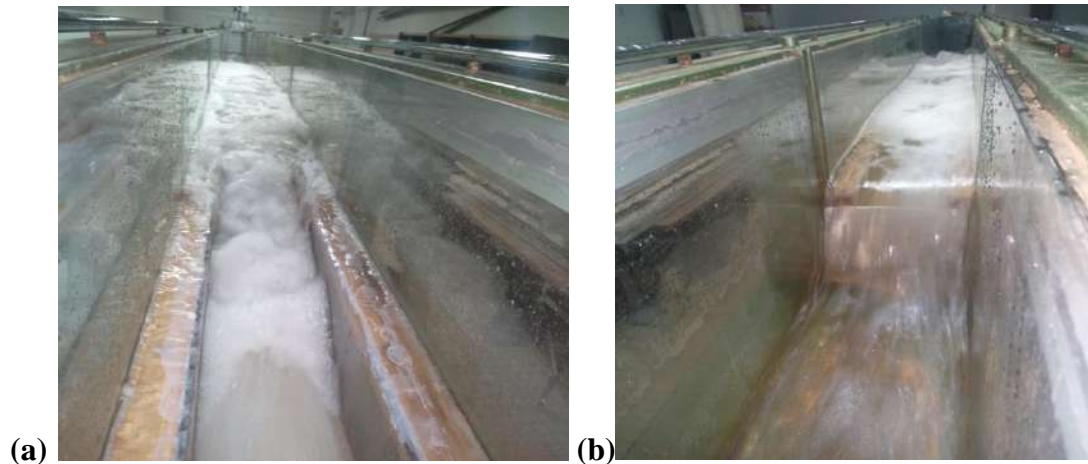
**Figure 1.9:** Parois mince pour contrôler la formation du ressaut.

Pour une hauteur « S » du seuil une position x de la paroi du seuil et une hauteur  $h_1$  de l'ouverture générant l'écoulement torrentiel, l'accroissement du débit spécifique Q, engendre la formation d'un ressaut. Le couple de mesure (Q,  $h_1$ ) permet aussi d'évaluer le nombre de Froude  $F_1$ . L'augmentation de Froude provoque le déplacement du ressaut vers l'aval et l'accroissement de sa longueur  $L_j$ . Par conséquent, pour chaque valeur du nombre de Froude  $F_1$  correspond une valeur de la hauteur « S » du seuil et une valeur de  $L_j$  du ressaut. Une gamme de mesures expérimentales, pour chaque caractéristique hydraulique, permettant d'avoir des résultats importants. Ces caractéristiques sont : la hauteur aval  $h_2$ , le débit spécifique Q, la hauteur « S » du seuil, la longueur  $L_r$  du rouleau de surface, la hauteur amont  $h_1$ , et la longueur  $L_j$  du ressaut, mesuré au début du ressaut. Celles-ci permettent de formuler les paramètres adimensionnels suivants :

- Le débit relatif « q » ou le nombre de Froude incident  $F_1$ ,

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

- Hauteur amont  $h_1$  ; [m]
- Hauteur aval  $h_2$  ; [m]
- Rapport  $y=h_2/h_1$  des hauteurs du ressaut ; [ ]
- Hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil, [ ]
- Longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut, [ ]
- Longueur relative  $L_r/h_1$  du rouleau. [ ]
- Rugosité relative  $\varepsilon/b$  du fond du canal. [ ]



**Figure 1.10:** Ressaut hydraulique dans un canal composé avec lit mineur rugueux.

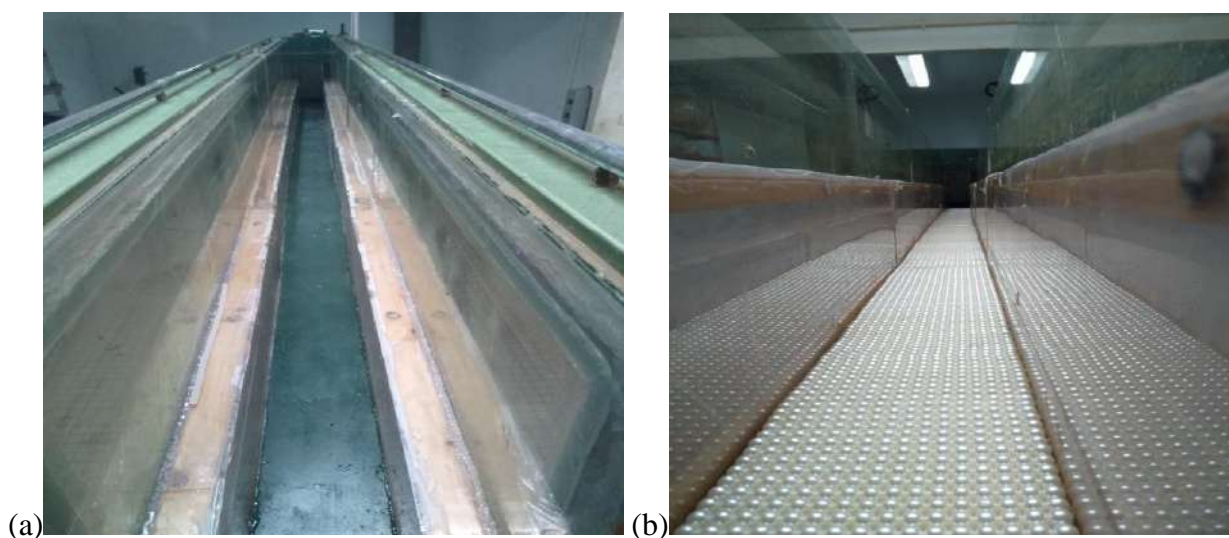
. a) Vue à l'amont du ressaut. b) Vue à l'aval du ressaut.

#### I.4.2. Mode de préparation de tapis ou rugosité équivalente

Les étapes à suivre pour concevoir les tapis rugueux qui seront imposées dans le canal rectangulaire de forme composée sont :

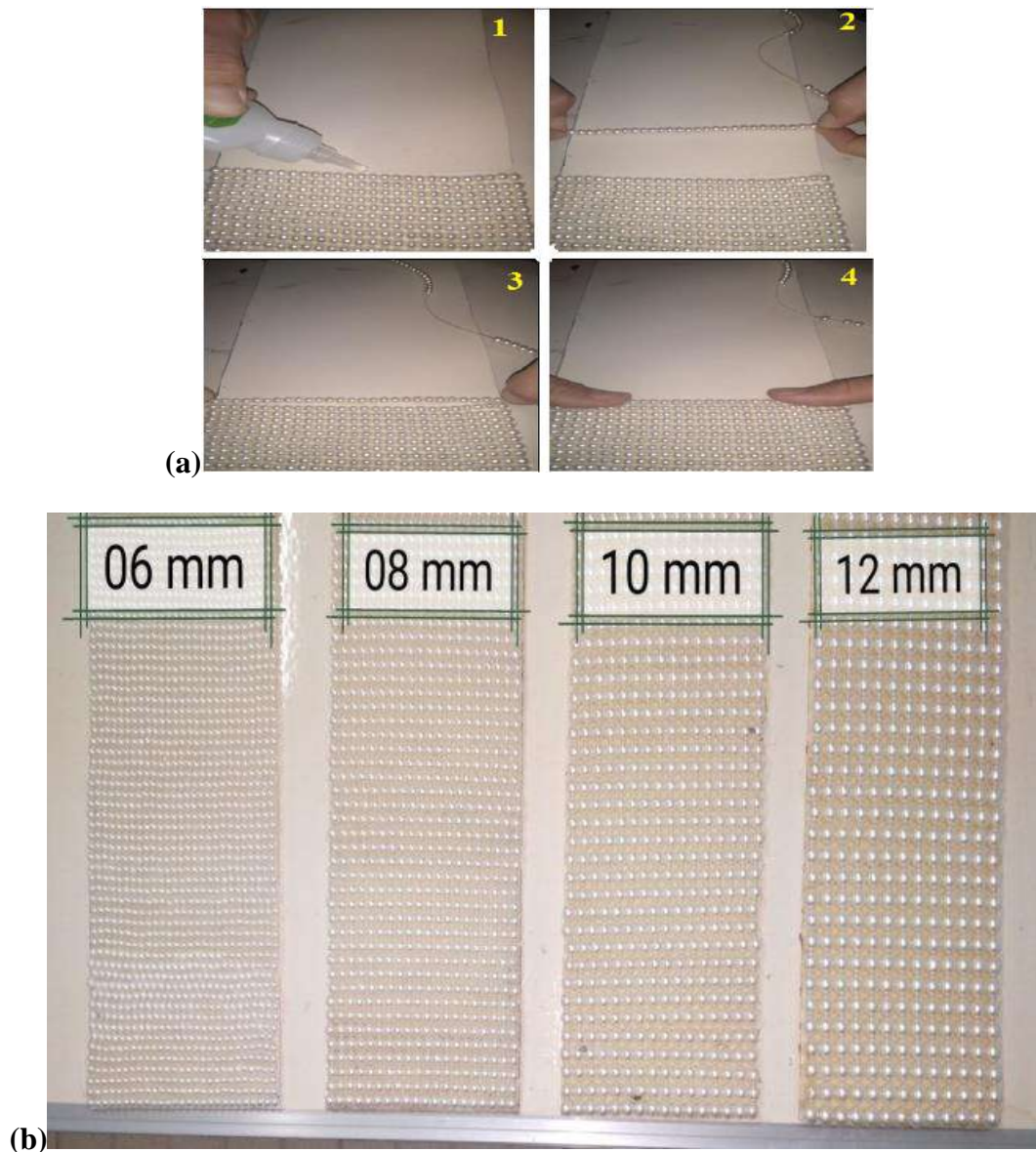
Des Pellets en plastique ont été préparés avec des trous au milieu, que nous attachons avec un fil de pêche en les faisant coller sur un tapis de 4m x 15cm (Figure 1.11 et Figure 1.12). Ces tapis rugueux sont uniformes grâce aux diamètres homogènes des pellets imposés. Les rugosités équivalentes conçues sont :

$\varepsilon = 06 \text{ mm}$   $\varepsilon = 08 \text{ mm}$   $\varepsilon = 10 \text{ mm}$  et  $\varepsilon = 12 \text{ mm}$ .



**Figure 1.11:** Tapis rugueux imposés au lit mineur du canal composé.

a) canal avec fond lisse. b) canal avec lit rugueux.



**Figure 1.12:** Tapies rugueux divers

(a) La méthode de conception des tapis rugueux ; (b) Les divers tapis rugueux.

## I.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exposé le banc expérimental utilisé à l'aide des diverses photos. 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 s'imposent au lit mineur du canal.

## **Chapitre II**

Etude de l'approche semi-théorique



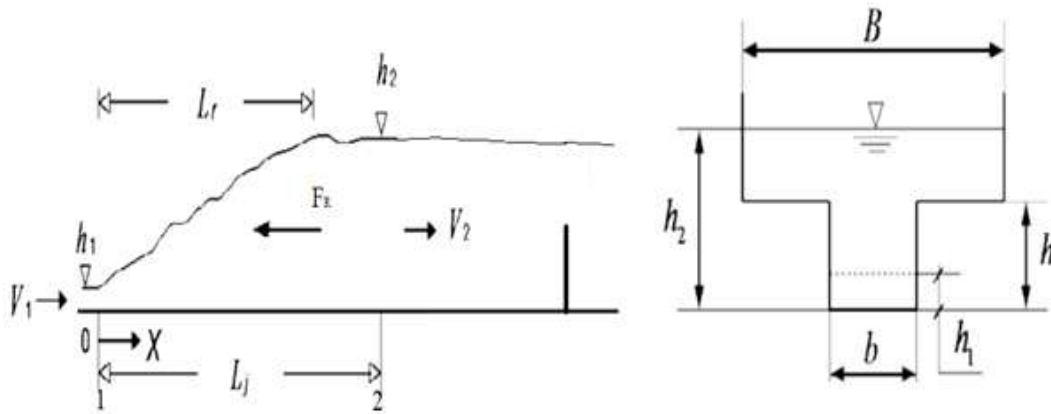
## II.1. INTRODUCTION

La première partie bibliographique explique clairement toutes les propriétés hydrauliques adimensionnelles intervenant au phénomène du ressaut formé qui sont : la hauteur initiale amont  $h_1$ , la hauteur final aval  $h_2$ , le nombre de Froude  $F_1$  et le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut.

Pour notre contribution de la deuxième partie de notre étude, nous avons en premier lieu tenter de développer une approche théorique de la forme  $f(Y, F_1, Cr, \beta, \tau)$ , avec :  $F_1$  est le nombre de Froude incident,  $Cr$  est le coefficient de frottement,  $\beta$  est le rapport de l'élargissement,  $\tau$  est le rapport d'aspect et  $Y$  est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique. En second lieu, nous avons entamé une étude expérimentale, en but de valider l'approche semi-théorique obtenue.

## II.2. ANALYSE THEORIQUE

La figure (2.1) indique un ressaut formé par paroi mince qui s'évolue en canal rectangulaire de forme composée à fond rugueux. La paroi mince de contrôle du ressaut est placée à l'aval du canal, en but d'augmenter le plan d'eau à la partie aval, les hauteurs conjuguées  $h_1$  et  $h_2$  sont successivement les profondeurs de la partie amont et aval du ressaut formé.



**Figure 2.1:** Schématisation du ressaut formé par paroi mince produit en canal rectangulaire de forme composée avec fond rugueux.

En hydraulique trois principes de conservation sont appliqués. Le principe de la conservation de l'énergie défini par l'équation de *Bernoulli*, le principe de conservation de la masse définie par l'équation de continuité ainsi que le principe de conservation de la quantité de mouvement

défini par le théorème *d'Euler* que nous appliquons ici pour un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux.

Pour les canaux composés, qui est notre cas, une autre hypothèse simplificatrice est considérée, il s'agit de la négligence de l'interaction entre le lit mineur et le lit majeur. Cette interaction est due au transfert de masse et de la quantité de mouvement au niveau de l'interface entre ces deux lits créant ainsi une turbulence, source de dissipation supplémentaire d'énergie.

### II.2.1. Application de la théorie d'Euler

La relation du ressaut est déterminée par l'application de la quantité du mouvement pour un système matériel, au cours d'un intervalle de temps  $\Delta t$ , est égale à l'impulsion des forces hydrostatiques qui agissent sur la masse liquide en écoulement tel que.

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

$\Delta P$ : Est la variation créée par la quantité de mouvement appliquée ( $\text{kg.m. s}^{-1}$ )

$\sum F_{ext}$  : La somme des forces extérieures (N)

$\Delta t$  : Le temps de variation (s)

Les hypothèses simplificatrices de la théorie d'Euler sont :

1. Les pressions appliquées dans les deux sections du ressaut hydrauliques sont hydrostatiques ;
2. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est uniforme ;
3. La perte de charge dans le ressaut hydraulique contrôlé est négligeable ;
4. Les frottements de l'air sont négligeables.

L'équation (2.1) devient :

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

En tenant compte que :

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

$\rho$  : La densité volumique du liquide ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  : Le volume du liquide ( $\text{m}^3$ )

$v$  : La vitesse du liquide (m/s)

$p$  : La quantité de mouvement (N)

La variation de la quantité de mouvement d'Euler dans les deux sections du ressaut hydraulique s'écrit comme suit :

$$\Delta P = \Delta P_2 - \Delta P_1 \quad (2.4)$$

Avec :

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

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

$v_1$  et  $v_2$  étant respectivement les vitesses dans les deux sections du ressaut hydraulique formé.

En divisant la relation (2.4) par  $\Delta t$ , on obtient :

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

Le débit spécifique est donné par la relation :

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.8)$$

En remplaçant dans la relation (2.7), on aura :

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

Puis, en remplaçant dans l'expression (2.2), on obtient :

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

La relation (2.10) s'appelle l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre les sections du ressaut.

On applique le théorème d'Euler, qui est nommé également « équation de la quantité de mouvement » sur le ressaut hydraulique formé par paroi mince évoluent en canal rectangulaire de forme composée à fond rugueux.

Nous pouvons écrire alors l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre le pied et à la fin du ressaut hydraulique comme suit :

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

En injectant la force de frottement  $f_R$ , la relation de la quantité de mouvement s'écrit ainsi :

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

Les deux sections  $A_1$  et  $A_2$  de la partie amont et aval s'écrivent comme suit :  $A_1 = bh_1$  et  $A_2 = B(h_2 - h) + bh$ .

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

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

$F_R$  est la force de frottement ou de résistance provoquée par rugosité imposée au lit mineur du canal, dont l'expression s'écrit comme suit :

$$F_R = C \rho g L_j \left( \frac{V_1^2}{2g} \right) p$$

Où :

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

$L_j$  : La longueur du ressaut hydraulique (m) ;

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

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

$\rho$  : La masse spécifique de l'eau ( $Kg/m^3$ ),

$Q$  : Le débit spécifique ( $m^3/s$ ).

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

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

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

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

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

$$2F_1^2 \left( 1 - \frac{L_j C}{h_1} - \frac{\beta}{Y - (1 - \beta)/\tau} \right) = \frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} - 1 \quad (2.15)$$

$$2F_1^2 \left( 1 - Cr - \frac{\beta}{Y - (1 - \beta)/\tau} \right) = \frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} - 1 \quad (2.16)$$

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

En éliminant la force de frottement  $f_R$ , l'équation résultante aurait comme expression :

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

En inspirant  $F_1^2(1 - Cr)$  de l'équation (2.16) on obtient :

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

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

Cette relation obtenue est semi-théorique du moment que le coefficient de résistance  $C_r$ , ne peut être obtenue qu'à partir de données expérimentales.

Lorsque le coefficient  $C_r$  s'annule on obtient l'approche de *Khattaoui et Achour 2012*

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

A travers une analyse théorique nous avons pu obtenir une relation semi-théorique de la forme  $f(Y, F_1, C_r, \beta, \tau)$ , qui permet d'aboutir le rapport des hauteurs conjuguées sachant le nombre de Froude incident  $Fr$  et le coefficient de résistance. Néanmoins, le coefficient  $C_r$  reste inconnu dans la relation (2.16), il est indispensable de passer à une analyse expérimentale de la relation aboutie dans le but d'estimer la relation finale liant le coefficient  $C_r$  de résistance à la rugosité relative  $\varepsilon/b$ .

## II.3. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA RELATION SEMI-THÉORIQUE

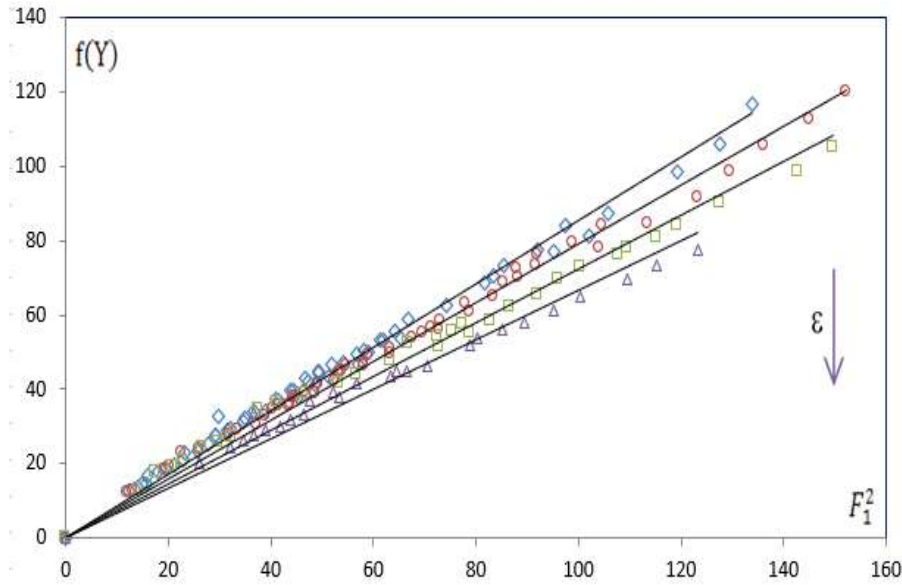
### II.3.1. Résultats expérimentaux

#### II.3.1.1. La Variation du coefficient $C_r$ de frottement varie en fonction de la rugosité imposée ( $\varepsilon/b$ ).

Dans le but d'établir l'expression du coefficient  $C_r$  de frottement qui varie en fonction de la rugosité relative ( $\varepsilon/b$ ), nous allons illustrer par la figure (2.2), la variation du terme

$$f(Y) = \frac{\beta F_1^2}{Y-(1-\beta)/\tau} + \frac{\frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1}{2} \quad \text{En fonction de } F_1^2 \text{ pour les quatre rugosités}$$

équivalentes examinées :  $\varepsilon(\text{mm}) = 06, 08, 10 \text{ et } 12$ .



**Figure 2.2:** Variation du membre  $f(Y)$  avec le nombre de Froude  $F_1^2$ , pour les quatre rugosités absolues  $\epsilon(\text{mm}) = (\diamond) 06, (\circ) 08, (\square) 10$  et  $(\triangle) 12$ .

Cette figure illustre quatre allures distinctes, dont chacune correspondant une rugosité fixée.

L'analyse des mesures expérimentales du ressaut hydraulique montre que chaque allure de points peut suivre une droite de la manière suivante :

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

Le terme 'M' représente le facteur  $(1 - C_r)$ .

Récapitulation des coefficients  $C_r$ , dans le tableau (2.1)

**Tableau 2.1:** Valeurs du paramètre  $C_r$

$\epsilon/b$	Paramètre ( $C_r$ )	$R^2$
0.04	0.145	0.99
0.053	0.210	0.99
0.067	0.278	0.98
0.08	0.332	0.954
0 (lisse)	0	1

On déduit qu'à partir du tableau ci-dessus que le paramètre  $C_r$  s'accroît avec l'accroissement de la rugosité relative  $(\epsilon/b)$ . La corrélation statistique des valeurs  $(\epsilon/b, C_r)$  donne une expression de type linéaire suivante :  $C_r = 4.061(\epsilon/b)$ . Celle-ci est montrée par la figure (2.3).

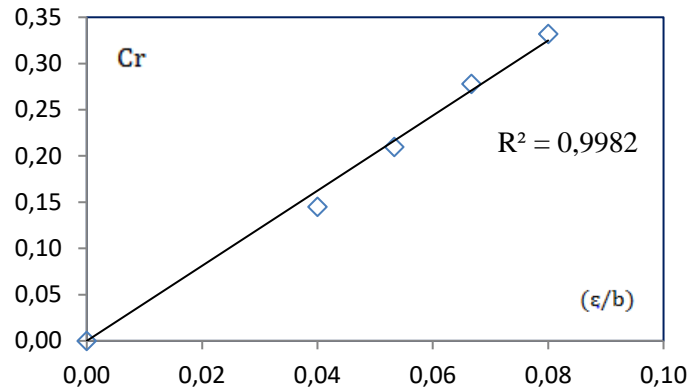


Figure 2.3: Représentation du paramètre Cr et la rugosité relative (ε/b).

En remplaçant l'expression de Cr dans la relation (2.18) l'équation semi-théorique devient :

$$F_1^2(1 - 4.061(\epsilon/b)) = \frac{\beta F_1^2}{Y - (1-\beta)/\tau} + \frac{\frac{(2Y-1/\tau) + (Y-1/\tau)^2 - 1}{\tau} - \beta}{2} \quad (2.21)$$

Pour  $0.04 \leq \epsilon/b \leq 0.08$

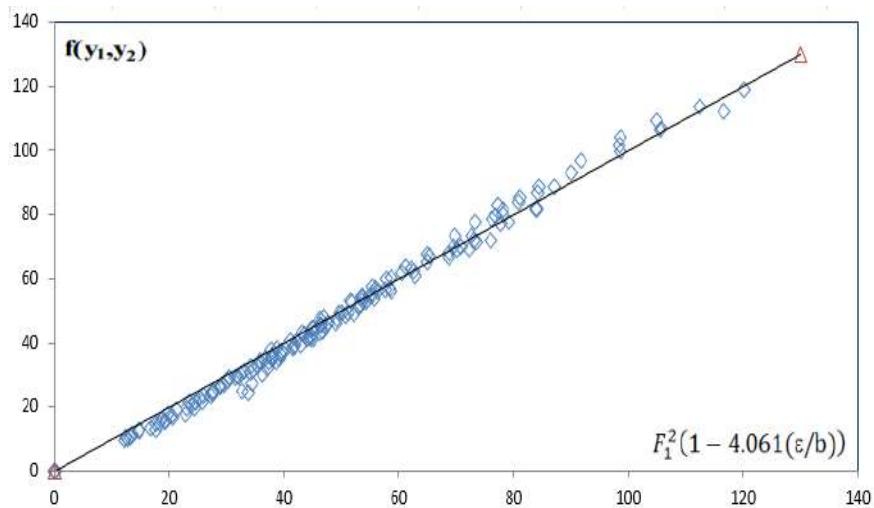


Figure 2.4: Validation de l'approche semi-théorique.

### II.3.1.2. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient Cr de résistance et du nombre de Froude F1

L'équation semi-théorique (2.21) étant implicite en Y, nous avons trouvé une relation approchée qui permet de trouver aisément le rapport Y en fonction du coefficient Cr de résistance du fond du canal et du nombre de Froude F1 de l'écoulement incident. La figure (2.5) montre un nuage de points qui suit parfaitement l'allure d'une courbe unique. L'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés non linéaire donne avec une très bonne corrélation la relation puissance suivante :

$$Y = 1.444 F_1^{0.956} (1 - Cr)^{0.478} \tag{2.22}$$

Pour  $0.04 \leq \varepsilon/b \leq 0.08$

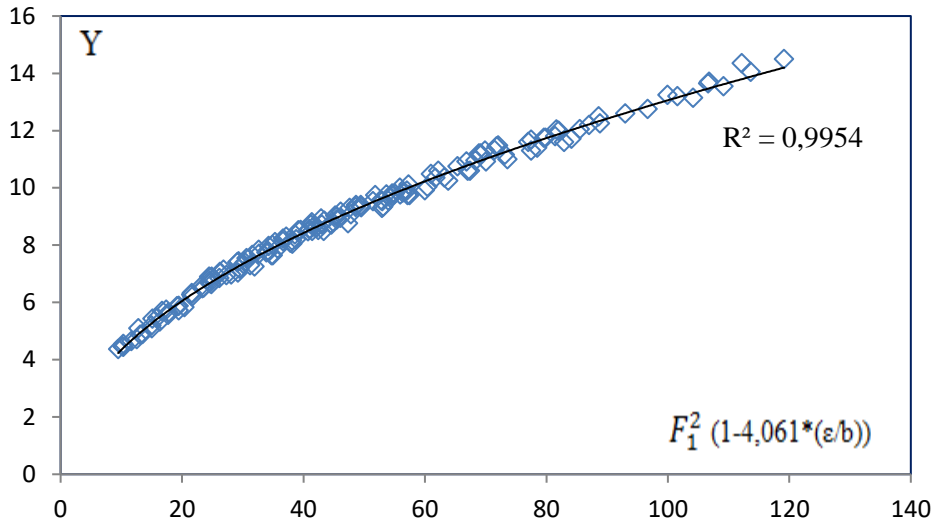


Figure 2.5: Représentation du rapport Y avec de  $F^2(1-C_r)$ , (◇) mesures expérimentales.

(—) Courbe de corrélation

Une comparaison entre Y expérimental et de l'équation semi-théorique (2.22) est montrée par la figure 2.6. On constate que les mesures expérimentales suivent parfaitement la première bissectrice, montrant ainsi que la relation (2.22) représente bien la relation semi-théorique.

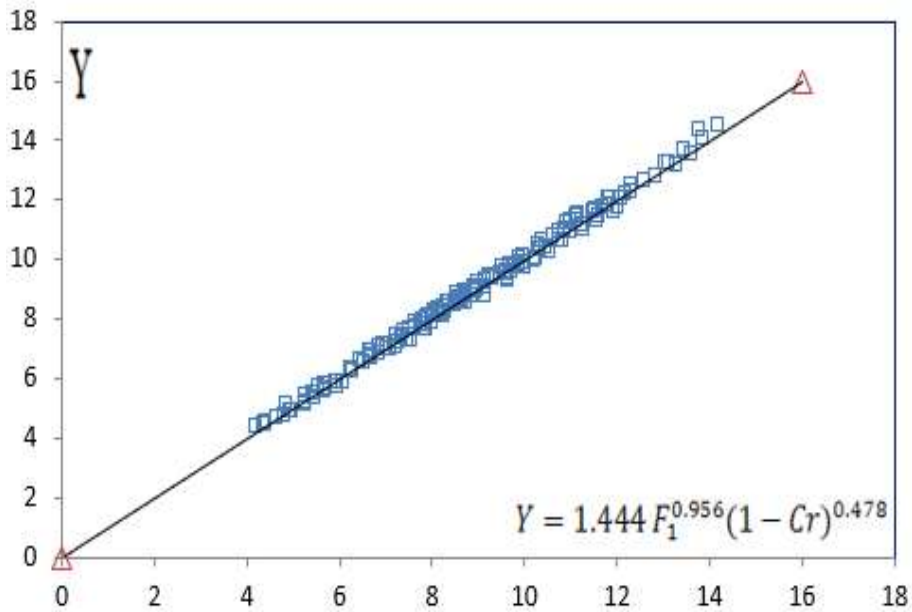


Figure 2.6: Comparaison entre Y expérimental et de l'équation semi-théorique (2.22). (◇) Points de mesures expérimentales. (—) Courbe d'ajustement.



L'erreur relative entre les mesures résultant de l'équation semi-théorique (2.22) et celle expérimentales  $Y$  est indiquée dans le tableau (2.2). On déduit de ce tableau (2.2) que l'erreur relative est en majorité ne dépasse pas 2 % ce qui justifie la fiabilité de cette approche ainsi les mesures expérimentales obtenues au laboratoire.

**Tableau 2.2:** Erreur relative en (%) entre  $Y$  expérimentale et  $Y$  semi- Théorique.

$Y$ approche	$Y$ Expérimental	$\Delta Y/Y$	$Y$ approche	$Y$ Expérimental	$\Delta Y/Y$
4,41	4,45	1,00	8,95	9,00	0,52
4,67	4,65	-0,49	9,32	9,32	-0,03
4,94	4,88	-1,43	9,77	9,80	0,29
7,41	7,55	1,85	10,00	10,12	1,20
4,84	4,71	-2,64	10,30	10,48	1,69
6,66	6,89	3,23	10,77	10,92	1,42
6,96	7,14	2,57	10,92	11,20	2,49
7,26	7,43	2,28	11,16	11,48	2,83
7,82	7,97	1,91	11,55	11,68	1,12
8,08	8,23	1,84	11,87	12,00	1,10
8,34	8,51	2,07	7,87	7,65	-2,92
8,55	8,71	1,90	8,59	8,65	0,71
8,76	8,86	1,09	8,95	8,90	-0,60
5,01	4,90	-2,25	9,98	9,90	-0,80
5,27	5,10	-3,42	10,36	10,35	-0,10
5,49	5,33	-2,92	10,65	10,75	0,94
5,71	5,57	-2,50	10,94	11,20	2,32
5,93	5,87	-1,00	11,14	11,45	2,75
6,26	6,27	0,12	11,83	11,80	-0,24
6,48	6,57	1,25	12,33	12,25	-0,65
6,66	6,90	3,55	12,84	12,75	-0,69
6,89	7,07	2,57	13,15	13,20	0,41
7,23	7,40	2,24	13,46	13,65	1,42
7,65	7,70	0,68	13,87	14,05	1,26
7,89	8,00	1,41	14,19	14,50	2,15
8,13	8,30	2,06	4,41	4,55	3,08
8,37	8,53	1,88	4,89	5,10	4,18
8,56	8,80	2,75	5,29	5,43	2,65
8,93	9,03	1,14	5,55	5,70	2,71
9,24	9,33	0,96	9,25	9,40	1,61
9,50	9,53	0,38	9,61	9,57	-0,48
9,69	9,77	0,79	9,92	9,83	-0,87
9,88	10,00	1,18	5,96	5,88	-1,42
5,97	5,72	-4,36	6,28	6,20	-1,33
8,20	8,08	-1,51	6,54	6,52	-0,33

**Tableau 2.2 (suite) :** Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et  
Y semi- Théorique

Y approche	Y Expérimental	$\Delta Y/Y$	Y approche	Y Expérimental	$\Delta Y/Y$
8,50	8,48	-0,19	9,81	9,80	-0,09
8,72	8,72	0,02	10,25	10,04	-2,13
9,17	9,08	-0,97	10,48	10,36	-1,14
9,32	9,40	0,85	10,78	10,60	-1,70
9,78	9,72	-0,60	11,01	10,92	-0,80
10,88	10,96	0,77	11,24	11,16	-0,69
11,11	11,32	1,81	11,62	11,40	-1,96
11,52	11,60	0,71	12,01	11,72	-2,50
11,84	12,04	1,64	7,02	6,95	-0,99
6,71	6,90	2,72	7,35	7,35	-0,06
8,87	8,75	-1,34	7,78	7,75	-0,38
9,15	9,30	1,62	8,30	8,20	-1,22
9,53	9,75	2,26	8,56	8,50	-0,75
10,40	10,60	1,88	9,01	8,95	-0,66
10,99	11,30	2,70	9,64	9,35	-3,14
11,70	11,75	0,43	10,01	9,75	-2,68
12,11	12,05	-0,49	11,72	11,75	0,26
12,31	12,50	1,48	12,21	12,20	-0,07
13,04	13,25	1,55	12,60	12,60	-0,03
13,47	13,70	1,70	13,31	13,15	-1,18
13,79	14,35	3,93	13,61	13,55	-0,43
4,23	4,38	3,30	5,67	5,75	1,37
4,38	4,48	2,18	6,29	6,33	0,57
6,89	7,03	2,04	6,53	6,50	-0,40
7,52	7,66	1,75	6,68	6,68	-0,15
7,82	7,77	-0,67	6,89	6,85	-0,52
8,08	8,14	0,82	7,13	6,98	-2,20
8,28	8,37	1,09	7,29	7,18	-1,63
8,64	8,63	-0,14	7,50	7,30	-2,71
5,26	5,20	-1,23	8,00	7,89	-1,44
5,42	5,47	0,84	8,68	8,53	-1,75
7,64	7,83	2,47	9,15	8,77	-4,34
7,93	8,10	2,07	8,89	8,72	-1,96
8,71	8,93	2,50	9,74	9,56	-1,87
9,01	9,17	1,66	10,24	9,92	-3,26
9,32	9,33	0,12	6,68	6,75	0,96
9,63	9,53	-1,05	7,58	7,25	-4,56
9,88	9,77	-1,21	7,92	7,65	-3,46
5,72	5,64	-1,37	8,25	8,05	-2,53
6,11	5,84	-4,55	8,77	8,50	-3,17
6,70	6,64	-0,94	9,65	9,30	-3,75
7,25	7,04	-2,93	10,01	9,75	-2,65

**Tableau 2.2 (suite et fin) : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y semi- Théorique.**

Y approche	Y Expérimental	$\Delta Y/Y$	Y approche	Y Expérimental	$\Delta Y/Y$
7,38	7,40	0,21	10,55	10,25	-2,97
7,80	7,80	-0,04	10,83	10,60	-2,17
8,23	8,16	-0,84	11,30	11,00	-2,69
8,52	8,56	0,51	11,58	11,30	-2,46
			11,96	11,60	-3,08

## II.4. CONCLUSION

On conclure qu'à partir de ce chapitre, on a eu ce qui suit : en premier temps, nous avons décrit le banc d'essai qui a servi de réaliser l'expérimentation complète du ressaut hydraulique. Toutes les mesures expérimentales obtenues au niveau du laboratoire ont permis d'établir l'approche semi théorique caractérisée par les paramètres suivants :  $F_1$ ,  $Y$ ,  $Cr$ ,  $\beta$ , et  $\tau$  avec :  $F_1$  est le nombre de Froude incident,  $Cr$  est le coefficient de frottement ou de résistance,  $\beta$  est le rapport de l'élargissement,  $\tau$  est le rapport de forme et  $Y$  est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique contrôlé. Cette approche adimensionnelle est établie à partir de la théorie d'Euler appliquée entre les deux sections du ressaut hydraulique après sa formation.

En second temps, nous avons analysé l'équation semi-théorique expérimentalement et nous nous sommes arrivés à aboutir une approche semi-théorique adimensionnelle explicite permettront de calculer le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en faisant injecter le débit volumique d'écoulement et la valeur de la rugosité absolue testée expérimentalement.

## **Chapitre III**

---

# Etude expérimentale

### III.1. INTRODUCTION

L'étude bibliographique montre que les propriétés adimensionnelles impliquées dans le phénomène de ressaut hydraulique sont : le nombre de Froude  $F_1$  ou le débit relatif  $q$ , la hauteur initiale amont  $h_1$  ( $h_1$  est la hauteur au pied du ressaut), la hauteur finale aval  $h_2$  ( $h_2$  est la hauteur maximale mesurée à l'aval du ressaut) et le rapport  $y=h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées du ressaut.

Comme c'est indiqué dans la partie bibliographique, à l'exception des travaux de *Hagar (1987, 1989)* et ceux publiés plus récemment par *Khattaoui et Achour (2012)*, Peu d'études qui ont été réalisées dans le domaine du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal de section composée. A notre connaissance l'étude la plus connue est celle de *Rajaratnam (1968)*, qui a expérimenté le ressaut hydraulique en canal rectangulaire à fond rugueux et celle aussi de *Rajaratnam (2002)*, par ailleurs, le ressaut hydraulique contrôlé dans un canal rectangulaire de section composée à fond rugueux, n'a pas été étudié jusqu'à ce jour. Afin de combler cette lacune, notre étude a été proposée.

A travers ce chapitre nous allons analyser expérimentalement le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux, cette étude permet d'obtenir des relations empiriques adimensionnelles régissant les caractéristiques de ce type du ressaut hydraulique.

### III.2. DISCUSSION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

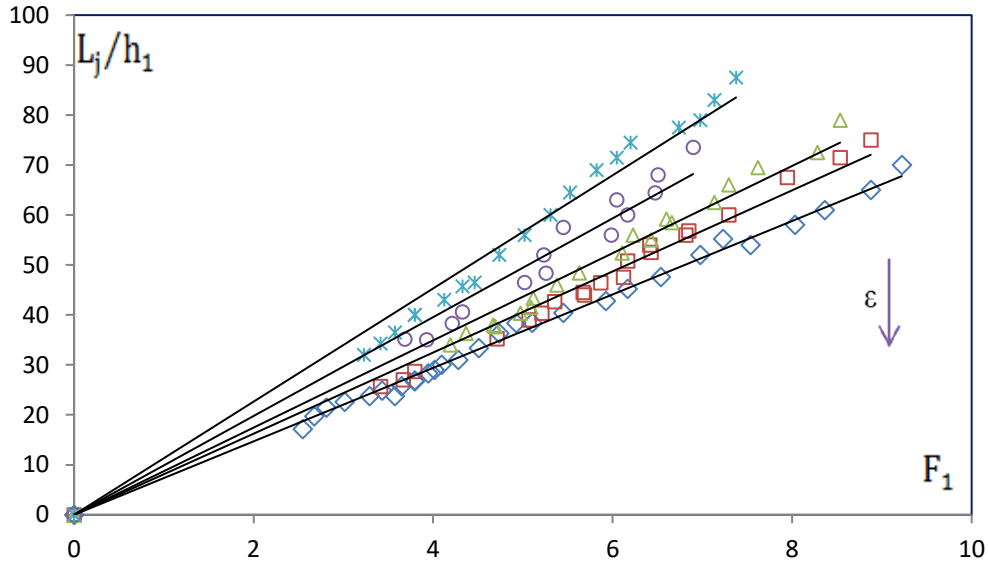
#### III.2.1. Étude des variations des caractéristiques du ressaut

##### III.2.1.1. Étude de la longueur relative du ressaut hydraulique $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude incident $F_1$

###### III.2.1.1.1. Étude de la longueur relative du ressaut $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ dans le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ) cm.

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

La figure (3.1) illustre la variation de  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour cinq rugosités équivalentes :  $\varepsilon = 00$  mm ;  $\varepsilon = 06$  mm ;  $\varepsilon = 08$  mm ;  $\varepsilon = 10$  mm et  $\varepsilon = 12$  mm dans le lit mineur ( $0 < \text{représentation } h_2 < 20$ ) cm.



**Figure 3.1:** Représentation de 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 cinq rugosités différentes " $\epsilon$ " :

( $\diamond$ ) 12 mm ;( $\square$ ) 10 mm ;( $\triangle$ ) 08 mm ;( $\circ$ ) 06 mm et ( $*$ ) 0 mm.

(—) Courbes d'ajustements.

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 " $\epsilon$ " correspond une courbe de type linéaire de la forme :  $L_j/h_1 = a_1(F_1)$ .

L'étude de toutes ces mesures obtenues et illustrées sous forme des différentes courbes montre que la longueur relative du ressaut  $L_j/h_1$  s'accroît avec l'accroissement du nombre de Froude  $F_1$  pour les cinq rugosités testées. Par ailleurs, le rapport de la longueur relative  $L_j/h_1$  diminue avec l'accroissement de la rugosité «  $\epsilon$  », ce qui justifie l'influence de cette dernière à la dissipation d'énergie hydraulique.

Regroupement des valeurs de coefficient  $a_1$  dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 3.1:** Récapitulation des valeurs du coefficient  $a_1$  .

$\epsilon/b$	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

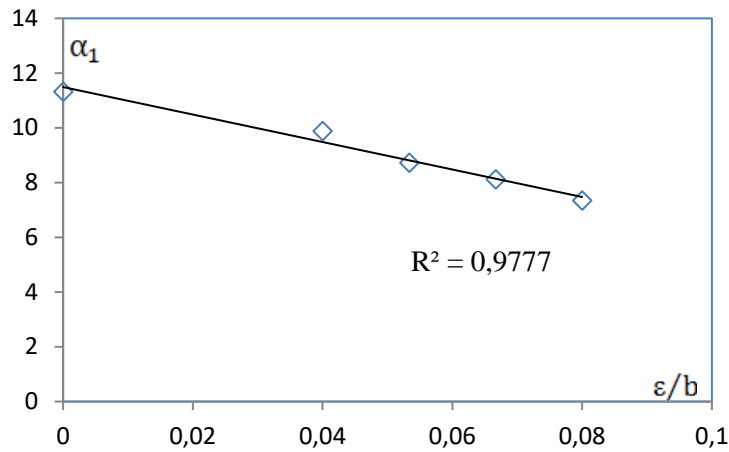


Figure 3.2: Représentation du coefficient «  $a_1$  » avec rugosité ( $\epsilon/b$ ).

L’ajustement des couples de valeurs ( $a_1, \epsilon/b$ ) du tableau (3.1) a permis de décrire avec une bonne corrélation la relation linéaire suivante :  $a_1 = -50.208 (\epsilon/b) + 11.49$ .

Cette équation est illustrée dans la figure (3.2). L’équation liant la longueur relative amont  $L_j/h_1$ , le nombre de Froude  $F_1$  et la rugosité relative  $\epsilon/b$  s’écrit alors :

$$L_j/h_1 = (-50.208 (\epsilon/b) + 11.49)F_1 \tag{3.1}$$

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

La figure (3.3) 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.

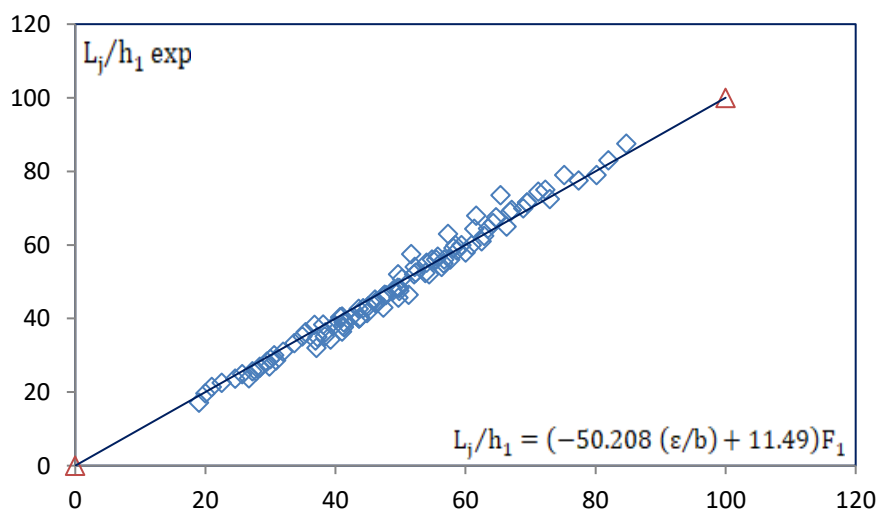


Figure 3.3: Représentation de l’approche globale expérimentale  $L_j / h_1 = f (\epsilon/b, F_1)$  avec les points expérimentaux  $L_j/h_1$ . (—) Première bissectrice.

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 (3.2), Afin de justifier la fiabilité de l'équation empirique. Le tableau (3.2), montre clairement que les écarts relatifs sont dans la plupart inférieur à 5%.

**Tableau 3.2:** Récapitulation des erreurs relatives entre  $L_j/h_1$  d'ajustement et  $L_j/h_1$  expérimentale pour 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

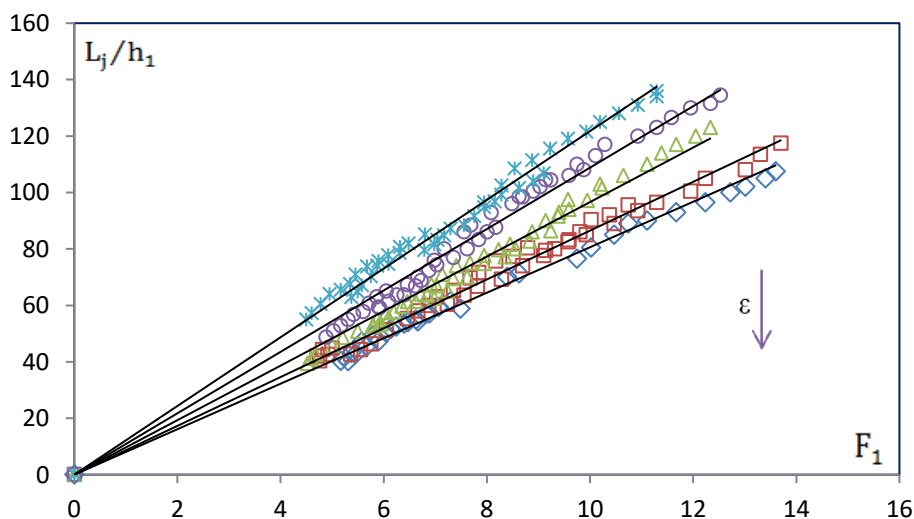


**Tableau 3.2 (suite et fin) :** Récapitulation des erreurs relatives entre  $L_j/h_1$  d'ajustement et  $L_j/h_{1\text{Expérimentale}}$  pour le lit mineur.

$L_j/h_{1\text{relation}}$	$L_j/h_{1\text{Exp}}$	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)	$L_j/h_{1\text{relation}}$	$L_j/h_{1\text{Exp}}$	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)
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.2.1.1.2. Etude de La 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 étudié la variation de  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour cinq rugosités équivalentes dans le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm.



**Figure 3.4:** Représentation de la longueur relative  $L_j/h_1$  et du nombre de Froude, pour cinq rugosités différentes "ε" : (◇) 12 mm ; (□) 10 mm ; (△) 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.

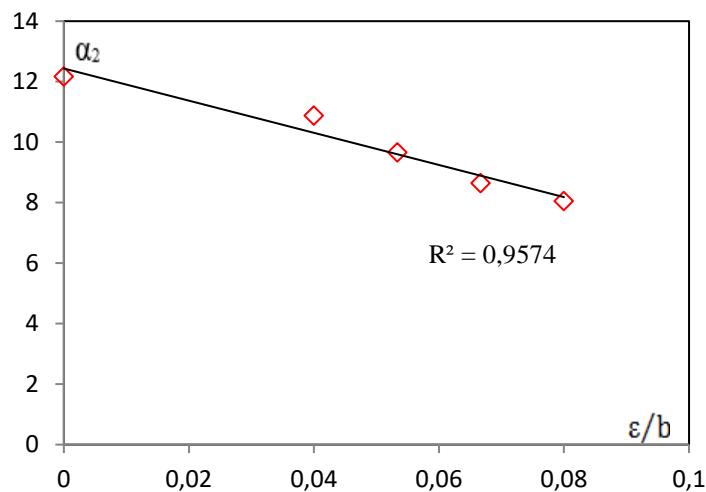
De plus, l'analyse expérimentale des points de mesure du ressaut hydraulique à fond rugueux dans le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm, montre que chaque valeur de rugosité " $\varepsilon$ " correspond une courbe de type linéaire de la forme  $L_j/h_1 = b_1(F_1)$ .

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 «  $\varepsilon$  » augmente.

Le tableau (3.3) regroupe les valeurs du coefficient  $b_1$ .

**Tableau 3.3:** Récapitulation des valeurs  $b_1$  en fonction des rugosités relatives

$\varepsilon / b$	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 3.5:** Représentation du coefficient " $b_1$ " et de rugosité relative  $\varepsilon/b$  dans le lit majeur.

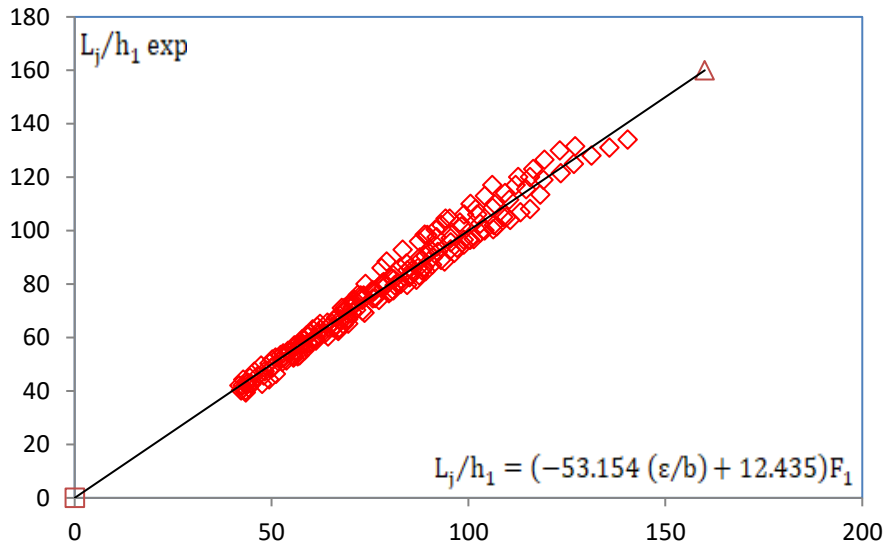
La corrélation des valeurs ( $b_1$ ,  $\varepsilon/b$ ) du tableau (3.3) a donné l'équation adimensionnelle suivante :  $b_1 = -53.154 (\varepsilon/b) + 12.435$ . Cette équation est montrée à la figure (3.5)

L'approche aboutie  $L_j/h_1$  qui lie le nombre de Froude  $F_1$  et la rugosité relative  $\varepsilon/b$  pour le lit majeur est formulée comme suit :

$$L_j/h_1 = (-53.154 (\epsilon/b) + 12.435)F_1 \tag{3.2}$$

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

La figure (3.6) montre que la relation  $f(\epsilon/b, F_1)$ ajuste avec une bonne corrélation pour le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm. Les points expérimentaux obtenus suivent exactement la première bissectrice.



**Figure 3.6:** Représentation des mesures de la longueur relative  $L_j/h_1$  expérimentale et la relation  $f(\epsilon/b, F_1)$ . (□) Les points expérimentaux du ressaut contrôlé à fond rugueux dans le lit majeur.

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 (3.4), afin de justifier la fiabilité de l'équation empirique et les mesures expérimentales obtenues. Le tableau (3.4) montre clairement que dans la plupart des cas les écarts relatifs sont inférieurs à 5%.

**Tableau 3.4:** Erreurs relatives entre  $L_j/h_1$  expérimentale et celles issues de  $L_j/h_1$  d'ajustement pour 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 3.4 (suite) :** Erreurs relatives entre  $L_j/h_1$  expérimentale et celles issues de  $L_j/h_1$  d'ajustement pour 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

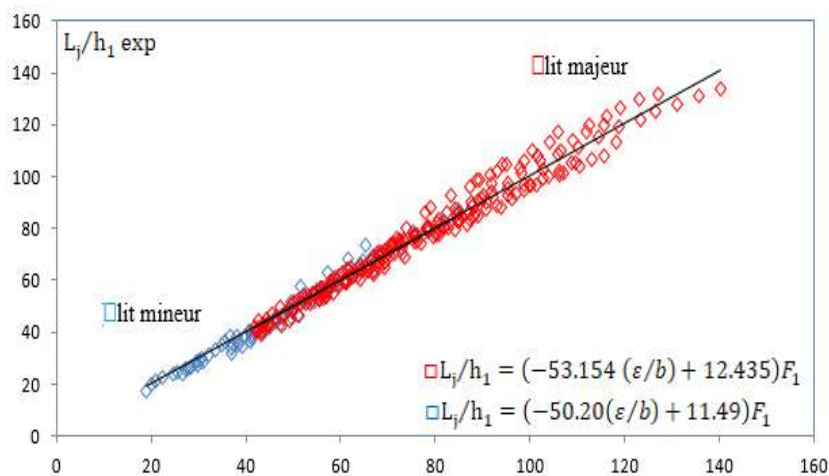
**Tableau 3.4 (suite) :** Erreurs relatives entre  $L_j/h_1$  expérimentale et celles issues de  $L_j/h_1$  d'ajustement pour le lit majeur.

$L_j/h_{1\_relation}$	$L_j/h_{1\_Exp}$	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)	$L_j/h_{1\_relation}$	$L_j/h_{1\_Exp}$	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)
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 3.4 (suite et fin) :** Erreurs relatives entre  $L_j/h_1$  expérimentale et celles issues de  $L_j/h_1$  d’ajustement pour le lit majeur.

$L_j/h_{1\_relation}$	$L_j/h_{1\_Exp}$	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)	$L_j/h_{1\_relation}$	$L_j/h_{1\_Exp}$	$(\Delta L_j)/L_j$ (%)
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

Cette représentation graphique (3.7) illustre la variation de la longueur relative du ressaut  $L_j/h_1$  expérimentale avec celle de l’équation générale  $(\epsilon/b, F_1)$  pour les deux cas (lit mineur et lit majeur) dans le même graphe. On remarque une continuation entre les deux courbes.



**Figure 3.7:** Représentation de  $L_j/h_1$  expérimental en fonction de  $f(\epsilon/b, F_1)$  pour les deux cas (lit mineur et lit majeur)

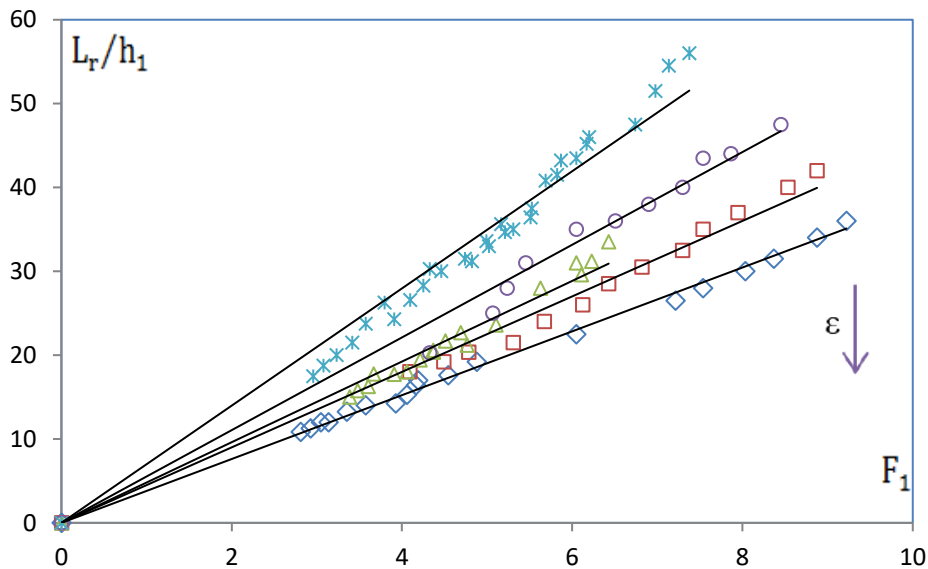
On déduit de cette figure que la section composée à fond rugueux a un effet reducteur de la longueur du ressaut en lit mineur que celui en lit majeur.

### III.2.1.2. Etude de la longueur relative du rouleau de surface $L_r/h_1$ qui varie en fonction du nombre de Froude incident $F_1$

#### III.2.1.2.1. Etude de la longueur relative du rouleau de surface $L_r/h_1$ qui varie en fonction du nombre de Froude incident $F_1$ pour le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ) cm.

L'étude expérimentale de La longueur relative du rouleau de surface  $L_r/h_1$  qui est la distance entre le début de sa formation et sa fin de la grande turbulence, varie en fonction de nombre de Froude incident  $F_1$  est représentée dans la figure (3.8) pour cinq rugosités équivalente testées :  $\varepsilon = 00$  mm ;  $\varepsilon = 06$  mm ;  $\varepsilon = 08$  mm ;  $\varepsilon = 10$  mm et  $\varepsilon = 12$  mm dans le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ) cm.

On observe ainsi, cinq allures de points, correspond pour chacune une rugosité fixée. D'autre part, la corrélation des mesures expérimentales du ressaut hydraulique avec lit mineur rugueux, prouve que chaque rugosité «  $\varepsilon$  » testée ajuste une courbe linéaire comme suit :  $L_r/h_1 = a_2(F_1)$ .



**Figure 3.8:** Représentation de  $L_r/h_1$  avec le nombre de Froude  $F_1$ , pour cinq rugosités différentes

" $\varepsilon$ " : ( $\Delta$ ) 08 mm ; ( $\circ$ ) 06 mm ( $*$ ) 0 mm. ( $\square$ ) 12 mm et ( $\square$ ) 10 mm

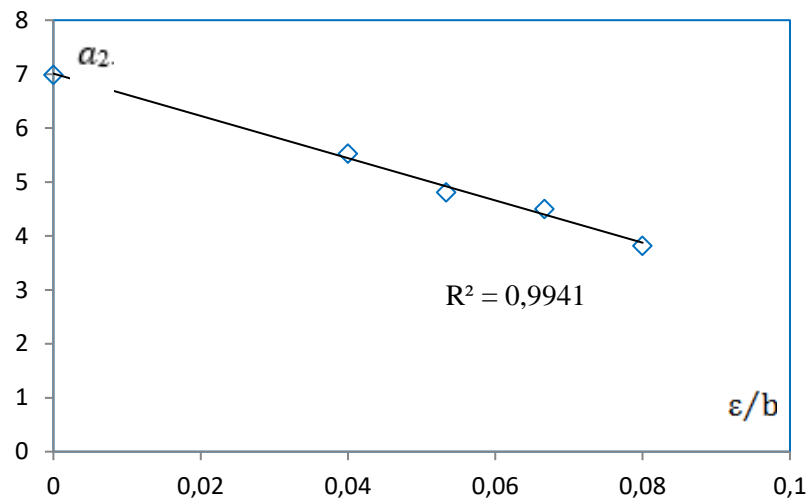
(—) Courbes de corrélation.

La corrélation de ces mesures expérimentales montre que l'augmentation du nombre de Froude  $F_1$  provoque aussi l'accroissement de la longueur relative du ressaut  $L_r/h_1$  et ceci pour cinq les rugosités. Ainsi, l'augmentation de la rugosité relative  $\varepsilon/b$  entraîne une diminution du rapport des longueurs relatives  $L_r/h_1$ .

Le tableau (3.5) affiche les valeurs du coefficient  $a_2$ .

**Tableau 3.5:** Coefficient  $a_2$  des courbes d'ajustements.

$\varepsilon / b$	Coefficient $a_2$	$R^2$
0,08	3.817	0,995
0,06666667	4.501	0,985
0,05333333	4.809	0,976
0,04	5.528	0,983
0	6.986	0,966



**Figure 3.9:** Représentation du coefficient «  $a_2$  » avec la rugosité relative  $\varepsilon/b$  dans le lit mineur.

La corrélation des mesures expérimentales de  $(a_2, \varepsilon/b)$  indiquée au tableau ci-dessus a donné une relation déduite par la méthode des moindres carrées et qui s'écrit comme suit :

$a_2 = -39,2 * \varepsilon/b + 7,0098$ , avec  $R^2 = 0,9941$ . Cette relation est représentée par la figure (3.9).

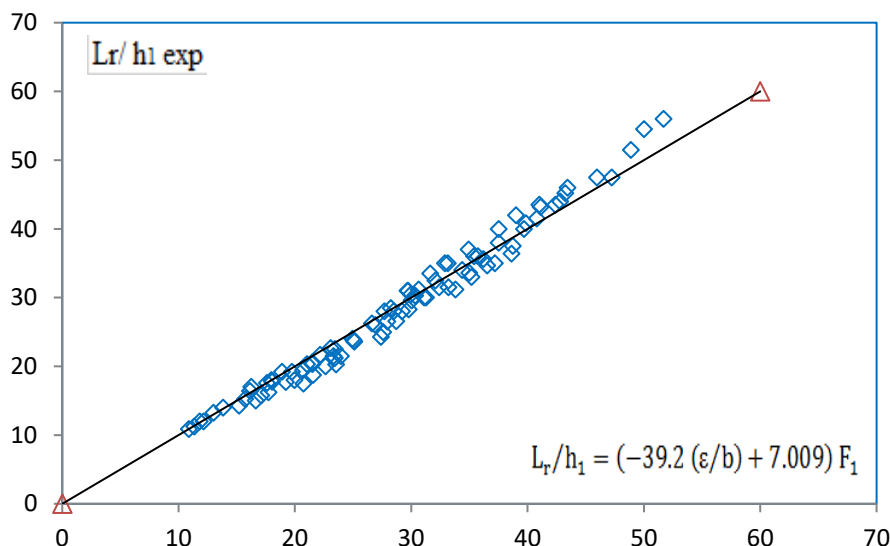
L'approche globale qui lie le nombre de Froude  $F_1$ , la rugosité relative  $\varepsilon/b$  et la longueur relative du rouleau de surface  $Lr/h$  se formule comme suit :

$$Lr / h_1 = (-39,2 * \varepsilon/b + 7,0098) F_1 \quad (3.3)$$

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

La figure (3.10) montre aussi que la relation globale  $Lr / h_1 = f(\varepsilon / b, F_1)$  ajuste avec une bonne corrélation de toutes les mesures expérimentales obtenues, pour le lit mineur. Ainsi ces dernières suivent clairement la première bissectrice qui justifie la fiabilité de cette approche globale obtenue.





**Figure 3.10:** Représentation de la longueur relative du rouleau de surface  $L_r/h_1$  avec  $f(\epsilon/b, F_1)$ .

(□) Les mesures expérimentales obtenues du ressaut hydraulique formé avec lit rugueux.

De plus, les erreurs relatives entre les mesures issues de l'équation globale d'ajustement (3.3) et les mesures expérimentales  $L_r/h_1$  sont évalués et mentionnées au tableau (3.6), ces écarts montrent que l'approche globale obtenue est fiable, car la majorité des écarts sont inférieures à 5%.

**Tableau 3.6:** Récapitulation de l'erreur relative entre  $L_r/h_1$  expérimentale et  $L_r/h_1$  d'ajustements pour le lit mineur.

$L_r/h_{1relation}$	$L_r/h_{1Exp}$	$(\Delta L_r) / L_r$ (%)	$L_r/h_{1relation}$	$L_r/h_{1Exp}$	$(\Delta L_r) / L_r$ (%)
11,340	11,250	0,790	27,680	28,000	-1,158
12,154	12,000	1,263	30,035	29,600	1,447
12,986	13,250	-2,032	30,633	31,200	-1,850
13,837	14,000	-1,180	29,737	31,000	-4,248
15,209	14,250	6,308	31,614	33,500	-5,964
15,719	15,250	2,985	23,539	20,286	13,821
16,235	17,000	-4,715	27,569	25,000	9,319
10,883	10,857	0,238	28,479	28,000	1,681
11,802	12,000	-1,674	29,663	31,000	-4,509
16,131	16,400	-1,667	32,897	35,000	-6,393
17,600	17,600	0,001	35,395	36,000	-1,710

**Tableau 3.6 (suite) :** Ecart relatifs entre  $L_r/h_1$  expérimentale et  $L_r/h_1$  d'ajustement pour le lit mineur

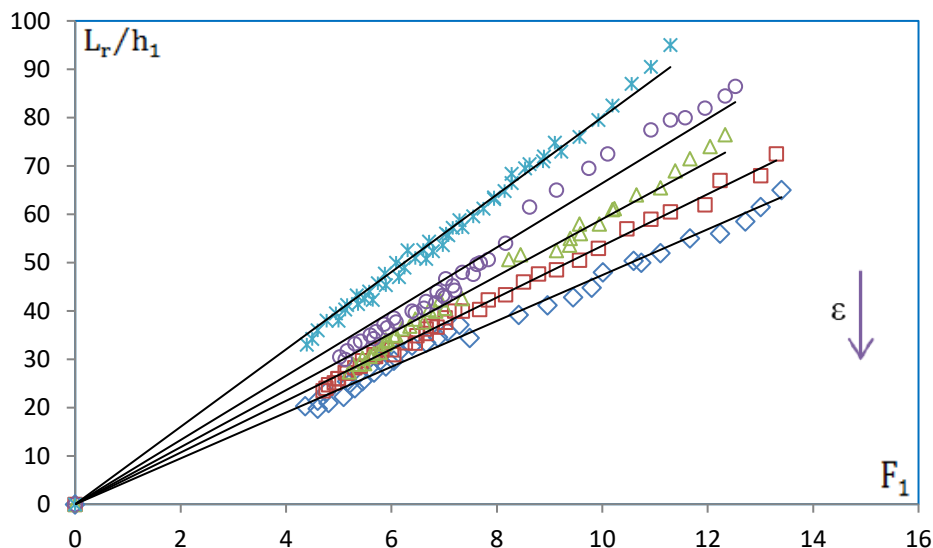
$L_r/h_{1relation}$	$L_r/h_{1Exp}$	$(\Delta L_r) / L_r$ (%)	$L_r/h_{1relation}$	$L_r/h_{1Exp}$	$(\Delta L_r) / L_r$ (%)
18,893	19,200	-1,625	37,522	38,000	-1,273
23,416	22,500	3,914	39,691	40,000	-0,779
27,942	26,500	5,159	41,011	43,500	-6,068
29,193	28,000	4,085	42,794	44,000	-2,818
31,103	30,000	3,546	45,975	47,500	-3,318
32,399	31,500	2,774	31,275	30,000	4,077
34,375	34,000	1,092	33,209	31,500	5,147
35,715	36,000	-0,799	35,182	33,000	6,201
17,986	18,000	-0,077	37,192	35,000	5,893
21,032	20,333	3,320	38,724	37,500	3,160
19,734	19,200	2,707	40,798	41,500	-1,721
23,325	21,500	7,823	42,377	43,500	-2,650
24,933	24,000	3,742	43,441	46,000	-5,891
26,909	26,000	3,380	47,233	47,500	-0,566
28,255	28,500	-0,868	48,890	51,500	-5,339
29,967	30,500	-1,779	50,005	54,500	-8,989
32,065	32,500	-1,356	51,694	56,000	-8,330
33,132	35,000	-5,638	33,797	31,200	7,684
34,936	37,000	-5,909	34,983	33,600	3,953
37,514	40,000	-6,627	36,182	35,600	1,609
39,014	42,000	-7,653	38,621	36,400	5,750
16,644	15,000	9,877	39,860	40,800	-2,358
17,106	15,750	7,925	41,112	43,200	-5,079
17,728	16,250	8,335	43,227	45,200	-4,563
18,041	17,750	1,615	36,518	34,667	5,069
19,223	17,714	7,847	27,394	24,286	11,346

**Tableau 3.6 (suite et fin) :** Ecart relatifs entre  $L_r/h_1$  expérimentale et  $L_r/h_1$  d'ajustement pour le lit mineur

$L_r/h_{1relation}$	$L_r/h_{1Exp}$	$(\Delta L_r) / L_r$ (%)	$L_r/h_{1relation}$	$L_r/h_{1Exp}$	$(\Delta L_r) / L_r$ (%)
20,710	19,429	6,189	28,713	26,571	7,458
21,468	20,571	4,177	29,783	28,286	5,026
19,962	18,000	9,828	30,323	30,286	0,121
21,500	20,333	5,426	20,730	17,500	15,580
22,171	21,667	2,273	21,570	18,750	13,074
23,075	22,667	1,771	22,636	20,000	11,645
23,441	21,200	9,559	23,938	21,500	10,183
25,108	23,600	6,006	25,041	23,750	5,154
			26,612	26,250	1,361

**III.2.1.2.2. Etude de la variation de la longueur relative du rouleau de surface  $L_r/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  dans le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm.**

Comme nous l'avons fait avec le lit mineur, nous avons tracé le graphique qui montre la variation du nombre de Froude  $F_1$  avec la longueur relative du rouleau de surface  $L_r/h_1$  (la figure 3.11) pour cinq valeurs de rugosités relatives  $\epsilon/b$  pour le lit majeur.



**Figure 3.11:** Représentation de la longueur relative de rouleau de surface  $L_r/h_1$  variant avec le nombre de Froude  $F_1$ , pour cinq rugosités différentes testées " $\epsilon$ " : (□) 12 mm ; (◻) 10 mm ; (△) 08 mm ; (○) 06 mm et (\*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.

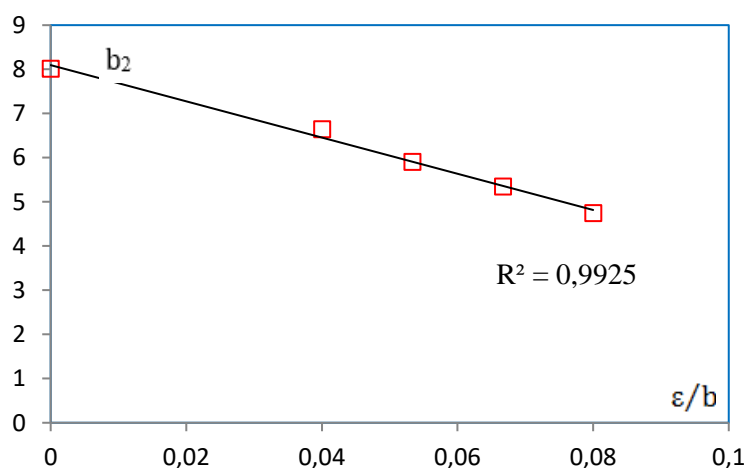
On remarque cinq allures de points distincts correspond chacune une rugosité fixée. D'autre part, la corrélation des mesures expérimentales du ressaut avec lit rugueux pour le lit majeur, montre également que pour chaque rugosité " $\varepsilon$ " correspond une allure linéaire de la forme  $Lr/h_1 = b_2 (F_1)$ . Cette analyse montre clairement que la longueur relative de rouleau  $Lr/h_1$  de surface s'accroît proportionnellement avec l'accroissement du nombre de Froude  $F_1$  et ce pour les rugosités testées.

On remarque aussi pour un nombre de Froude  $F_1$  fixé la longueur relative du rouleau de surface  $Lr/h_1$  démunie avec l'accroissement de la rugosité relative  $\varepsilon / b$  testée expérimentalement ce qui montre clairement l'effet de réduction des caractéristiques du ressaut hydraulique.

Le tableau ci-dessous récapitule les coefficients  $b_2$ .

**Tableau 3.7:** Coefficients  $b_2$  des Courbes d'ajustements.

$\varepsilon / b$	Coefficient $b_2$	$R^2$
0,08	4.744	0,989
0,067	5.346	0,996
0,053	5.899	0,987
0,04	6.642	0,973
0	8.008	0,992



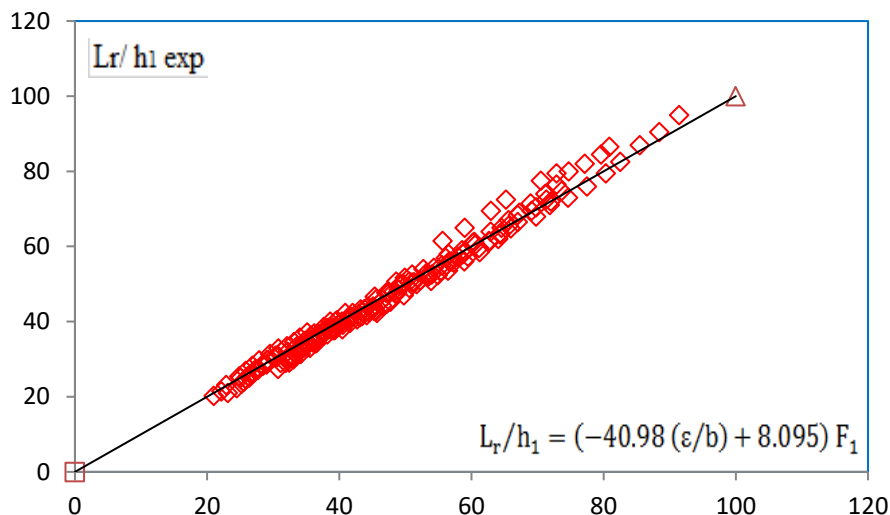
**Figure 3.12:** Représentation du coefficient " $b_2$ " avec la rugosité relative  $\varepsilon/b$  dans le lit majeur.

La corrélation de valeurs ( $b_2$ ,  $\varepsilon / b$ ) indiquée au tableau (3.7) a permis d'obtenir avec une corrélation bonne l'approche linéaire suivante :  $b_2 = -40.983 (\varepsilon / b) + 8.095$ . L'équation liant le nombre de Froude  $F_1$ , la rugosité relative  $\varepsilon/b$  et la longueur relative de rouleau de surface  $Lr/h_1$ , pour le lit majeur est la suivante :

$$L_r / h_1 = (-40.983 (\varepsilon / b) + 8.095) F_1 \tag{3.4}$$

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

La figure (3.13) montre clairement la relation  $L_r / h_1 = f (\varepsilon / b, F_1)$  ajustée avec une bonne corrélation de toutes les mesures expérimentales. Ces dernières suivent nettement la première bissectrice justifiant la fiabilité de la relation générale obtenue.



**Figure 3.13:** Représentation graphique de la longueur relative de roulement  $L_r / h_1$  expérimental avec l'équation globale  $f (\varepsilon / b, F_1)$ . (□) Les points expérimentaux du ressaut formé dans le lit majeur avec lit mineur rugueux. (—) Première bissectrice.

En outre, les erreurs relatives entre les mesures issues de l'équation globale d'ajustement (3.4) et celles expérimentales  $L_r / h_1$  sont exposées au tableau (3.8), en but de montrer la fiabilité de l'approche expérimentale obtenue. Le tableau (3.8), montre clairement que la majorité des écarts relatifs sont dans la plupart à 5%.

**Tableau 3.8:** Récapitulation des écarts relatifs entre  $L_r / h_1$  d'ajustements et celles  $L_r / h_1$  expérimentales pour le lit majeur.

$L_r / h_1$ relation	$L_r / h_1$ Exp	$(\Delta L_r) / L_r$ (%)	$L_r / h_1$ relation	$L_r / h_1$ Exp	$(\Delta L_r) / L_r$ (%)
23,158	21,000	9,318	56,666	56,000	1,176
24,520	22,250	9,257	58,762	58,000	1,298
25,558	24,000	6,097	60,457	61,200	-1,228
26,259	25,500	2,889	53,980	52,500	2,741
27,321	27,250	0,258	55,524	55,000	0,945

**Tableau 3.8 (suite) :** Récapitulation des écarts relatifs entre  $Lr/h_1$  d'ajustements et celles  $Lr/h_1$  expérimentales pour le lit majeur.

$Lr/h_{1relation}$	$Lr/h_{1Exp}$	$(\Delta Lr) / Lr$ (%)	$Lr/h_{1relation}$	$Lr/h_{1Exp}$	$(\Delta Lr) / Lr$ (%)
28,397	28,500	-0,364	56,562	58,000	-2,542
29,122	29,750	-2,158	60,245	61,000	-1,254
21,024	20,286	3,512	62,922	64,000	-1,713
22,154	21,429	3,272	65,638	65,500	0,210
22,917	23,143	-0,984	67,286	69,000	-2,548
24,864	25,429	-2,269	68,947	71,500	-3,703
25,858	26,857	-3,866	71,183	74,000	-3,957
26,864	28,286	-5,294	72,876	76,500	-4,974
27,882	29,714	-6,570	32,405	30,500	5,879
29,539	31,429	-6,398	33,326	31,750	4,730
30,801	32,857	-6,674	34,256	33,250	2,938
32,082	33,429	-4,198	34,959	33,750	3,460
33,162	34,571	-4,251	36,142	35,000	3,159
34,035	35,714	-4,935	36,857	35,750	3,005
35,136	37,143	-5,712	37,819	37,250	1,504
25,095	25,000	0,379	39,032	38,500	1,364
36,070	34,400	4,630	33,062	30,000	9,262
40,536	39,200	3,296	36,550	34,286	6,195
43,165	41,200	4,552	38,199	36,571	4,261
45,510	42,800	5,954	39,311	37,714	4,063
47,210	44,800	5,105	41,284	40,000	3,110
48,240	48,000	0,497	42,712	40,571	5,012
51,023	50,400	1,220	44,157	41,714	5,531
51,726	50,000	3,337	45,324	42,857	5,443
53,500	52,000	2,803	46,501	44,286	4,764
56,197	55,000	2,130	41,663	39,667	4,792

**Tableau 3.8 (suite) :** Récapitulation des écarts relatifs entre  $Lr/h_1$  d'ajustements et celles  $Lr/h_1$  expérimentales pour le lit majeur.

$Lr/h_{1relation}$	$Lr/h_{1Exp}$	$(\Delta Lr) / Lr (\%)$	$Lr/h_{1relation}$	$Lr/h_{1Exp}$	$(\Delta Lr) / Lr (\%)$
58,938	56,000	4,985	43,000	42,000	2,325
61,255	58,500	4,498	44,351	44,000	0,791
62,660	61,500	1,851	45,373	46,667	-2,852
64,549	65,000	-0,699	47,440	48,000	-1,180
25,224	23,500	6,834	49,186	49,667	-0,977
25,785	24,750	4,014	50,598	50,667	-0,135
26,729	26,000	2,729	52,741	54,000	-2,387
27,493	27,250	0,884	45,031	43,200	4,066
28,458	28,250	0,730	46,265	45,200	2,302
29,237	29,750	-1,754	48,765	47,600	2,390
30,420	31,000	-1,907	49,609	50,000	-0,789
31,217	32,000	-2,509	55,644	61,500	-10,524
25,517	24,000	5,946	58,971	65,000	-10,224
26,377	25,143	4,680	62,933	69,500	-10,435
26,811	26,000	3,024	65,235	72,500	-11,136
27,685	27,143	1,959	70,515	77,500	-9,905
29,014	28,571	1,525	72,905	79,500	-9,045
30,590	30,571	0,061	74,715	80,000	-7,073
32,194	32,000	0,602	77,152	82,000	-6,284
33,590	33,429	0,481	79,614	84,500	-6,137
34,769	34,857	-0,255	80,855	86,500	-6,982
35,721	36,286	-1,581	35,569	33,000	7,224
36,201	36,857	-1,814	36,398	34,250	5,901
37,652	38,571	-2,443	37,232	36,000	3,310
38,630	40,000	-3,547	38,637	38,000	1,649
32,425	31,000	4,395	40,059	39,500	1,396
34,611	33,333	3,691	41,788	41,250	1,288

**Tableau 3.8 (suite) :** Récapitulation des écarts relatives entre  $Lr/h_1$  d'ajustements et celles  $Lr/h_1$  expérimentales pour le lit majeur.

$Lr/h_{1relation}$	$Lr/h_{1Exp}$	$(\Delta Lr) / Lr$ (%)	$Lr/h_{1relation}$	$Lr/h_{1Exp}$	$(\Delta Lr) / Lr$ (%)
35,721	35,333	1,086	43,248	43,250	-0,005
36,843	36,667	0,479	40,469	38,000	6,100
37,692	37,667	0,068	41,457	40,286	2,826
39,410	40,000	-1,498	43,458	41,429	4,669
41,153	40,333	1,991	44,469	42,571	4,268
42,033	42,333	-0,714	45,148	44,000	2,543
43,813	43,333	1,096	46,516	45,714	1,724
45,618	46,000	-0,837	47,551	47,714	-0,343
47,140	47,667	-1,117	49,293	50,000	-1,434
48,989	48,500	0,998	51,056	52,571	-2,969
51,332	50,500	1,622	45,717	42,333	7,401
53,233	53,000	0,439	47,725	45,333	5,011
56,128	57,000	-1,554	49,761	47,000	5,549
58,579	59,000	-0,719	50,584	49,000	3,131
60,564	60,500	0,106	52,242	51,000	2,377
64,092	62,000	3,264	53,497	52,667	1,553
65,624	67,000	-2,097	54,340	54,333	0,012
69,768	68,000	2,534	57,323	55,667	2,889
71,343	72,500	-1,621	59,486	57,333	3,618
31,143	29,000	6,883	53,918	50,800	5,783
32,216	30,250	6,103	54,932	52,400	4,610
33,519	31,250	6,770	56,465	53,600	5,074
34,177	32,500	4,907	56,979	56,000	1,719
34,839	34,000	2,409	58,012	57,200	1,400
35,952	35,000	2,649	59,051	58,800	0,425
30,748	27,429	10,796	61,147	59,600	2,531

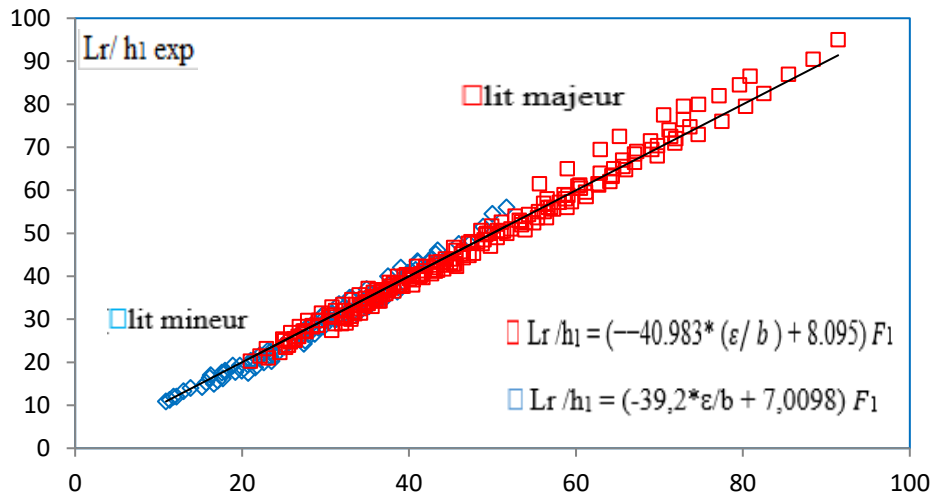


**Tableau 3.8 (suite et fin) :** Récapitulation des écarts relatives entre  $L_r/h_1$  d'ajustements et celles  $L_r/h_1$  expérimentales pour le lit majeur.

$L_r/h_{1relation}$	$L_r/h_{1Exp}$	$(\Delta L_r) / L_r$ (%)	$L_r/h_{1relation}$	$L_r/h_{1Exp}$	$(\Delta L_r) / L_r$ (%)
32,463	29,143	10,227	62,736	61,200	2,448
34,208	31,429	8,126	64,337	63,200	1,768
34,713	33,143	4,523	65,952	64,800	1,747
35,729	34,857	2,439	67,037	68,400	-2,034
37,530	36,857	1,793	69,773	70,400	-0,899
39,097	37,714	3,537	71,987	72,000	-0,017
40,420	40,000	1,038	73,664	74,800	-1,543
41,488	40,571	2,209	64,337	63,500	1,301
43,380	42,571	1,863	67,037	66,500	0,800
31,929	29,000	9,173	69,085	69,500	-0,601
33,083	30,667	7,303	71,848	71,000	1,181
35,135	33,667	4,179	74,647	73,000	2,207
36,626	36,333	0,798	77,482	76,000	1,913
38,137	38,333	-0,515	80,351	79,500	1,060
39,668	40,333	-1,676	82,526	82,500	0,032
40,908	42,333	-3,484	85,456	87,000	-1,807
48,607	50,667	-4,238	88,420	90,500	-2,353
49,932	51,667	-3,473	91,417	95,000	-3,920

La figure (3.14) note clairement la variation de la longueur relative du rouleau de surface  $L_r/h_1$  expérimentale en fonction de l'équation empirique  $f(\varepsilon/b, F_1)$  du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée.

Cette figure indique la comparaison entre les mesures expérimentales de la longueur relative de rouleau  $L_r/h_1$  et celles issues des relations globales empiriques obtenues pour les deux lits du canal rectangulaire de section composée.



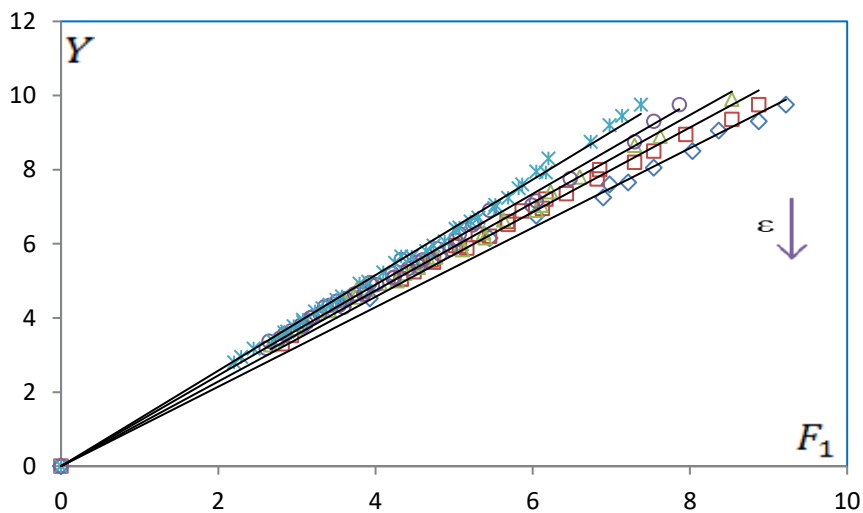
**Figure 3.14:** Représentation de l'équation générale  $f(\epsilon/b, F_1)$  avec la longueur relative du rouleau de surface  $L_r/h_1$  expérimentale pour les deux cas (□ lit mineur ; □ lit majeur).

On déduit qu'à partir de cette figure, l'effet réducteur de la rugosité sur la longueur de rouleau de surface est perceptible au lit mineur que celui du lit majeur.

### III.2.2. La variation du rapport $Y$ ( $h_2/h_1$ ) en fonction du nombre de Froude $F_1$

#### III.2.2.1. Rapport des hauteurs caractéristiques du ressaut $Y$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ dans le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ) cm.

La figure (3.15) expose la représentation graphique de la variation de  $Y$  qui varie en fonction du Froude  $F_1$  incident pour cinq rugosités équivalentes :  $\epsilon = 0$  mm ;  $\epsilon = 06$  mm ;  $\epsilon = 08$  ;  $\epsilon = 10$  mm, et  $\epsilon = 12$  mm.



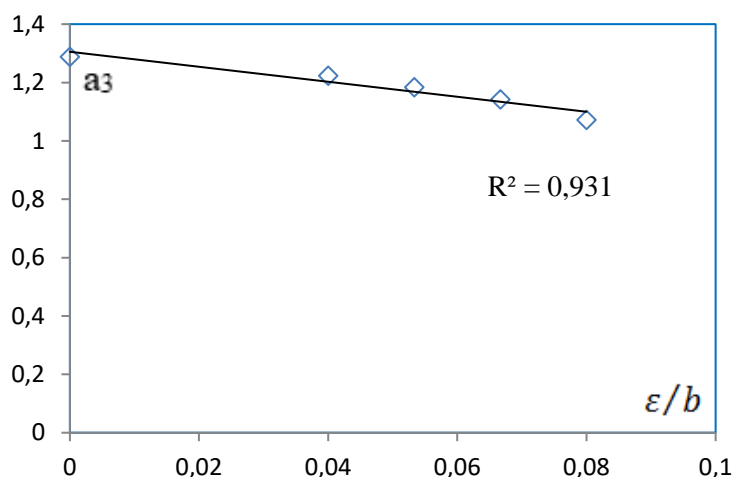
**Figure 3.15:** Présentation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut  $h_2/h_1$  avec le nombre de Froude, pour cinq rugosités différentes de " $\epsilon$ " : (◇) 12 mm ; (□) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; (O) 06 mm et (\*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.

On observe cinq nuages de points distincts, chacun correspondant à une rugosité constante. De plus, l'analyse des points de mesure expérimentale du ressaut à fond rugueux, montre que chaque rugosité «  $\varepsilon$  » correspond à une courbe de type linéaire de forme suivante :  $Y = a_3 (F_1)$ .

L'analyse de ces résultats montre que le rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  augmente avec le nombre de Froude  $F_1$ , et ceci pour chaque valeur de rugosité fixée. En outre, une augmentation de la rugosité relative  $\varepsilon / b$  entraîne une diminution du rapport des hauteurs conjuguées.

**Tableau 3.9:** Coefficient  $a_3$  des courbes d'ajustements.

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



**Figure 3.16:** Représentation du coefficient "  $a_3$  " avec la rugosité relative  $\varepsilon/b$  imposée au lit mineur.

L'ajustement des couples de valeurs ( $a_3$ ,  $\varepsilon/b$ ) du tableau ci-dessus a permis d'aboutir avec une bonne corrélation par la méthode des moindres carrés, la relation linéaire suivante :

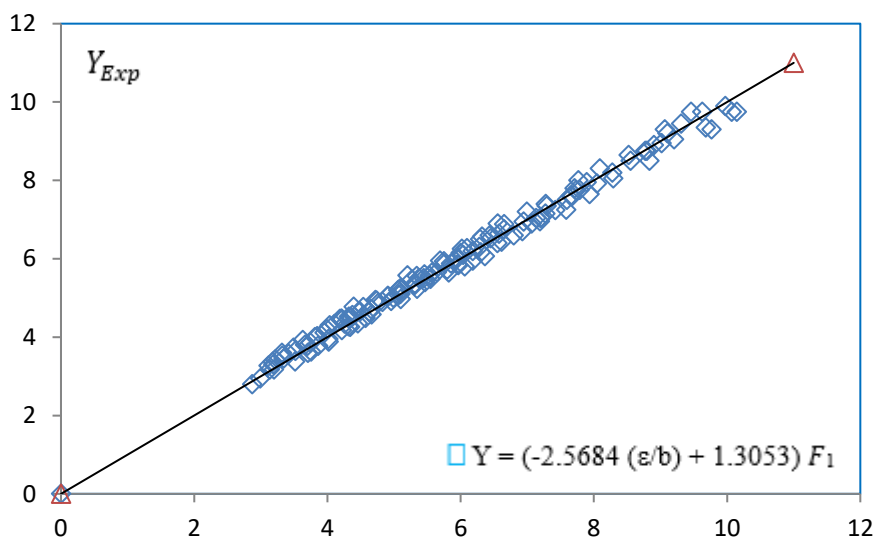
$a_3 = -2.5684 \cdot \varepsilon/b + 1.3053$ , avec  $R^2 = 0,931$ . Cette équation est présentée par la figure (3.16).

L'équation liant le rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$ , le nombre de Froude  $F_1$  et la rugosité relative  $\varepsilon/b$  s'écrit alors :

$$Y = (-2.5684\varepsilon/b + 1.3053) F_1 \quad (3.5)$$

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

La figure (3.17) montre que la relation  $Y = f(\varepsilon / b, F_1)$  ajuste avec une bonne Corrélation pour le lit mineur, en majorités des points de mesures expérimentales obtenues et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice en justifiant la fiabilité de l’approche obtenue.



**Figure 3.17:** Représentation du rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  avec la fonction de  $f(\varepsilon / b, F_1)$ .

(□) Les points expérimentaux du ressaut hydraulique formé avec lit rugueux.

(—) Première bissectrice.

En conséquence de ces résultats aboutis, on constate que les erreurs relatives entre les mesures  $Y$  issues de la relation générale (3.5) et celles  $Y_{exp}$  du ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composée avec lit mineur rugueux sont estimés et présentés au tableau (3.10). Le tableau (3.10), montre que les écarts relatifs ne dépassent pas 5%, ce qui justifie la fiabilité des mesures expérimentale et celle de l’approche globale.

**Tableau 3.10:** Ecart relatifs entre  $h_2/h_1$  expérimentale et  $h_2/h_1$  d’ajustements pour le lit mineur.

Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)	Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)
4,321	4,525	-4,732	3,420	3,571	-4,441
7,674	7,600	0,967	3,748	3,857	-2,920
5,998	6,150	-2,535	3,958	4,114	-3,953
6,652	6,750	-1,475	4,258	4,343	-1,984
7,587	7,250	4,444	4,346	4,514	-3,883
7,937	7,650	3,620	4,655	4,714	-1,266
8,293	8,050	2,927	5,064	5,200	-2,686

**Tableau 3.10 (suite) :** Ecart relatifs entre  $h_2/h_1$  expérimentale et  $h_2/h_1$  d'ajustement pour le lit mineur.

Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)	Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)
8,835	8,500	3,796	5,203	5,571	-7,087
9,204	9,050	1,668	3,665	3,800	-3,691
9,765	9,300	4,762	3,810	4,000	-4,977
10,145	9,750	3,897	4,107	4,333	-5,506
3,187	3,300	-3,531	4,360	4,500	-3,207
3,321	3,525	-6,137	4,828	4,900	-1,491
5,748	5,933	-3,232	5,095	5,100	-0,104
4,907	5,040	-2,702	5,311	5,333	-0,411
5,093	5,240	-2,895	5,531	5,567	-0,640
5,343	5,560	-4,062	5,754	5,867	-1,959
5,856	5,880	-0,415	6,093	6,267	-2,842
6,184	6,200	-0,259	6,323	6,567	-3,847
6,451	6,520	-1,071	4,319	4,280	0,911
6,654	6,880	-3,403	4,629	4,640	-0,248
6,996	7,200	-2,917	5,073	5,080	-0,134
7,769	8,000	-2,975	5,465	5,400	1,190
4,907	5,050	-2,906	5,799	5,720	1,360
5,375	5,500	-2,334	7,198	7,040	2,201
5,694	5,950	-4,500	7,786	7,760	0,332
6,019	6,250	-3,836	4,723	4,950	-4,814
6,434	6,600	-2,578	5,448	5,500	-0,945
6,944	6,950	-0,084	5,951	5,850	1,701
7,291	7,350	-0,804	6,036	6,100	-1,053
7,733	7,750	-0,218	6,295	6,500	-3,264
8,275	8,200	0,903	6,556	6,900	-5,244
8,550	8,500	0,585	7,271	7,150	1,664
9,015	8,950	0,726	8,773	8,750	0,258

**Tableau 3.10 (suite) :** Ecart relatifs entre  $h_2/h_1$  expérimentale et  $h_2/h_1$  d'ajustement pour le lit mineur.

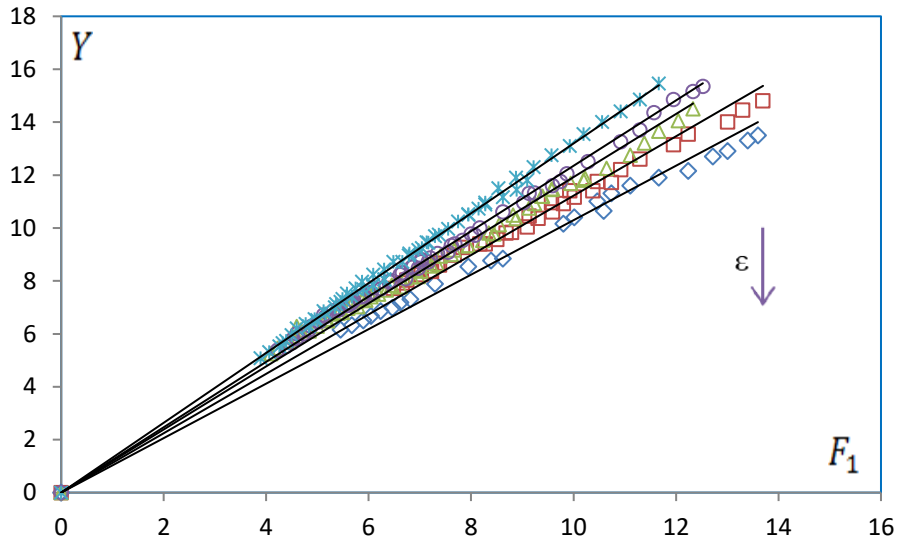
Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)	Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)
9,681	9,350	3,416	9,065	9,300	-2,598
10,068	9,750	3,158	9,459	9,750	-3,081
3,114	3,275	-5,176	5,823	5,650	2,972
3,215	3,425	-6,526	6,183	5,950	3,771
3,318	3,600	-8,512	6,550	6,400	2,297
3,491	3,725	-6,713	6,925	6,700	3,245
3,631	3,925	-8,090	7,210	7,050	2,218
4,212	4,475	-6,254	7,596	7,500	1,265
4,393	4,771	-8,605	7,890	7,950	-0,759
3,991	4,200	-5,247	8,088	8,300	-2,618
4,187	4,467	-6,683	8,794	8,750	0,503
4,538	4,767	-5,045	9,103	9,200	-1,068
4,742	4,933	-4,026	9,310	9,450	-1,499
5,108	5,200	-1,805	9,625	9,750	-1,300
5,267	5,467	-3,788	7,191	6,960	3,210
4,376	4,560	-4,201	7,421	7,240	2,446
4,992	5,000	-0,160	7,655	7,600	0,714
5,310	5,360	-0,944	8,048	7,920	1,596
5,569	5,640	-1,277	6,062	5,800	4,328
5,965	5,840	2,096	6,366	6,067	4,701
6,302	6,160	2,253	6,612	6,433	2,707
6,576	6,640	-0,974	6,799	6,600	2,930
7,135	7,040	1,337	2,870	2,800	2,428
7,278	7,400	-1,681	2,991	2,943	1,616
7,710	7,800	-1,168	3,197	3,171	0,814
5,455	5,600	-2,657	3,755	3,629	3,358
5,948	6,000	-0,869	4,022	3,886	3,382

**Tableau 3.10 (suite et fin) :** Ecart relatifs entre  $h_2/h_1$  expérimentale et  $h_2/h_1$  d'ajustement pour le lit mineur.

Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)	Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)
6,285	6,300	-0,239	4,341	4,257	1,931
7,065	6,900	2,331	4,574	4,486	1,928
8,524	8,650	-1,482	5,100	4,971	2,529
8,902	8,900	0,028	5,346	5,229	2,196
9,972	9,900	0,722	5,545	5,486	1,073
3,136	3,175	-1,247	5,646	5,657	-0,202
3,344	3,450	-3,166	3,515	3,375	3,991
3,521	3,650	-3,663	3,705	3,600	2,841
3,701	3,775	-2,000	3,860	3,775	2,193
3,847	4,025	-4,626	4,016	3,950	1,646
4,032	4,300	-6,639	4,215	4,175	0,939
4,220	4,450	-5,440	4,457	4,350	2,399
4,489	4,650	-3,598	4,662	4,575	1,872
4,762	4,875	-2,371	4,955	4,925	0,604
3,180	3,371	-6,016			

**III.2.2.2. Etude de la variation du rapport  $Y = h_2/h_1$  avec le nombre de Froude  $F_1$  dans le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm.**

Cette figure présente la variation du rapport  $Y = h_2/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour cinq rugosités relative  $\epsilon/b$  pour le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm.



**Figure 3.18:** Représentation du rapport  $Y = h_2/h_1$  en fonction du nombre de Froude dans le lit majeur, pour cinq rugosités différentes testées «  $\epsilon$  ».  
 (◇) 12 mm ; (□) 10 mm ; (△) 08 mm ; (○) 06 mm et (\*) 0 mm.  
 (—) Courbes d'ajustements.

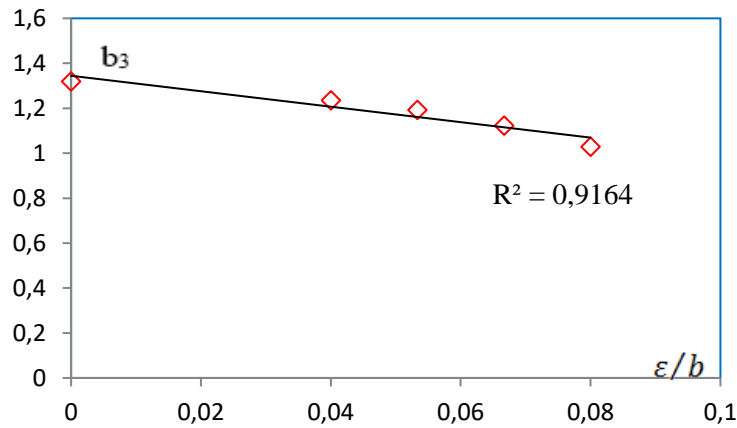
On constate de cette figure ci-dessus cinq allures de points distincts dont chacun dépend d'une rugosité bien déterminée. Par ailleurs, l'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut à fond rugueux pour le lit majeur, montre que chaque valeur de rugosité " $\epsilon$ " correspond une courbe de type linéaire de la forme :  $h_2/h_1 = b_3 (F_1)$ .

Le tableau (3.11) regroupe les valeurs du coefficient  $b_3$ .

**Tableau 3.11:** Coefficient  $b_3$  des courbes d'ajustements.

$\epsilon / b$	Coefficient $b_3$	$R^2$
0,08	1.029	0,987
0,067	1.122	0,986
0,053	1.192	0,987
0,04	1.235	0,996
0	1.319	0,998





**Figure 3.19:** Présentation du coefficient "  $b_3$ " variant avec la rugosité relative ( $\epsilon/b$ ) dans le lit majeur. L'ajustement des couples de valeurs ( $b_3, \epsilon/b$ ) du tableau ci-dessus a donné une relation justifiée par la bonne corrélation issue par la méthode des moindres carrées. Elle s'écrit comme suit :

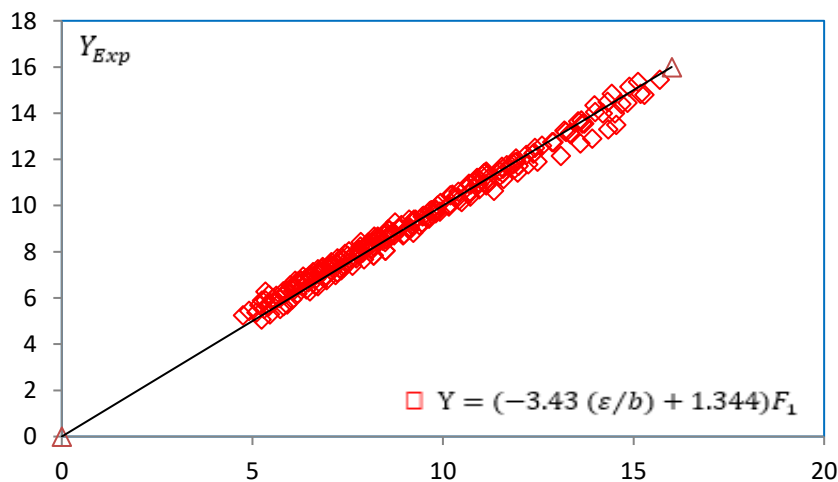
$b_3 = -3.4394*\epsilon/b + 1.3445$ , avec  $R^2 = 0,9164$ . Cette équation est présentée par la figure (3.19).

Ainsi, l'approche liant le nombre de Froude  $F_1$ , la rugosité relative ( $\epsilon/b$ ) et le rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  s'écrit alors :

$$Y = (-3.4394*\epsilon/b + 1.3445) F_1 \tag{3.6}$$

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

La figure (3.20) illustre que la relation  $Y = f(\epsilon/b, F_1)$  ajuste avec une bonne corrélation pour le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm, la majorité de mesures expérimentales obtenues et ces dernières suivent exactement la première bissectrice justifiant la fiabilité les mesures expérimentales.



**Figure 3.20:** Présentation du rapport  $Y_{exp}$  et la fonction  $f(\epsilon/b, F_1)$ . (◻) Les points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé à fond rugueux dans le lit majeur. (—) Première bissectrice.

De plus, les écarts relatifs entre les mesures expérimentales  $Y_{exp}$  et celles obtenues par la relation d'ajustement (3.6) sont évaluées et indiquées au tableau (3.12).

Le tableau (3.12), récapitule les écarts relatifs qui sont pour la plupart inférieurs à 5%, ce qui justifie la fiabilité de la relation explicite obtenue (3.6).

**Tableau 3.12:** Ecart relatifs entre  $h_2/h_1$  expérimentale et  $h_2/h_1$  d'ajustements pour le lit majeur.

Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)	Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)
5,831	6,150	-5,469	14,318	14,500	-1,268
6,067	6,325	-4,253	5,099	5,375	-5,413
6,306	6,500	-3,078	5,303	5,525	-4,193
6,467	6,675	-3,218	5,426	5,650	-4,125
6,670	6,850	-2,698	5,551	5,825	-4,944
6,917	6,975	-0,845	5,718	6,000	-4,933
7,083	7,175	-1,305	5,887	6,275	-6,592
7,292	7,300	-0,112	6,058	6,450	-6,479
7,802	7,886	-1,067	6,230	6,650	-6,745
8,501	8,533	-0,381	6,404	6,850	-6,970
8,978	8,767	2,349	6,535	6,975	-6,732
9,219	8,833	4,185	6,756	7,100	-5,090
10,484	10,160	3,088	6,890	7,250	-5,227
10,712	10,400	2,916	7,070	7,400	-4,674
11,330	10,640	6,093	7,296	7,550	-3,475
11,194	11,000	1,735	5,456	5,800	-6,311
11,487	11,300	1,625	5,551	6,000	-8,097
11,880	11,600	2,361	5,838	6,143	-5,214
12,479	11,900	4,643	6,082	6,457	-6,167
13,088	12,150	7,167	6,180	6,714	-8,638
13,603	12,700	6,636	6,529	6,886	-5,467
13,915	12,900	7,291	6,832	7,143	-4,544

**Tableau 3.12 (suite) :** Ecart relatifs entre  $h_2/h_1$  expérimentale et  $h_2/h_1$  d'ajustement pour le lit majeur.

Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)	Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)
14,334	13,300	7,214	7,141	7,429	-4,033
14,545	13,500	7,187	7,349	7,743	-5,365
7,231	7,714	-6,687	7,717	7,971	-3,293
7,429	7,914	-6,534	7,984	8,229	-3,059
7,529	8,029	-6,641	8,254	8,514	-3,149
7,830	8,229	-5,085	8,473	8,714	-2,854
8,034	8,371	-4,203	8,693	8,857	-1,893
8,239	8,600	-4,383	6,520	6,900	-5,821
7,839	8,433	-7,584	6,756	7,067	-4,597
8,196	8,667	-5,743	7,115	7,400	-4,009
8,558	8,967	-4,770	7,541	7,700	-2,109
8,742	9,267	-6,007	7,788	8,000	-2,719
9,112	9,400	-3,163	8,038	8,300	-3,258
9,487	9,567	-0,839	8,291	8,533	-2,928
9,804	9,833	-0,303	8,482	8,800	-3,753
8,064	8,360	-3,665	8,868	9,033	-1,863
9,236	9,400	-1,772	9,195	9,333	-1,510
9,689	9,800	-1,143	9,458	9,533	-0,791
10,149	10,040	1,078	9,658	9,767	-1,124
10,382	10,360	0,213	9,859	10,000	-1,430
10,695	10,600	0,890	8,114	8,080	0,414
10,932	10,920	0,109	8,418	8,480	-0,739
11,170	11,160	0,094	8,648	8,720	-0,828
11,572	11,400	1,484	9,116	9,080	0,393
11,978	11,720	2,152	9,273	9,400	-1,365
10,188	10,450	-2,571	9,752	9,720	0,325
10,676	10,950	-2,571	10,898	10,960	-0,567

**Tableau 3.12 (suite) :** Ecart relatifs entre  $h_2/h_{1\text{expérimentale}}$  et  $h_2/h_{1d}$  d'ajustement pour le lit majeur.

Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)	Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)
11,071	11,400	-2,973	11,149	11,320	-1,530
11,673	11,750	-0,661	11,572	11,600	-0,240
12,183	12,200	-0,144	11,914	12,040	-1,055
12,595	12,600	-0,036	10,402	10,600	-1,907
13,329	13,150	1,343	11,024	11,300	-2,507
13,648	13,550	0,716	11,764	11,750	0,121
14,509	14,000	3,511	12,412	12,500	-0,711
14,837	14,450	2,609	13,182	13,250	-0,519
15,278	14,800	3,128	13,628	13,700	-0,525
4,751	5,250	-10,506	13,967	14,350	-2,744
4,906	5,450	-11,094	14,422	14,850	-2,967
5,181	5,700	-10,021	14,882	15,150	-1,798
5,340	5,900	-10,482	15,114	15,350	-1,559
5,623	6,100	-8,483	9,589	9,450	1,446
5,340	6,275	-17,504	9,912	9,750	1,639
5,994	6,550	-9,281	10,682	10,500	1,702
6,119	6,750	-10,312	11,130	10,950	1,617
6,330	6,925	-9,404	11,470	11,500	-0,261
6,586	7,125	-8,188	11,929	11,900	0,242
6,715	7,250	-7,967	12,394	12,300	0,755
6,845	7,350	-7,375	12,864	12,750	0,888
7,064	7,550	-6,883	13,341	13,100	1,804
5,249	5,886	-12,131	13,702	13,550	1,107
5,432	6,143	-13,086	14,188	14,000	1,326
5,804	6,286	-8,292	14,680	14,400	1,909
6,041	6,486	-7,356	15,178	14,850	2,160

**Tableau 3.12 (suite) :** Ecart relatifs entre  $h_2/h_{1\text{expérimentale}}$  et  $h_2/h_{1\text{d'ajustement}}$  pour le lit majeur.

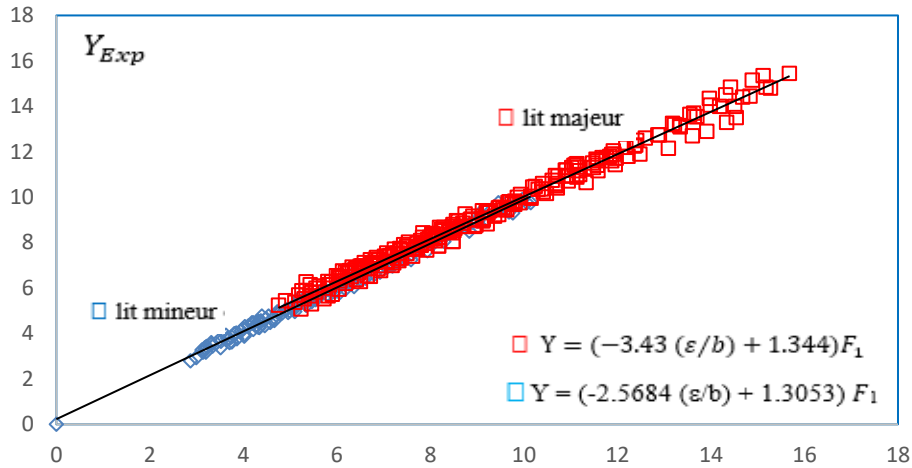
Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)	Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)
6,378	6,800	-6,612	15,681	15,450	1,473
6,721	7,029	-4,573	8,952	8,720	2,591
6,820	7,257	-6,405	9,120	8,960	1,758
7,020	7,400	-5,414	9,375	9,160	2,291
7,374	7,657	-3,842	9,460	9,240	2,327
7,682	7,771	-1,168	9,632	9,440	1,990
7,942	8,143	-2,535	9,804	9,680	1,266
8,151	8,371	-2,699	10,152	9,960	1,893
8,523	8,629	-1,237	10,416	10,240	1,689
6,273	6,767	-7,864	10,682	10,520	1,515
6,500	6,967	-7,179	10,950	10,720	2,100
6,903	7,267	-5,265	11,130	10,880	2,246
7,196	7,500	-4,223	11,584	11,160	3,662
7,493	7,833	-4,541	11,952	11,440	4,283
7,794	8,100	-3,927	12,230	11,800	3,518
8,038	8,400	-4,510	6,502	6,286	3,330
8,284	8,667	-4,625	6,719	6,514	3,046
8,595	8,933	-3,942	6,883	6,857	0,376
8,909	9,167	-2,888	7,215	7,114	1,398
9,228	9,333	-1,142	7,383	7,314	0,933
9,550	9,533	0,176	7,496	7,514	-0,245
9,811	9,767	0,448	7,723	7,714	0,113
8,099	8,160	-0,756	7,895	7,971	-0,970
8,395	8,560	-1,965	8,184	8,229	-0,544
8,846	9,000	-1,740	8,477	8,429	0,567
9,228	9,320	-0,998	8,713	8,714	-0,012
9,693	9,800	-1,103	9,132	9,029	1,137

**Tableau 3.12 (suite et fin) :** Ecart relatifs entre  $h_2/h_1$  expérimentale et  $h_2/h_1$  d'ajustement pour le lit majeur.

Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)	Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y$ (%)
9,929	10,120	-1,928	5,234	5,075	3,038
10,245	10,480	-2,289	5,455	5,300	2,839
10,727	10,920	-1,800	5,724	5,525	3,474
10,889	11,200	-2,856	5,814	5,650	2,828
11,134	11,480	-3,110	5,906	5,725	3,057
11,546	11,680	-1,165	6,043	5,950	1,540
11,879	11,880	-0,012	6,182	6,200	-0,297
10,305	10,350	-0,435	6,415	6,375	0,621
10,606	10,750	-1,359	6,651	6,550	1,518
10,909	11,200	-2,664	6,938	6,775	2,350
11,113	11,450	-3,030	7,180	7,000	2,512
11,837	11,800	0,311	7,327	7,200	1,734
12,363	12,250	0,912	7,623	7,400	2,930
12,896	12,750	1,135	7,924	7,675	3,138
13,220	13,200	0,152	8,177	7,850	3,996
13,547	13,650	-0,764	8,484	8,050	5,116
13,986	14,050	-0,458	8,177	7,850	3,996
			8,484	8,050	5,116

La figure (3.21) montre la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées expérimentale en fonction de  $f$  ( $\varepsilon/b$ ,  $F_1$ ) du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée.

Cette dernière indique la comparaison entre les mesures expérimentales du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées et celles obtenues des relations globales empiriques obtenues pour les deux lits du canal rectangulaire de section composée.



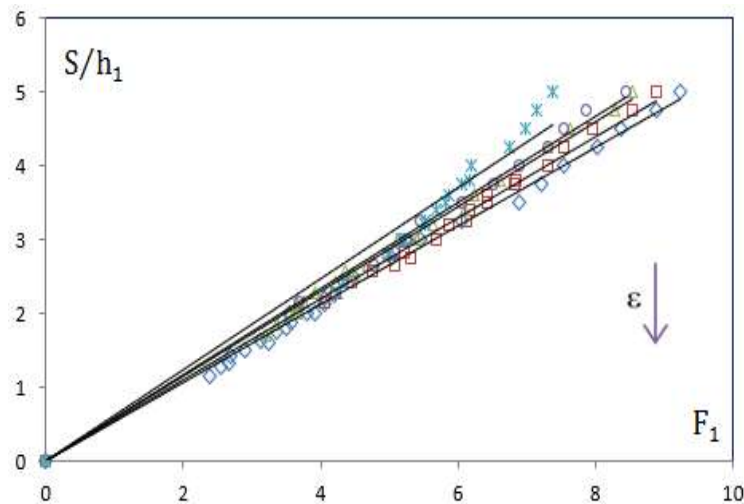
**Figure 3.21:** Variation du rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  expérimentale en fonction de  $f(\epsilon/b, F_1)$  pour les deux cas ( $\square$  lit mineur ;  $\square$  lit majeur).

On déduit de cette figure, que le rapport des hauteurs conjuguées dans la section composée à fond rugueux est moindre au lit mineur que celui du lit majeur, ainsi cette section a un effet négatif dans le lit majeur que celui au lit mineur.

### III.2.3. La variation de la hauteur relative du seuil $S/h_1$ en fonction du Froude incident $F_1$

#### III.2.3.1 Etude de la variation du seuil $S/h_1$ avec le nombre de Froude $F_1$ dans le lit mineur ( $0 < h_2 < 20$ ) cm.

La figure (3.22) présente la variation de la hauteur relative du seuil  $S/h_1$  avec le nombre de Froude  $F_1$  incident et ceci pour cinq valeurs de rugosités équivalentes :  $\epsilon = 0$  mm ;  $\epsilon = 06$  mm ;  $\epsilon = 08$  mm ;  $\epsilon = 10$  mm, et  $\epsilon = 12$  mm.



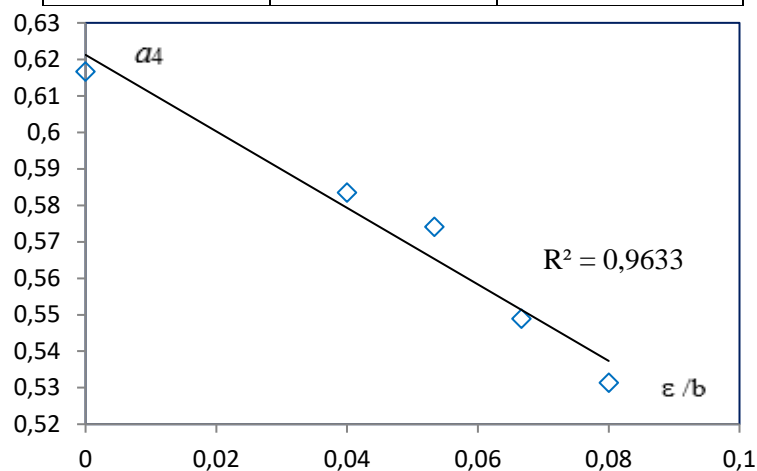
**Figure 3.22:** Présentation de la hauteur relative  $s/h_1$  avec le nombre de Froude, pour cinq valeurs différentes de " $\epsilon$ " : ( $\diamond$ ) 12 mm ; ( $\square$ ) 10 mm ; ( $\triangle$ ) 08 mm ; ( $\circ$ ) 06 mm et ( $*$ ) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.

On note cinq nuages de points perceptibles, correspondant chacun à une rugosité fixée. Par ailleurs, l'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut à fond rugueux, montre qu'à chaque rugosité " $\varepsilon$ ", correspond une courbe de type linéaire de la forme  $Y = a_4(F_1)$ .

L'analyse des mesures expérimentales montre que la hauteur relative du seuil  $s/h_1$  s'accroît proportionnellement avec le nombre de Froude  $F_1$  et ceci pour toutes les rugosités. En outre, la diminution de la hauteur relative  $s/h_1$  engendre l'accroissement relatif de la rugosité  $\varepsilon/b$  testée. Récapitulation des valeurs du coefficient  $a_4$  au tableau (3.13)

**Tableau 3.13:** Coefficient  $a_4$  des courbes d'ajustements.

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



**Figure 3.23:** Représentation du coefficient " $a_4$ " avec la rugosité relative  $\varepsilon/b$  dans le lit mineur.

L'ajustement des couples de valeurs ( $a_4, \varepsilon/b$ ) du tableau ci-dessus a permis d'aboutir par la méthode des moindres carrés avec une bonne corrélation l'équation linéaire suivante :

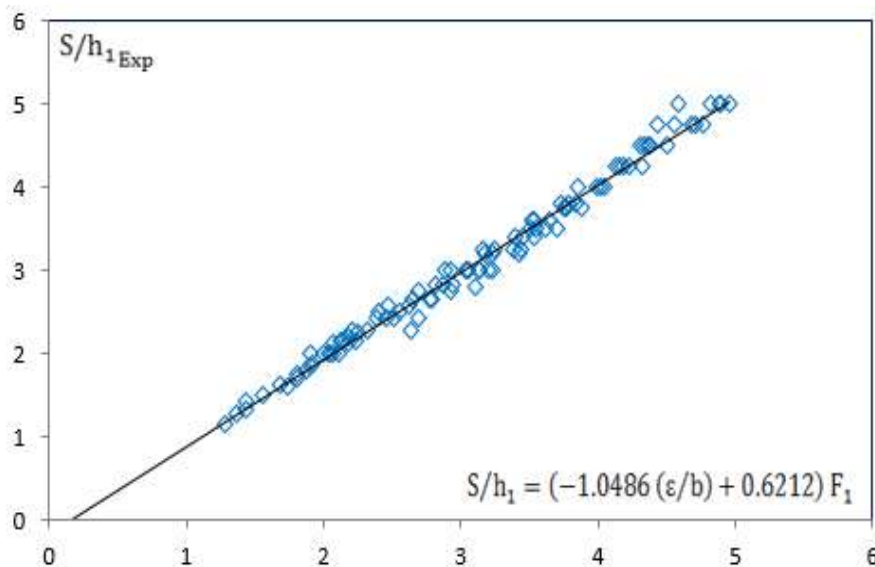
$a_4 = -1.0486 * \varepsilon/b + 0.6212$ , avec  $R^2 = 0,9633$ . Cette équation est montrée par la figure (3.23). L'équation liant le nombre de Froude  $F_1$ , la rugosité relative  $\varepsilon/b$  et la hauteur relative  $S/h_1$ , se formule comme suit :

$$S/h_1 = (-1.0486 * \varepsilon/b + 0.6212) F_1 \tag{3.7}$$

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



La figure (3.24) montre ainsi que la relation  $S/h_1 = f(\epsilon/b, F_1)$  ajuste avec une bonne Corrélation pour le lit mineur en majorités des points de mesures expérimentales obtenues et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice.



**Figure 3.24:** Présentation de la hauteur relative  $S/h_1$  avec l’approche globale  $f(\epsilon/b, F_1)$ .

(□) Les mesures expérimentales du ressaut hydraulique formé avec lit rugueux.

(—) Première bissectrice.

En outre, on note que les écarts relatifs entre les mesures expérimentales  $S/h_{1exp}$  et celles obtenues par la relation d’ajustement (3.7) dans le lit mineur sont évaluées et montrées au tableau (3.14). Le tableau (3.14), montre que les écarts relatifs sont dans la plupart inférieurs à 5%, ce qui justifie la fiabilité l’approche générale obtenue.

**Tableau 3.14:** Ecart relatifs entre  $S/h_{1exp}$  expérimentale et  $S/h_1$  d’ajustements pour le lit mineur.

$S/h_{1relation}$	$S/h_{1exp.}$	$\Delta S/h_1$ (%)	$S/h_{1relation}$	$S/h_{1exp.}$	$\Delta S/h_1$ (%)
1,686	1,625	3,623	1,900	1,857	2,274
1,802	1,750	2,864	2,063	2,000	3,063
1,920	1,875	2,324	2,125	2,143	-0,821
2,110	2,000	5,215	2,209	2,286	-3,459
2,181	2,125	2,558	2,380	2,429	-2,028
2,252	2,250	0,101	2,467	2,571	-4,217
1,282	1,143	10,874	2,548	2,500	1,888

**Tableau 3.14 (suite) :** Ecart relatifs entre  $S/h_1$  expérimentale et  $S/h_1$  d'ajustement pour le lit mineur.

$S/h_{1relation}$	$S/h_{1exp.}$	$\Delta S/h_1$ (%)	$S/h_{1relation}$	$S/h_{1exp.}$	$\Delta S/h_1$ (%)
1,368	1,286	6,039	2,652	2,667	-0,549
1,439	1,429	0,691	2,811	2,833	-0,806
1,427	1,333	6,546	2,891	3,000	-3,767
1,552	1,500	3,348	3,049	3,000	1,598
1,742	1,600	8,145	3,181	3,200	-0,589
1,875	1,800	4,025	3,452	3,400	1,504
2,040	2,000	1,966	3,521	3,600	-2,251
2,181	2,200	-0,882	3,730	3,800	-1,880
1,903	2,000	-5,119	2,002	2,000	0,081
2,398	2,500	-4,273	4,124	4,250	-3,067
2,697	2,750	-1,964	4,307	4,500	-4,486
2,929	3,000	-2,415	4,681	4,750	-1,470
3,249	3,250	-0,042	4,824	5,000	-3,644
3,705	3,500	5,543	2,135	2,143	-0,349
3,876	3,750	3,261	2,506	2,429	3,089
4,050	4,000	1,234	2,772	2,667	3,783
4,315	4,250	1,506	2,935	2,833	3,466
4,495	4,500	-0,116	3,046	3,000	1,504
4,769	4,750	0,398	3,032	3,000	1,052
4,955	5,000	-0,913	3,158	3,250	-2,916
2,238	2,143	4,231	3,502	3,500	0,064
2,321	2,286	1,538	3,768	3,750	0,482
2,449	2,429	0,842	3,995	4,000	-0,134
2,623	2,571	1,968	4,226	4,250	-0,579
2,793	2,667	4,536	4,366	4,500	-3,066
2,872	2,833	1,357	4,556	4,750	-4,260
3,135	3,000	4,312	4,895	5,000	-2,155

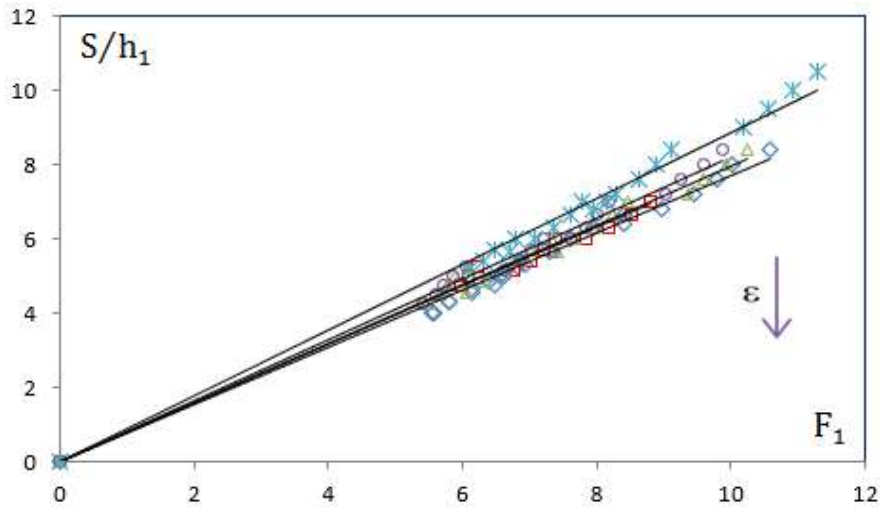
**Tableau 3.14 (suite et fin) :** Ecart relatifs entre  $S/h_1$  expérimentale et  $S/h_1$  d'ajustement pour le lit mineur.

$S/h_{1relation}$	$S/h_{1exp.}$	$\Delta S/h_1$ (%)	$S/h_{1relation}$	$S/h_{1exp.}$	$\Delta S/h_1$ (%)
3,234	3,200	1,041	3,432	3,250	5,304
3,400	3,400	0,002	3,616	3,500	3,204
3,535	3,600	-1,835	3,756	3,750	0,155
3,776	3,800	-0,643	3,850	4,000	-3,893
2,925	2,750	5,993	4,186	4,250	-1,524
3,127	3,000	4,062	4,333	4,500	-3,853
3,375	3,250	3,701	4,432	4,750	-7,177
3,544	3,500	1,232	4,582	5,000	-9,133
3,758	3,750	0,223	3,100	2,800	9,692
4,022	4,000	0,536	3,207	3,000	6,448
4,155	4,250	-2,278	3,423	3,200	6,513
4,382	4,500	-2,703	3,533	3,400	3,758
4,705	4,750	-0,959	3,644	3,600	1,200
4,893	5,000	-2,185	3,831	3,800	0,814
2,037	2,000	1,839	3,237	3,000	7,308
2,074	2,125	-2,482	2,640	2,286	13,407
1,801	1,714	4,809	2,687	2,429	9,633

### III.2.3.2. Etude de la variation de la hauteur relative du seuil $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ dans le lit majeur ( $20 < h_2 < 50$ ) cm.

nous avons tracé le graphique de la hauteur relative  $S/h_1$  qui varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour cinq valeurs de rugosité relative  $\varepsilon/b$  pour le lit majeur.

On remarque cinq allures de points distincts dont chacune dépend d'une rugosité fixée. En outre, la corrélation des mesures expérimentales du ressaut évolué en canal rectangulaire composée pour le lit majeur, montre aussi que pour chaque rugosité " $\varepsilon$ " correspond une relation linéaire de la forme suivante :  $S/h_1 = b_4(F_1)$ .

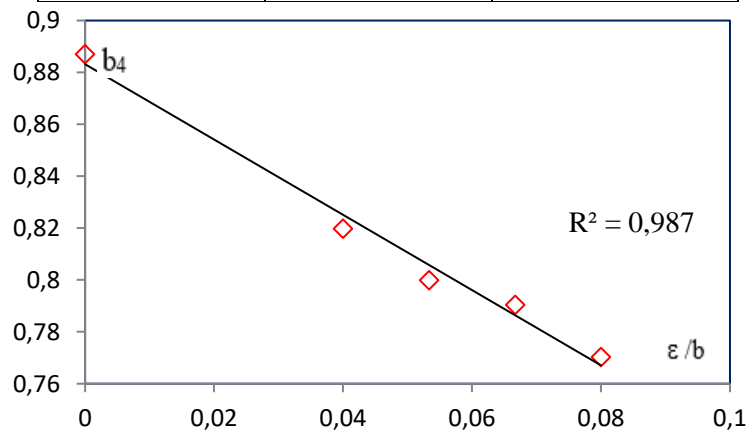


**Figure 3.25:** Variation de la hauteur relative  $S/h_1$  en fonction du nombre de Froude dans le lit majeur, pour cinq rugosités différentes testées " $\epsilon$ ". ( $\diamond$ ) 12 mm ; ( $\square$ ) 10 mm ; ( $\triangle$ ) 08 mm ; ( $\circ$ ) 06 mm et ( $*$ ) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.

L'analyse de ces mesures expérimentales montre que la hauteur relative  $s/h_1$  s'accroît proportionnellement avec le nombre de Froude  $F_1$  et ceci pour toutes les rugosités. Par ailleurs, l'augmentation relative de la rugosité  $\epsilon/b$  provoque la diminution de la hauteur relative  $s/h_1$ , ceci est dû à la rugosité imposée au fond du canal qui provoque la compacité du ressaut hydraulique. Le tableau (3.15) regroupe les valeurs du coefficient  $b_4$ .

**Tableau 3.15:** Coefficient  $b_4$  des courbes d'ajustements.

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



**Figure 3.26:** Présentation du coefficient " $b_4$ " avec la rugosité relative  $\epsilon/b$  dans le lit majeur.

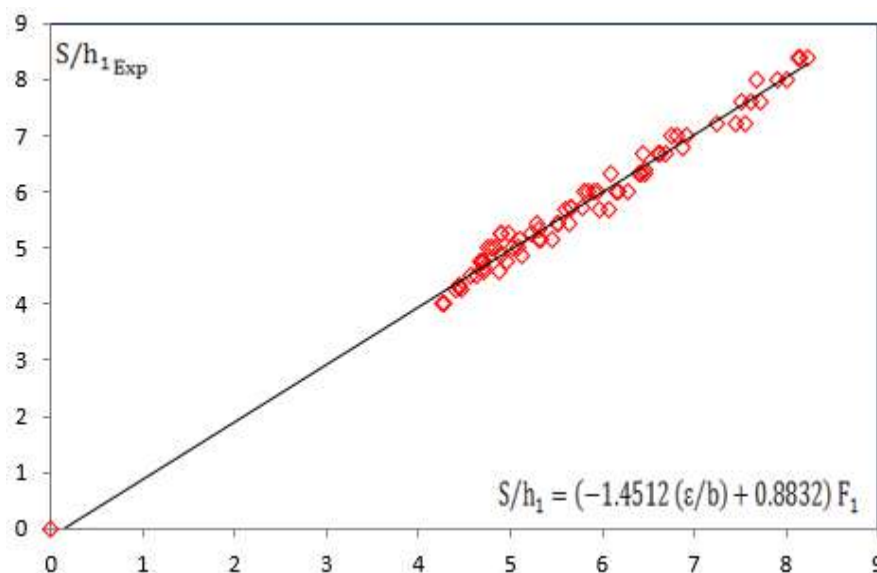
L'ajustement des couples de valeurs ( $b_4$ ,  $\varepsilon/b$ ) du tableau ci-dessus a donné une relation justifiée et corrélée par la méthode des moindres carrés. Elle s'écrit comme suit :

$b_4 = -1.4512 * \varepsilon/b + 0.8832$ , avec  $R^2 = 0,987$ . Cette équation est indiquée par la figure (3.26). Ainsi, L'équation liant le nombre de Froude  $F_1$ , la rugosité relative ( $\varepsilon/b$ ) et la hauteur relative  $S/h_1$  est la suivante :

$$S/h_1 = (-1.4512 * \varepsilon/b + 0.8832) F_1 \quad (3.8)$$

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

La figure (3.27) montre que la relation  $S/h_1 = f(\varepsilon/b, F_1)$  ajuste avec une bonne Corrélation pour le lit majeur. Cette fiabilité est montrée par la majorité des points de mesures expérimentales qui tournent autour de la première bissectrice.



**Figure 3.27:** Variation de la hauteur relative  $S/h_1$  en fonction de  $f(\varepsilon/b, F_1)$ . (□) Les mesures expérimentales du ressaut hydraulique formé avec lit rugueux

(—) Première bissectrice.

Par ailleurs, les écarts relatifs entre les valeurs des mesures expérimentales  $S/h_{1Exp}$  et celles obtenues par la relation d'ajustement (3.8) dans le lit majeur sont évalués et mentionnés au tableau (3.16).

Le tableau (3.16), récapitule que les écarts relatifs sont dans la plupart inférieure à 5%, ce qui justifie la fiabilité des mesures expérimentales et celle de l'approche obtenue.

**Tableau 3.16:** Ecart relatifs entre  $S/h_1$  expérimentale et  $S/h_1$  d'ajustements

pour le lit majeur.

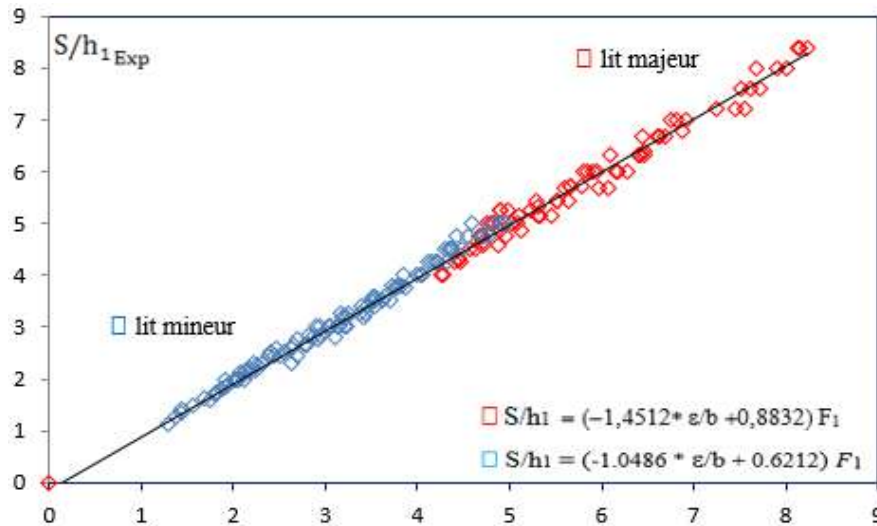
$S/h_{1relation}$	$S/h_{1Exp}$	$(\Delta S/h_1) / (S/h_1) (\%)$	$S/h_{1relation}$	$S/h_{1Exp}$	$(\Delta S/h_1) / (S/h_1) (\%)$
4,468	4,250	4,887	6,425	6,333	1,427
4,619	4,500	2,587	6,690	6,667	0,343
4,711	4,750	-0,829	6,913	7,000	-1,261
4,834	5,000	-3,437	4,960	4,750	4,243
4,989	5,250	-5,233	5,080	5,000	1,565
5,459	5,143	5,796	5,230	5,250	-0,389
5,644	5,429	3,816	4,278	4,000	6,507
5,793	5,714	1,361	4,441	4,286	3,489
5,944	6,000	-0,949	4,704	4,571	2,826
6,064	5,667	6,546	4,906	4,857	0,986
6,287	6,000	4,562	5,109	5,143	-0,654
6,467	6,333	2,071	5,281	5,429	-2,786
6,604	6,667	-0,953	4,257	4,000	6,035
6,741	7,000	-3,840	4,446	4,333	2,536
7,452	7,200	3,378	4,715	4,667	1,035
7,623	7,600	0,307	5,030	5,000	0,592
7,913	8,000	-1,105	5,310	5,333	-0,434
8,146	8,400	-3,113	5,596	5,667	-1,266
4,393	4,250	3,254	5,845	6,000	-2,660
4,571	4,500	1,546	6,097	6,333	-3,880

**Tableau 3.16 (suite et fin) :** Ecart relatifs entre  $S/h_1$  expérimentale et  $S/h_1$  d'ajustement pour le lit majeur.

$S/h_{1relation}$	$S/h_{1Exp}$	$(\Delta S/h_1) / (S/h_1) (\%)$	$S/h_{1relation}$	$S/h_{1Exp}$	$(\Delta S/h_1) / (S/h_1) (\%)$
4,660	4,750	-1,923	6,439	6,667	-3,542
4,751	5,000	-5,249	6,456	6,400	0,865
4,902	5,250	-7,090	6,875	6,800	1,084
4,872	4,571	6,168	7,248	7,200	0,662
5,118	4,857	5,089	7,519	7,600	-1,080
5,331	5,143	3,534	7,683	8,000	-4,128
5,512	5,429	1,506	8,126	8,400	-3,372
5,657	5,714	-1,008	5,378	5,143	4,374
5,915	6,000	-1,433	5,570	5,429	2,546
5,965	5,667	4,998	5,726	5,714	0,202
6,183	6,000	2,964	6,001	6,000	0,021
6,404	6,333	1,109	5,929	5,667	4,420
6,628	6,667	-0,583	6,254	6,000	4,064
6,809	7,000	-2,809	6,490	6,333	2,416
7,557	7,200	4,726	6,729	6,667	0,927
7,727	7,600	1,644	6,874	7,000	-1,837
8,013	8,000	0,160	7,019	6,800	3,127
8,244	8,400	-1,893	7,196	7,000	2,720
4,696	4,750	-1,157	7,314	7,200	1,558
4,785	5,000	-4,499	7,612	7,600	0,164
4,904	5,250	-7,048	7,854	8,000	-1,857
5,309	5,143	3,122	8,037	8,400	-4,516
5,521	5,429	1,681	9,004	9,000	0,044
5,665	5,714	-0,873	9,324	9,500	-1,892
5,809	6,000	-3,280	9,647	10,000	-3,659
6,164	6,000	2,660	9,974	10,500	-5,274

La représentation (3.28) ci-dessous illustre la variation de la hauteur relative  $S/h_1$  expérimentale qui varie avec la relation  $f(\varepsilon/b, F_1)$  du ressaut hydraulique évolue en canal rectangulaire de section composée.

Cette figure indique la comparaison entre les points expérimentaux de la hauteur relative  $S/h_1$  avec leurs relations globales empiriques obtenues pour les deux lits du canal rectangulaire de section composée.



**Figure 3.28:** Représentation de la hauteur relative  $S/h_1$  expérimentale et la relation  $f(\varepsilon/b, F_1)$  pour les deux cas (□ lit mineur ; □ lit majeur).

On déduit qu'à partir de cette figure, que l'effet de réduction du seuil placé en aval de l'écoulement dans le canal rectangulaire de section composée est perceptible au lit mineur que celui au lit majeur, cela est dû à la rugosité imposée au fond du canal.

### III.2.4. Rendement du ressaut

Le moyen le plus simple et le moins onéreux pour dissiper l'énergies cinétique qui peuvent créer des forces érosives à l'aval des barrages est de créer un ressaut hydraulique. Alors, L'équation générale gérant ce phénomène est celle de Bernoulli qui s'écrit entre la section amont et aval direct du ressaut comme suit :

$$H_1 = h_1 + Q^2 / (2.g.A_1^2) = h_2 + Q^2 / (2.g.A_2^2) + \Delta H \quad (3.9)$$

La formulation du rendement hydraulique  $\eta$  est de la forme suivante :

$$\eta = \Delta H / H_1 \quad ; \quad \Delta H = H_1 - H_2 \quad (3.10)$$

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



Le rendement varie entre les limites 0 et 1 ( $0 < \eta < 1$ ) :  $H_1 = \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_1$ ,  $H_2 = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_2$

On remplace  $H_1$  et  $H_2$  dans l'équation (3.9) :

$$\eta = 1 - \left[ \left( \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \right) / \left( \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \right) \right] \quad (3.11)$$

On remplace  $V_1 = Q/A_1$  et  $V_2 = Q/A_2$  l'équation (3.11) devient :

$$\eta = 1 - \left[ \left( \alpha_2 \frac{Q^2}{2gA_2^2} + h_2 \right) / \left( \alpha_1 \frac{Q^2}{2gA_1^2} + h_1 \right) \right] \quad (3.12)$$

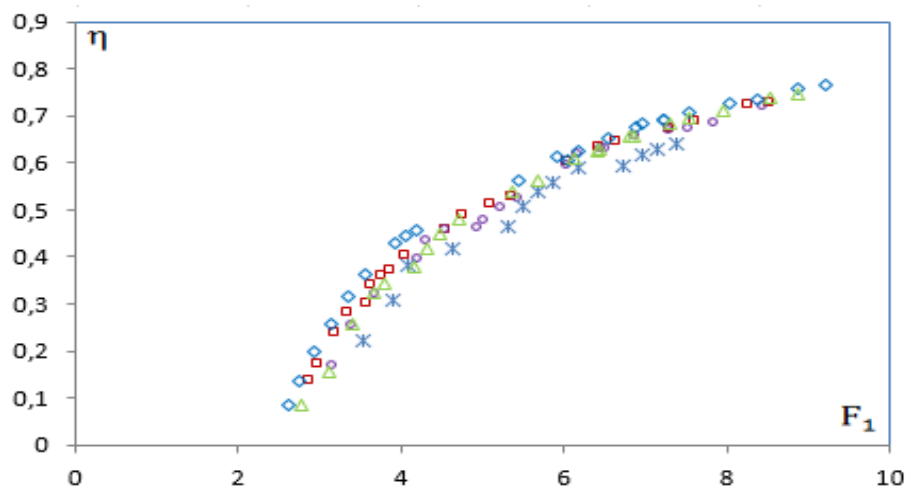
L'aire de la section amont  $A_1 = bh_1$  ; l'aire de la section aval  $A_2 = B(h_2 - h) + bh$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1$$

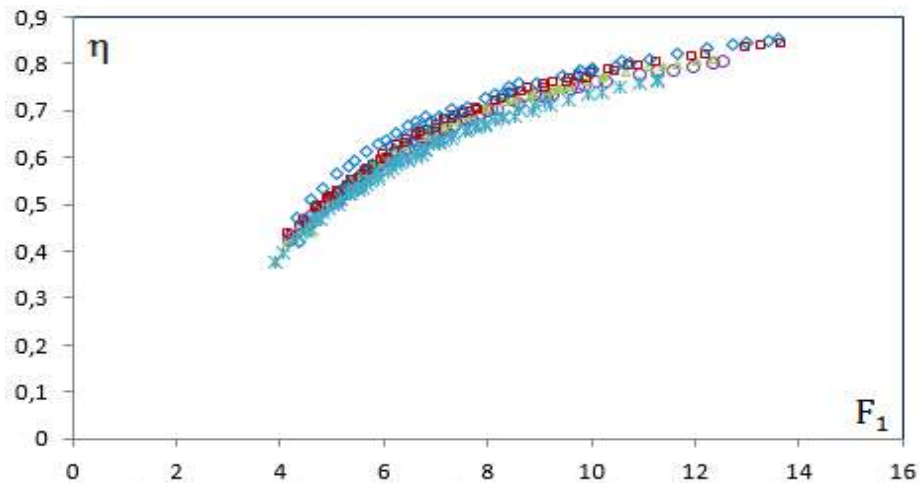
Le nombre de Froude  $F_1 = Q/\sqrt{b^2 h_1^3 g}$ . le rendement se formule par l'expressions suivante :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (3.13)$$

La représentation du rendement  $\eta$  du ressaut hydraulique avec le du nombre de Froude incident de l'écoulement pour les deux sections du canal d'expérimentation (lit mineur et lit majeur) est représentée dans les figures 3.29 et 3.30 respectivement.



**Figure 3.29:** Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . Les motifs colorés indiquées dans la figure représentent les mesures expérimentales du ressaut en canal rectangulaire de la forme composé à fond rugueux, de rugosité relative  $\varepsilon/b$  dans le lit mineur : ( $\diamond$ ) = 12 mm ; ( $\square$ ) = 10 mm ; ( $\triangle$ ) = 08 mm ; ( $\circ$ ) = 06 mm et ( $*$ ) = 00 mm



**Figure 3.30:** Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

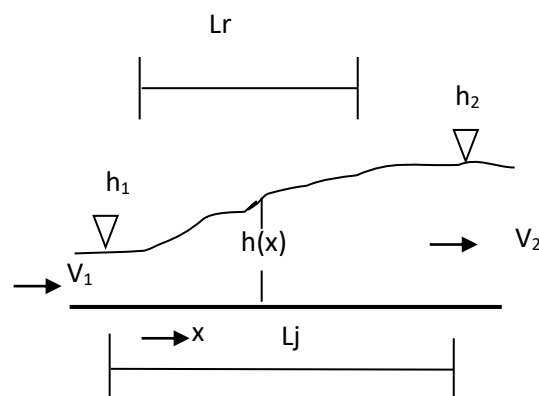
Les motifs colorés mentionnés dans la figure représentent les mesures expérimentales du ressaut en canal rectangulaire de la forme composée à fond rugueux, de rugosité relative  $\varepsilon/b$  dans le lit majeur :

$(\diamond) = 12 \text{ mm}$  ;  $(\square) = 10 \text{ mm}$  ;  $(\triangle) = 08 \text{ mm}$  ;  $(\circ) = 06 \text{ mm}$  et  $(*) = 00 \text{ mm}$

La représentation du rendement hydraulique pour les deux lits (lit mineur et celui le lit majeur) du canal d'expérimentation est montrée par les figures (3.29) et (3.30). On note que le rendement  $\eta$  s'accroît avec l'accroissement du nombre du Froude incident, en autre pour un nombre du Froude fixé  $F_1$ , le rendement  $\eta$  augmente avec l'importance de la rugosité imposée au fond du canal pour les deux cas, par conséquent la dissipation de l'énergie cinétique est significative avec l'importance de la rugosité absolue testée.

### III.2.5. Profil de surface du ressaut

L'expérience faite au niveau du laboratoire a permis de localiser le profil de surface libre du ressaut hydraulique formé qui commence à partir de sa section amont (pied du ressaut) jusqu'à sa section finale, évoluant en canal rectangulaire de forme composée avec lit mineur rugueux.

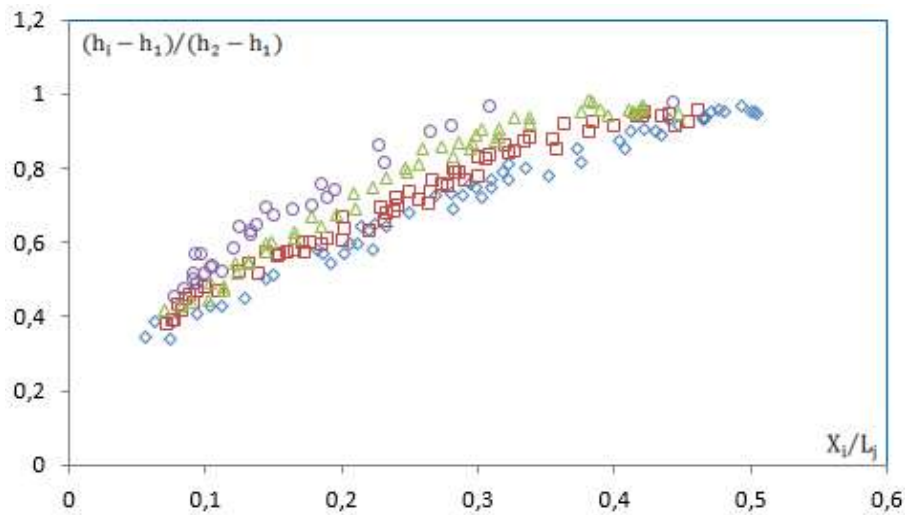


**Figure 3.31:** Schématisation du profil de surface du ressaut.

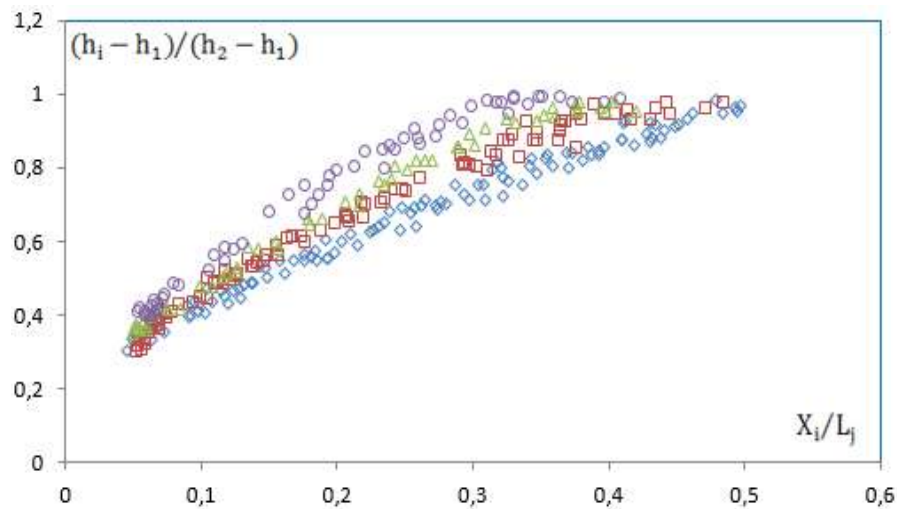
Le schéma simplifié indiqué à la Figure (3.31) montre clairement ce qui suit, la position longitudinale du ressaut  $x$  est cernée dans l'intervalle telle que  $0 \leq x \leq L_j$ , par contre la profondeur  $h(x)$  est située dans l'intervalle suivant :  $h_1 \leq h(x) \leq h_2$ ;  $h_1$  et  $h_2$  sont les hauteurs amont et aval du ressaut hydraulique.

Les caractéristiques du ressaut  $x$  et  $h(x)$  servent à définir les variables adimensionnelles  $y$  et  $X$ , telle que :  $y = (h(x) - h_1) / (h_2 - h_1)$  et  $X = x/L_j$ . Ces variables  $y$  et  $X$  sont cernées dans l'intervalle suivant :  $0 \leq X \leq 1$  et  $0 \leq y \leq 1$ .

La variation du rapport  $y$  et celui du rapport  $X$  est représentée par les Figure (3.32) et (3.33), ces figures montrent les points de mesure expérimentales pour différentes rugosités.



**Figure 3.32:** Profil de la surface libre concernant le lit mineur du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée, pour quatre rugosités différentes : (◇) 06 mm ; (□) 08 mm ; (△) 10 mm et (○) 12 mm.



**Figure 3.33:** Profil de la surface libre concernant le lit majeur du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée, pour quatre rugosités différentes : (◇) 06 mm ; (□) 08 mm ; (△) 10 mm et (○) 12 mm.

D'après les Figures (3.32) et (3.33) on constate quatre nuages de points distincts correspondant aux quatre rugosités testées. Ainsi, pour le même rapport  $x/L_j$ , la valeur  $y$  augmente avec l'augmentation de la rugosité absolue, ce qui montre clairement l'influence de la rugosité sur la diminution de la profondeur  $h_2$  et la compacité du bassin d'amortissement.

### III.3. EXEMPLE D'APPLICATION

Nous décrivons ici, un exemple d'application des relations adimensionnelles obtenues, pour le cas du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée du lit mineur rugueux, de rugosité absolue  $\varepsilon=12$  mm.

Soient :

-  $Q=30$  l/s, le débit spécifique traversant par le bassin d'amortissement de section rectangulaire de forme composée avec lit mineur rugueux (la pente nulle).

-  $h_1=4$  cm, la hauteur amont du ressaut.

- La valeur du nombre de Froude  $F_1$  est :

$$F_1^2 = Q^2 / (gb^2h^3), \text{ soit } F_1 \cong 7.98$$

- La longueur relative du ressaut est :  $L_j/h_1 = (-53.154 (\varepsilon/b) + 12.435)F_1 = 65.3$   
d'où :  $L_j \cong 261$  cm
- La hauteur relative du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de la section composée de lit mineur rugueux  $Y=h_2/h_1$  est :

$$\text{Selon l'approche expérimentale : } Y = (-3.4394*\varepsilon/b + 1.3445) F_1$$

$$Y \cong 8,53 \text{ donc } h_2 = 34,13 \text{ cm.}$$

Mais, d'après l'approche semi-théorique :  $Y = 1.444 F_1^{0.956} (1 - 4.061(\varepsilon/b))^{0.478}$ ,

$$\text{Ainsi } Y \cong 8,71 \text{ donc } h_2 = 34,86 \text{ cm}$$

D'où l'écart relatif entre les deux valeurs est :  $\Delta Y/Y \cong 2.06$  %.

- La longueur relative du rouleau du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée avec lit mineur rugueux  $L_r/h_1$  est :

$$\text{D'après l'approche expérimentale } L_r/h_1 = (-40.983 (\varepsilon/b) + 8.095) F_1$$

$L_r/h_1 = 38.43$  donc  $L_r = 154$  cm

- La hauteur de seuil pour le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée de lit mineur rugueux  $S/h_1$  est :

D'après l'approche expérimentale  $S/h_1 = (-1.4512 \cdot \varepsilon/b + 0.8832) F_1$

$S/h_1 = 6.12$  ainsi  $S = 24$  cm

### III.4. CONCLUSION

Ce chapitre résume la présentation de l'ensemble des résultats de nos expériences liées à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mine évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux.

Nous avons présenté les résultats expérimentaux qui permettent de développer des relations expérimentales adimensionnelles explicites, nous avons basé premièrement sur la variation de la longueur relative de ressaut  $L_j/h_1$  dans le lit mineur et celle du lit majeur en fonction de nombre de Froude  $F_1$  pour cinq valeurs de rugosité testées. On remarque cinq nuages de points différents correspond chacun à une valeur bien déterminée de la rugosité. Par ailleurs, la longueur relative  $L_j/h_1$  augmente avec l'accroissement de nombre de Froude et réduit avec l'augmentation de la rugosité imposée au fond du canal.

De plus, nous avons analysé expérimentalement les mesures des longueurs relatives du rouleau  $L_r/h_1$  de surface en fonction du nombre de Froude  $F_1$  incident de l'écoulement, ainsi cette analyse nous a permis d'obtenir une relation de type linéaire entre la longueur relative du rouleau et du nombre de Froude de l'écoulement pour les deux lits.

Dans un second temps, nous avons analysé la variation du rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  du ressaut en fonction de nombre de Froude  $F_1$  incident pour cinq valeurs différentes de rugosité pour les deux lits (lit mineur et lit majeur), ce qui a permis d'obtenir des approches expérimentales adimensionnelles explicites.

De plus, nous avons aussi analysé expérimentalement la variation de la hauteur relative du seuil  $S/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  dans le lit mineur et celle le lit majeur.

L'étude expérimentale a également porté sur la dissipation de l'énergie cinétique. Ceci est représenté par le rendement. Ainsi, la variation du rendement du ressaut en fonction du nombre de Froude incident montre que le ressaut dans notre canal expérimental dissipe mieux l'énergie

lorsque la rugosité est importante. La dernière partie de cette étude a porté sur le profil libre du ressaut illustrant la compacité du ressaut hydraulique.

## CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Notre travail de recherche a été divisé dans cette partie fondamentale de contribution en trois chapitres primordiaux.

Pour le premier chapitre, nous avons exposé le banc d'essai utilisé en expérimentation sous forme de 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 s'imposent au lit mineur du canal.

A travers du deuxième chapitre nous avons réalisé ce qui suit : en premier temps, nous avons décrit le banc d'essai qui a servi de réaliser l'expérimentation du ressaut hydraulique. Toutes les mesures expérimentales obtenues au niveau du laboratoire ont permis d'établir la relation de l'approche semi théorique caractérisée par les paramètres suivants :  $F_1$ ,  $Y$ ,  $Cr$ ,  $\beta$ , et  $\tau$  tels que :  $F_1$  est le nombre de Froude incident,  $Cr$  est le coefficient de frottement ou de résistance,  $\beta$  est le rapport de l'élargissement,  $\tau$  est le rapport de forme et  $Y$  est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique contrôlé. Cette approche adimensionnelle est établie à partir de la théorie d'Euler appliquée entre les deux sections du ressaut hydraulique après sa formation.

En second temps, nous avons analysé l'équation semi-théorique expérimentalement et nous avons aboutir une approche semi-théorique adimensionnelle explicite permettent de calculer le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en faisant injecter le débit volumique d'écoulement et la valeur de la rugosité absolue testée expérimentalement.

Pour le dernier chapitre de la deuxième partie, on a présenté essentiellement tous les résultats obtenus de nos expériences réalisées qui sont liées étroitement avec l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mine évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux.

Nous avons présenté les résultats expérimentaux qui permettent de développer des relations expérimentales explicites, nous nous sommes basés premièrement sur la variation de la longueur relative de ressaut  $L_j/h_1$  dans le lit mineur et celle du lit majeur variant avec le nombre de Froude  $F_1$  pour cinq valeurs de rugosité testées. On a constaté cinq allures différentes correspond chacune une valeur fixée de la rugosité. En outre, la longueur relative

$L_j/h_1$  s'accroît avec l'accroissement du nombre de Froude et s'abaisse avec l'accroissement de la rugosité imposée au fond du canal.

Ensuite, nous avons corrélié les mesures expérimentales des longueurs relatives du rouleau  $L_r/h_1$  de surface qui varient avec le nombre de Froude  $F_1$  incident, par conséquent cette analyse a permis d'avoir une approche linéaire entre la longueur relative du rouleau et du nombre de Froude pour les deux lits.

Nous avons analysé aussi la variation du rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  du ressaut en fonction de nombre de Froude  $F_1$  incident pour cinq valeurs différentes de rugosité pour les deux lits (lit mineur et lit majeur), ce qui a permis d'obtenir des approches expérimentales adimensionnelles explicites.

Une analyse expérimentale concernant la variation de la hauteur relative du seuil  $S/h_1$  en fonction du Froude  $F_1$  pour les deux lits (mineur et celui majeur) a été faite.

Finalement, L'étude expérimentale a été portée sur la dissipation de l'énergie cinétique. Ceci est montré par le rendement hydraulique.

Par conséquent, la variation du rendement  $\eta$  avec le Froude  $F_1$  montre que la dissipation d'énergie cinétique est importante par la création du ressaut hydraulique évoluant dans ce type de banc d'expérimentation, engendrée primordialement par l'importance de la rugosité imposée et testée. Le dernier volet de cette étude est porté sur le profil du ressaut hydraulique illustrant la compacité du ressaut hydraulique réalisée.

Finalement, on peut conclure que ce type du ressaut hydraulique étudié présente un effet réducteur pour les caractéristiques hydrauliques dans le lit mineur que celui au lit majeur.



# **CONCLUSION GENERALE**

---

## CONCLUSION GENERALE

Notre étude concerne la contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée avec lit mineur rugueux. Cette étude a été divisée en deux parties fondamentales :

Pour la première partie, nous avons exposé certaines des études menées par de nombreux chercheurs dans le domaine des écoulements brusquement variés tel que le ressaut hydraulique, nous avons traité quelques sujets qui sont les plus proches de notre thème d'étude, à travers lesquels nous avons pu construire une idée sur notre sujet de recherche.

A cet effet notre partie bibliographique est subdivisée en quatre chapitres principaux :

Pour le premier chapitre d'intitulé le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire, à travers lequel on l'a divisé en trois axes :

- Le ressaut hydraulique classique, concernant les travaux de *Hager (1990)*, par lequel l'auteur a démontré la caractérisation de ce type du ressaut. En premier lieu, une classification de *Peterka et Bradley* a été présentée (1957) qui se base essentiellement sur le facteur du nombre de Froude  $F_1$ . L'auteur a noté que l'utilisation de la théorie d'Euler entre les deux sections du ressaut formé, sans frottement, conduit à l'approche de *Bélanger* qui une relation entre le rapport  $Y^*$  des hauteurs conjuguées et le facteur du nombre de Froude  $F_1$ .
- Les travaux de l'auteur « *Rajaratnam en 1968* », effectué dans un canal rectangulaire avec lit rugueux, se basent sur les résultats obtenus des mesures expérimentales, et pour les différents ressauts contrôlés et créés dans le banc d'expérimentation de forme rectangulaire à pente nulle, dans lequel la rugosité imposée relative  $\varepsilon / h_1$  a été conçue entre de 0,02 et 0,43 et le nombre de Froude incident varie entre 3 et 10. Des diverses conclusions sont ainsi retenues. Par conséquent, pour un ressaut qui se forme sur un fond rugueux, le rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  varie fonction du nombre de Froude incident  $F_1$  et de la rugosité relative testées  $\varepsilon / h_1$ .  $h^*_2$  étant comme la hauteur conjuguée en aval du ressaut correspondant au ressaut hydraulique créé sur un lit lisse alors  $h_2/h^*_2$  varie seulement avec la rugosité relative testée. Il a été déduit que la longueur du ressaut hydraulique avec fond rugueux est égale approximativement la moitié que son homologue à fond lisse, pour des diverses rugosités relatives dépassant 0.10, cela apparait un avantage très significatif du ressaut hydraulique avec lit rugueux.

- Les travaux du ‘*Rajaratnam 2002*’ réalisés dans un banc d’expérimentation à fond ondulé. Ils ont noté également de bonnes performances vis-à-vis de la réduction de la profondeur aval du ressaut.

Pour le deuxième chapitre de la partie bibliographique nous avons exposé les travaux suivants :

- En premier lieu les travaux de Khattoui et Achour en 2012 liés avec le ressaut hydraulique formé en canal rectangulaire de forme composée. Une relation fonctionnelle est de forme  $\phi (Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$  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.
- En second lieu, 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.

L’étude s’est intéressée, ensuite à la variation du rapport  $Y$  qui varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour différentes ouvertures pour les deux lits du canal rectangulaire de forme composée. Il a été remarqué que ce rapport  $Y$  s’accroît avec l’augmentation du nombre de Froude  $F_1$ . Et que pour un nombre de Froude fixé  $F_1$ ,  $Y$  est plus important en lit majeur. Ils ont aussi noté que pour une série des nombres de Froude et pour différentes ouvertures testées  $h_1$ , le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée, présente deux relations expérimentales globales adimensionnelles telles que  $Y = f(F_1)$  par lesquelles on dimensionnerait les ouvrages hydrauliques.

En dernier lieu, L’étude expérimentale est consacrée à l’estimation des longueurs qui caractérisent le ressaut hydraulique. Pour chaque lit du canal, Il a été prouvé qu’une relation de type linéaire est obtenue. Finalement, les auteurs on conclure que le ressaut hydraulique qui s’évolue dans le canal rectangulaire de forme composée a pour effet réducteur à leurs caractéristiques.

Pour le troisième chapitre concernant les travaux réalisés par *M. Debabeche, S. Kateb, A. Ghomri* (2006) dans un canal triangulaire à parois rugueuses, ils ont noté, 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 a été remarquée.

En premier temps, l'étude s'est entamée par la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  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, que 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  $L_j/h_1$  par une approche expérimentale adimensionnelle obtenue (3.3).

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. Ils ont 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 (3.8)], déduite par l'analyse statistique des mesures expérimentales.

Pour le dernier et quatrième chapitre nous avons présenté les travaux effectués par « *Ghomri* » (2012) concernant l'étude expérimentale et théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal de section 'U', cette étude du ressaut a permis d'obtenir quelques résultats importants. :

A propos l'étude semi- théorique, l'auteur a démontré une relation approchée explicite en faisant remplacer à la relation semi théorique implicite en  $Y$ . Celle-ci permet de calculer le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient  $C_r$  de résistance du fond du canal en forme "U" et du nombre de Froude  $F_1$  incident de l'écoulement. Finalement, il a pu d'avoir une expression semi théorique  $f(Y, F_1, C_r)$  qui s'écrit sous la forme  $f(Y, F_1, \varepsilon/D)$ .

Pour la partie expérimentale, l'auteur a expérimenté le ressaut hydraulique évoluant dans canal en forme "U" avec lit rugueux. Cinq tapis rugueux ont été confectionnés et testées de rugosité absolue :  $\varepsilon=3,55\text{mm}$  ;  $\varepsilon=4,50\text{mm}$  ;  $\varepsilon =5,63\text{mm}$  ;  $\varepsilon=7,14\text{mm}$  et  $\varepsilon =9,11\text{mm}$ . Pour chaque rugosité absolue testée, l'expérimentation a été réalisée sous quatre ouvertures de hauteurs cernées comme suit :  $2,3\text{cm} \leq h_1 \leq 6,1\text{cm}$  avec une gamme de seuils à paroi minces. Une gamme de débit et nombre de Froude a été obtenue.

Les débits spécifiques  $Q$  sont mesurés directement, Dans tous les essais, par un débitmètre à affichage numérique.

En premier temps, un traitement a été fait concernant la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction de nombre de Froude  $F_1$  incident pour quatre valeurs de rugosité testée. Il a été constaté quatre allures de points distincts qui correspondent pour chacune à une valeur fixée de la rugosité. Par ailleurs, le nombre de Froude s'accroît avec l'accroissement de

la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut cependant la longueur du ressaut s'abaisse avec l'augmentation de la rugosité imposée. D'autre part, l'analyse statistique des points expérimentaux du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal profilé en "U" avec lit rugueux, montre qu'un ajustement de type puissance entre  $L_j/h_1$  et  $F_1$  est possible.

En second temps, une étude a été faite concernant les mesures expérimentales des longueurs relatives du rouleau  $L_r/h_1$  de surface variant avec le nombre de Froude  $F_1$  incident de l'écoulement, par conséquent cette analyse a permis d'avoir une relation de type puissance entre  $L_r/h_1$  et  $F_1$ .

Aussi, une étude a été faite qui concerne la variation du rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  du ressaut en fonction de nombre de Froude  $F_1$  incident pour quatre valeurs différentes de rugosité :  $\varepsilon= 4,3\text{mm}$  ;  $\varepsilon=5,63\text{mm}$  ;  $\varepsilon= 7,14\text{mm}$  et  $\varepsilon=9, 11\text{mm}$ . Quatre allures distinctes, correspond chacune à une rugosité fixée. Par ailleurs, le nombre de Froude incident augmente proportionnellement avec le rapport des hauteurs conjuguées mais ce dernier diminue avec l'importance de la rugosité testée.

L'ajustement statistique des points expérimentaux de couple (Y, Fr) du ressaut hydraulique a donné une relation de type linéaire :  $f(Y, Fr, \varepsilon/D)$  justifiée par une très bonne corrélation.

En dernier temps, l'étude expérimentale a traité la dissipation d'énergie cinétique qui a été représentée par le rendement. Ainsi, la variation du rendement du ressaut hydraulique évolué en canal en U à fond rugueux dissipe mieux l'énergie quand la rugosité sera importante.

En fin de cette étude expérimentale, le profil du ressaut hydraulique a été étudié. Par ailleurs, la variation du rapport adimensionnel vertical y en fonction du rapport adimensionnel horizontal X a été analysée pour trois rugosités équivalentes  $\varepsilon=0,00\text{mm}$  ;  $\varepsilon=3,55\text{mm}$  et  $\varepsilon= 4,30\text{mm}$ . Cette analyse montre que, pour un nombre fixé de X, la valeur de y s'accroît avec l'accroissement de la rugosité équivalente ce qui justifie l'effet de la réduction des caractéristiques et la compacité du ressaut hydraulique.

Pour la deuxième partie, elle a été scindée en trois chapitres primordiaux.

Pour le premier chapitre, nous avons exposé le banc expérimental utilisé en expérimentation sous forme des diverses photographies, nous avons aussi expliqué la procédure de l'utilisation des appareillages 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 s'imposent au lit mineur du canal.

Pour le second chapitre, à travers lequel nous avons réalisé les travaux suivants : en premier temps, nous avons décrit le banc d'essai qui a servi de réaliser l'expérimentation complète du ressaut hydraulique. Toutes les mesures expérimentales obtenues au niveau du laboratoire ont permis d'établir la relation l'approche semi théorique caractérisée par entre les paramètres suivants :  $F_1$ ,  $Y$ ,  $Cr$ ,  $\beta$ , et  $\tau$  tels que :  $F_1$  est le nombre de Froude incident,  $Cr$  est le coefficient de frottement ou de résistance,  $\beta$  est le rapport de l'élargissement,  $\tau$  est le rapport d'aspect et  $Y$  est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique contrôlé. Cette approche adimensionnelle est établie à partir de la théorie d'Euler appliquée entre les deux sections du ressaut hydraulique après sa formation.

En second temps, nous avons présenté l'équation semi-théorique explicite qui a été établie expérimentalement permettent de calculer le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en injectant le débit volumique d'écoulement et de la valeur de la rugosité absolue testée.

Pour le dernier chapitre de la deuxième partie, On a analysé principalement tous les résultats obtenus de nos expériences réalisées qui sont liées étroitement avec l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mine évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux.

Ensuite, on a présenté les résultats expérimentaux permettant d'extraire des relations expérimentales explicite, nous nous sommes basés premièrement sur la variation de la longueur relative de ressaut  $L_j/h_1$  dans le lit mineur et celle du lit majeur variant avec le nombre de Froude  $F_1$  pour cinq valeurs de rugosité testées  $\varepsilon = 0$  mm,  $\varepsilon = 06$  mm,  $\varepsilon = 06$  mm,  $\varepsilon = 08$  mm,  $\varepsilon = 10$  mm et  $\varepsilon = 12$  mm. On a constaté cinq allures différentes correspond chacune une valeur fixée de la rugosité. En outre, la longueur relative  $L_j/h_1$  s'accroît avec l'accroissement du nombre de Froude et s'abaisse avec l'accroissement de la rugosité imposée au fond du canal.

Aussi, nous avons corrélé les mesures expérimentales des longueurs relatives du rouleau  $L_r/h_1$  de surface qui varient avec le nombre de Froude  $F_1$  incident, par conséquent cette analyse a permis d'avoir une approche linière entre la longueur relative du rouleau et du nombre de Froude pour les deux lits.

Également nous avons analysé la variation du rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  du ressaut en fonction de nombre de Froude  $F_1$  incident pour cinq valeurs différentes de rugosité  $\varepsilon = 0$  mm,  $\varepsilon = 06$  mm,  $\varepsilon = 06$  mm,  $\varepsilon = 08$  mm,  $\varepsilon = 10$  mm et  $\varepsilon = 12$  mm pour les deux lits (lit mineur et lit majeur), ce qui a permis d'obtenir des approches expérimentales adimensionnelles explicites.

Une analyse expérimentale concernant la variation de la hauteur relative du seuil  $S/h_1$  en fonction du Froude  $F_1$  pour les deux lits (mineur et celui majeur) a été faite.

Enfin, L'étude expérimentale a été portée sur la dissipation de l'énergie cinétique. Ceci est montré par le rendement hydraulique. Par conséquent, la variation du rendement  $\eta$  avec le Froude  $F_1$  montre que la dissipation d'énergie cinétique est importante par la création du ressaut hydraulique évoluant dans ce type de banc d'expérimentation, engendrée principalement par l'importance de la rugosité imposée et testée. Le dernier volet de cette étude est porté sur le profil du ressaut hydraulique illustrant la compacité des ressauts hydrauliques réalisés.

Finalement, on peut conclure que ce type de ressaut hydraulique étudié présente un effet réducteur aux caractéristiques hydrauliques pour le lit mineur que celui au lit majeur.

Avec recommandation aux doctorants ou étudiants chercheurs futurs de continuer les travaux théoriques et expérimentaux pour ce type de canal et d'autres canaux dans le but d'aboutir à des approches empiriques utilisables au dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### A

- 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. JHR 2000 ; 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.

### 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 ISSN 1112-9867.
- 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.
- Djamaa, W., Lecheheb. S., Ghomri. A., (2020)., Séminaire international « Durabilité d'agriculture saharienne et l'utilisation de l'eau ». Communication poster intitulé : 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 intitulée : « la contribution à l'étude de l'approche semi-théorique 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., (24. Novembre 2021)., Séminaire national sur l'eau, géotechnique et environnement tenu au centre universitaire de Mila. Communication orale intitulée « étude de l'approche expérimentale de la longueur relative du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux »
- 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'El-Oued ; 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**

- 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 rugueuses, Thèse doctorat en Science Hydraulique, 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<sup>o</sup> 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 Research 27(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<sup>o</sup>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 science hydraulique, Université de Biskra, 2014.

Kateb, S., Debabeche, M., Zegait. RetBaouia K. (2018)., Approche expérimentale de la longueur du ressaut hydraulique dans un Canal Triangulaire A Parois Rugueuses ; 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<sup>o</sup>20.

## **L**

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 intitulée : « la contribution à l'étude de l'approche semi-théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée à lit majeur rugueux » ; Université Biskra 22-23 Mars 2021.

Lecheheb. S., Djamaa, W., Ghomri. A., (24. November. 2021). The Second International

Conference on Civil Engineering ICCE' 2021 Novembre 24-25, 2021, Laghouat, Alegria.  
Communication poster intitulé « L'étude de l'effet d'une rugosité sur le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée avec lit majeur rugueux

## **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). Expérimental study of the sequent depth ratio of the hydraulic jump in a straight compound rectangular channel; 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., N° 90, pp. 23-55, 1964.

Saman, N., Younes., Numerical Simulation of Hydraulic Jump over Rough Beds. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2020.

## **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.