

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Kasdi Merbah Ouargla**  
**Faculté des Sciences Appliquées**  
**Département de Génie civil et Hydraulique**

Année 2022/2023



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 majeur rugueux**

Présenté et soutenue publiquement

Par :

**LACHEHEB Sena**

Le 25/05/2023

Devant le jury composé de :

<b>Ali GHOMRI</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université H.M el-oued</b>	<b>Promoteur</b>
<b>Samir KATEB</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université K.M Ouargla</b>	<b>Co-Promoteur</b>
<b>Sofiane SEGGAI</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université K.M Ouargla</b>	<b>Président de jury</b>
<b>Salim KHECHANA</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université H.L el-oued</b>	<b>Examineur</b>
<b>Kais BAOUIA</b>	<b>MCA</b>	<b>Université K.M Ouargla</b>	<b>Examineur</b>
<b>Oussama DERDOUS</b>	<b>MCA</b>	<b>Université K.M Ouargla</b>	<b>Examineur</b>

# Remerciements

*Je remercie le DIEU d'avoir m'aidé et m'a et d'encourager pour réaliser ma thèse de recherche scientifique .*

*Aussi je dois exprimer mes remerciements à :*

*Mon encadreur **ali GHOMRI** , Professeur à l'université d'el LOUED d'avoir m'orienté et aidé sérieusement pour compléter et bien mené ma thèse .*

*Mon Co-encadreur **samir KATEB** Professeur à l'université d'Ouargla pour sa participation pertinente en but de réaliser ma thèse.*

*Également je dois remercier vivement le personnel du laboratoire ( d'avoir m'aider notamment à la disposition du matériel en but de bien exécuter mes expérimentations.*

*Je remercie très chaleureusement Dr **DJAMAA walid***

*Mes plus vifs remerciements pour tous qui m'ont aidé spécifiquement à la concrétisation de ma thèse de doctorat **L M D**.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail Modest en signe de reconnaissance et de respect.*

*A tous qui m'ont aidé durant mon parcours d'études, qui m'ont*

*également encouragé à réaliser mon rêve d'arriver à ce stade de*

*recherche scientifique, Les deux être les plus chers au monde :*

*A ma mère et mon père, que j'adore tellement et que Dieu les protège.*

*A mes sœurs et frères ,*

*A ma fiancée*

*A mon encadreur,*

*A mon Co- encadreur,*

*A toute la famille.*

*A tous mes copains et camarades.*

*A tous ceux que j'adore .*

*Mr. Lacheheb Sana*

Sommaire

Liste des figures

Liste de photos

liste des tableaux

principal notation

résumé

Introduction générale ..... **Error! Bookmark not defined.**

premier volet bibliographique ..... I

Chapitre I :Ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composé

I. Introduction.....8

I.2. Approche DE Khattaoui ET Achour(2012) .....8

I.2.1. Rapport  $Y$  .....8

I.2.2. établissement de la rentabilité des écoulements : .....11

I.3.l'approche de Houichi ,benabdesselam (2017et 2020).....12

I.3.1. procédure expérimentale .....12

I.3.2. développement de la relation  $Y$  .....13

I.3.3. la rentabilité.....14

I.3.4. Résultats et discussions .....14

I.3.4.1. Approbation de l'approche  $Y$  .....14

I.3.4.2. Validation de l'approche du rendement relatif .....16

I.4.Conclusion .....18

Chapitre II :Ressaut Formé en Section Rectangulaire composé

II.1. apperçu .....20

II.2. illustration du banc d'essai .....20

II.2.1. illustration du banc d'expérimentation. ....20

II.2.2. la détermination des débits spécifiques.....22

II.2.3. instrument de mesurage .....23

II.2.4. la description des parois de control .....23

II.3. récapitulation des résultats .....24

II.3.1. la problématique expérimentale .....24

II.3.2. déroulement de l'expérimentation .....25

II.4. discussion et analyse .....27

II.4.1.représentation  $Y$  et  $F_1$  .....27

II.4.2.Variation  $L_j/h_1$  en fonction du  $F_1$ .....31

II.4.3.représentation de  $L_r/h_1$  et du  $F_1$ .....32

II.4.4.représentation de $s/h_1$ avec le paramètre $F_1$ .....	33
II.5.conclusion.....	38
Conclusion du premier volet.....	39
Deuxième partie .....	41
Etude théorique et expérimentale .....	41
Introduction de deuxième volet.....	42
Aperçu général de la partie de contribution.....	42
Chapitre I .....	41
illustration du banc expérimental .....	41
I.1.Introduction.....	45
I.2. banc de l'expérimentation.....	45
I.2. Instruments utilisés au mesurage .....	47
I.2.1.Le mesurage des débits volumiques .....	47
I.2.2. instrument limnimétrique .....	48
I.3. déroulement expérimental.....	48
I.3.1.les étapes des essais .....	48
I.4. la conception de la rugosité.....	50
I.5. récapitulation des résultats.....	52
II.1. Aperçu général.....	54
II.2. développement de l'approche théorique.....	54
II.2.1. description théorique .....	54
II.2.2. développement de l'approche selon Euler .....	55
II.3. récapitulation des Résultats .....	58
II.3.1. étude du paramètre $C_r$ en fonction de $(\varepsilon/B-b)$ . .....	58
II.3.2. étude du $Y = h_2/h_1$ de l'écoulement variant avec le paramètre $C_r$ et du Froude $Fr$ .....	60
II.4.conclusion.....	66
Chapitre III : Analyse des résultats expérimentaux.....	94
III.1.Introduction .....	68
III.2. Etude de variation des caractéristiques de l'écoulement .....	69
III.2.1. analyse de la longueur relative $L_j/h_1$ et du $Fr$ . .....	69
III.2.2. analyse $L_r/h_1$ en fonction de Froude $Fr$ . .....	75
III.2.3.étude du rapport $Y$ en fonction du $F_1$ .....	80
III.2.4.étude du rapport $S/h_1$ variant avec le paramètre $F_1$ .....	86
III.2.5. développement de l'expression de la rentabilité.....	89

II.3. Exercice de calcul des caractéristiques d'écoulement .....	94
III.4. récapitulation des résultats du troisième chapitre .....	95
Conclusion du deuxième axe fondamental .....	96
Aperçu général .....	97

Figure1.1 : le ressaut développé .....	8
Figure 1.2 : Variation $Y$ et $F_1$ .....	10
FigureI.3 : étude $Y$ et de $F_1$ .....	10
Figure 1.4. etude de $\eta$ en fonction de $F_1$ .....	11
Figure 1.5: $\eta$ en fonction de $F_1$ .....	12
figure 1.6 : Schéma du ressaut en section composé .....	12
Figure 1.7 : rapport $Y$ en fonction de $Fr$ .....	16
Figure 1.8 : rapport $Y$ en fonction de $F$ .....	16
Figure.1.9: rapport $Y$ en fonction de $F$ .....	16
Figure 1.10: $\eta$ en fonction de $F_1$ .....	17
Figure 1.11: évolution $\eta$ .....	17
Figure2.1: configuration du ressaut dans la section d'expérimentation. ....	25
Figure 2.2. illustration de canal rectangulaire composé .....	25
Figure2.3. rapport $Y$ avec $F_1$ .....	27
Figure 2.4. rapport $Y$ avec avec $S = s/h_1$ .....	28
Figure 2.5 : illustration du $Y$ avec le seuil $S$ pour différentes ouvertures .....	28
Figure 2.6. ces différentes illustrations montrent la variation du $Y$ en fonction de $S = s/h_1$ pour diverses ouvertures relatives. ....	30
Figure2.7. etude du paramètre "b" variant avec "y1". ....	31
Figure 2.9. illustration des mesures de $L_j/h_1$ comparés avec $F_1$ pour la section composée .....	32
Figure 2.10 . illustration du rapport $L_r/h_1$ avec $F_1$ pour les deux lits du canal .....	32
Figure. 2.11. illustration du $S/h_1$ et de $F_1$ pour la section composée.....	33
Figure. 2.12. illustration de $S/h_1$ et $F_1$ pour différentes ouvertures initiales.....	33
Figure. 2.13: Représentation du $S$ en fonction du $F_1$ pour diverses ouvertures initiales. ....	35
Figure 2.14. illustration du facteur 'a' et du rapport $h_1/B$ .....	36
Figure 2.15. illustration du facteur 'b' avec $h_1/B$ . ....	36
Figure2.16: comparaison entre l'approche globale et leurs mesures expérimentales .....	37
Figure1.1. vue d'ensemble du canal d'essai .....	45
Figure2.1 .illustration schématique du banc d'essai de section composée rugueux. ....	54
Figure 2.2 .Variation $f(Y)$ en fonction de $F_1^2$ . ....	58
Figure 2.3. évolution du paramètre $C_f$ avec le rapport $\varepsilon/B-b$ .....	59
Figure 2.4. : illustration $f(y_1, y_2)$ variant avec $F_1^2 (1-1.896(\varepsilon/B-b))$ .....	60
Figure 2.5 .illustration du $Y$ avec de $F_1^2 (1-C_f)$ .....	61

Figure 2.6. illustration de $Y$ avec l'approche (2.22).....	61
Figure 3.1.illustration de $L_j/h_1$ variant avec $Fr$ . .....	69
Figure 3.2. corrélation du facteur $a_1$ avec le rapport $(\varepsilon/B-b)$ . .....	70
Figure 3.3.comparaison entre $L_j / h_{1\text{expérimentale}}$ et l'approche globale $f(\varepsilon/B-b, F_1)$ .....	71
Figure 3.4.Illustration de $L_r/h_1$ variant avec $Fr$ .....	75
Figure 3.5. corrélation du facteur $a_2$ avec le rapport $(\varepsilon/B-b)$ . .....	76
Figure 3.6. comparaison entre $(L_r / h_1)\text{expérimentale}$ et l'approche empirique $f(\varepsilon/B-b, F_1)$ ..	77
Figure 3.7. illustration des mesures expérimentales entre $Y$ et $F_1$ , pour cinq rugosités examinées .....	80
Figure 3.8:corrélation du paramètre $a_3$ avec $(a_3, \varepsilon/B-b)$ .....	81
Figure 3.9: rapport $Y$ en fonction $f(\varepsilon/B-b, F_1)$ .....	82
Figure 3.10.présentation des rapport $s/h_1$ avec le paramètre $F_1$ pour diverses rugosités absolues.....	86
Figure 3.11:Représentation du " $\alpha_4$ " avec $\varepsilon/B-b$ .....	87
Figure 3.12: Présentation $S/h_1$ avec $f(\varepsilon/B-b, F_1)$ .....	87
Figure 3.13.Présentation de $\eta$ variant en fonction de $Fr$ .....	90
Figure (3.14) : présentation de $\eta$ théorique et $\eta$ Globale .....	91

## Liste des photos

---

Photos2.1 (a, b, c): vu du canal de mesure .....	20
Photo2.2: série de convergents.....	21
Photo 2.3: la cloche sous pression.....	21
Photo2.4: vu de la vanne.....	21
Photo 2.5 : Pompe centrifuge .....	22
Photo2.6: vu de bassin .....	22
Photo2.7: vu de déversoir. ....	22
Photo.2.8: appareil d'affleurement.....	23
Photo2.9: différentes dimensions des parois.....	24
Photo 1.1. vue du canal.....	46
Photo1.2.Pompe centrifuge axiale.....	46
Photo1.3.La vanne de régulation du débit. ....	46
Photo1.4.dispositif de mesurage des débits volumiques .....	47
Photo1.5. evaluation des profondeurs d'écoulement.....	48
Photo 1.6. différentes parois des ouvertures conçues.....	49
Photo1.7.Les parois minces pour contrôler un écoulement de passage des régimes. ....	49
Photo 1.8.a) section composée rugueuse b) section composée lisse .....	50
Photo 1.9. estimation des profondeurs d'écoulement.....	51
Photo 1.10. Les tapis rugueux divers .....	51

Tableau 1.1. Gammes expérimentales des paramètres .....	13
Tableau 1.2. Froude selon $\tau_z$ (Eq. (1.13)) .....	14
Tableau 2.1. illustration Cr déduit des courbes d'ajustement.....	59
<i>Tableau 2.2.</i> rapport Y exp et celui Y de l'approche empirique obtenue.....	62
<i>Tableau (3.1).</i> traçage du graphique $L_j/h_1 = f(\text{Fr})$ .....	70
<i>Tableau 3.2:</i> erreur entre $L_j/h_1$ rel et $L_j/h_1$ exp.....	72
<i>Tableau (3.3).</i> le tracé du graphique $L_r/h_1 = f(\text{Fr})$ .....	76
<i>Tableau 3.4:</i> erreur entre $L_r/h_1$ rel et $L_r/h_1$ exp .....	78
<i>Tableau 3.4:</i> erreur entre $L_r/h_1$ rel et $L_r/h_1$ exp .....	79
Tableau 3.5 ..facteur $a_3$ de corrélations .....	80
Tableau (3.6) erreur entre $h_2/h_1$ exp et $h_2/h_1$ d'ajustement .....	83
Tableau (3.7). paramètre $a_4$ .....	86
Tableau 3.8: erreur $S/h_1$ exp et $S/h_1$ rel .....	88
Tableau 3.9 : erreur entre $\eta_{\text{exp}}$ celui $\eta_{\text{glob}}$ .....	92

## Principales notations

$A_1$	la section mouillée amont	[m]
$A_2$	la section mouillée aval	[m]
B et b	le lit majeur et le lit mineur	[m]
Cr	facteur de résistance	[-]
$F_1$	Le facteur Froude de l'écoulement	[-]
$f_1 ; f_2$	Les forces hydrostatiques	[N]
$f_x$	Force de résistance	[N]
$F_1$	Force d'hydrostatique amont	[N]
$F_2$	Force d'hydrostatique aval	[N]
g	La gravité de pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
$h_1$	Profondeur amont	[m]
$h_2$	Profondeur aval	[m]
$h_1^*$	Profondeur amont classique	[m]
$h_2^*$	Profondeur aval classique	[m]
$\bar{h}$	Profondeur du centre de gravité amont	[m]
$H_1$ et $H_2$	Energie amont et aval	[m]
$\Delta H$	Dissipation totale	[m]
$H_{dev}$	La lame d'eau déversée	[m]
$L_j$	Caractéristique du ressaut	[m]
$L_r$	Caractéristique du rouleau de surface	[m]
$L_j^*$	Caractéristique relative classique	[m]
$L_r^*$	Caractéristique du rouleau classique	[m]
$M$	Paramètre de forme $M = m h / b$	[-]
$\Delta P$	la quantité d'euler	[kg.m. s <sup>-1</sup> ]
P	Pression	[N/m <sup>2</sup> ]
P	Périmètre du canal	[m]

## Principales notations

---

$P_1$	Poussée hydrostatique amont	[Pa]
$P_2$	Poussée hydrostatique aval	[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	Dispositif de control	[m]
V	Capacité d'eau	[m <sup>3</sup> ]
$V_1$ et $V_2$	Vitesses amont et aval	[m/s]
$\varpi$	Poids volumique	[N/m <sup>3</sup> ]
X	Coordonnée longitudinale	[m]
		[m]
		[-]
		[-]
$\beta$	Coefficient de l'élargissement	[-]
T	Rapport des profondeurs	[-]
$\eta$	La dissipation d'énergie	[-]
$\varepsilon$	Le facteur de rugosité	[mm]
$\Delta t$	Le laps de temps	[s]
$\rho$	Masse spécifique	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> ]

### ملخص

يهدف هذا العمل البحثي الحالي إلى دراسة القفزة الهيدروليكية التي تحدث في قناة مستطيلة ذات شكل مركب خشن ، من الناحية النظرية والتجريبية ، ولا سيما السرير الرئيسي الخشن. يتناول هذا التحليل تأثير عامل الخشونة على الخصائص المختلفة للقفزة. تم استنتاج علاقة شبه نظرية المتعلقة بالجريان المتغير المفاجئ بدون أبعاد من الشكل  $(Y, F_1, Cr, \beta, \tau)$ . تم الحصول على معامل الخشونة باستخدام القياسات التجريبية. كما تم الحصول على علاقات تجريبية عامة تسمح بحساب الهياكل الهيدروليكية.

**الكلمات الرئيسية:** القناة المستطيلة المركبة، معامل الخشونة، حوض التبريد، قناة ذات سرير خشن ، الجريان المفاجئ.

### 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 majeur rugueux. L'étude examine l'effet de la rugosité du lit majeur rugueux 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 composée, rugosité du lit majeur du canal, 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 major 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, roughness Major bed of the channel, dissipation basin.

# **INTRODUCTION GENERALE**

Pour prévenir la noyade des ouvrages en matière d'hydraulique surtout au cours des pluies importantes, il est indispensable d'assurer ces ouvrages d'évacuateur de crue par un ouvrage de débordement ces surplus d'eaux. ce volume de plus va engendrer un écoulement très érosif caractérisé par à l'aval de l'évacuateur de déversement (*Debabeche2003*). A cet effet , cet équipement de dissipation doit être conçu à l'aval de ce dernier par lequel l'écoulement de passage du régime torrentiel au régime pluvial va être réalisé .ce passage va protéger cet ouvrage de stockage d'eau par les forces éventuelles d'érosion.

Le phénomène du ressaut est le moyen qu'utilisent les constructions en domaine d'hydraulique en but de diminuer l'énergie (*Ouassaf Sana 2015*). Ce moyen est composé pendant le passage d'un écoulement fortement à un écoulement faible. Pendant ce passage une onde permanente se produit et l'énergie sera affaiblie.

Le ressaut pourrait se créer à la fin juste de la vanne de contrôle, ou à l'aval du déversoir. Il est le siège d'une diminution d'énergie (*Ziani Sonia 2015*). il est défini essentiellement par la première et deuxième hauteur conjuguée. Le dimensionnement du bassin, appelé à abriter le ressaut hydraulique, dépend aussi du profil de la surface libre de ce dernier.

Il s'appelle ordinaire quand il se produit en canal rectangulaire. Il est formé et contrôlé lorsque sa composition se concrétise par une paroi à l'aval. (*M. Debabeche et al 2006*).

Ce dernier temps, cette recherche scientifique a été traitée par de chercheurs pour compléter ces diverses préoccupations en matière d'hydrauliques. Citons par exemple, les recherches de : Hager et Bretz (1987), Hager (1992), Ead et Rajaratnam (2002), Achour et al (2002), Chanson (2009), qui ont abordé les écoulements brusquement variés qui se réalisent en canaux de forme rectangulaires. Hager et Wanoschek (1987).

Achour et Debabeche (2003) et Debabeche et Achour (2007), ont étudié les écoulements brusquement variés qui se naissent en canaux de section triangulaire. Debabeche et al. (2009) ont examiné les écoulements brusquement variés qui se réalisent dans les canaux de forme triangulaire avec pente , Ghomri et al 2012 ont traité les écoulements brusquement variés qui se réalisent aussi dans les canaux de section en U , Kateb, Debabeche et Riguet (2013) ont expérimentés les écoulements brusquement variés qui se réalisent dans les canaux de forme trapézoïdal avec pente.

D'autre Part, les experts scientifiques en matière d'hydraulique ont classé les écoulements

brusquement varié diverses selon sa forme. Par conséquent, la variation des caractéristiques de l'écoulement d'amont (volumes, profondeurs etc.) et à l'aval (seuil de contrôle, la position du seuil,...etc.) pourrait mener aux diverses formes de cet écoulement brusquement crée (Debabeche et al, 2009). Cet écoulement brusquement varié s'appelle classique quand il se crée dans les canaux de section rectangulaire horizontale sans obstacle à l'aval (Hager, Bremen et Kawagoshi, 1990). Cet écoulement brusquement crée s'appelle aussi contrôlé quand son développement est contrôlé par un seuil bien positionné (Hager et Bretz, 1988).aussi les chercheurs l'appellent forcé quand il se crée de part et d'autre de ce seuil de control (Rand, 1957 ; Bretz, 1988). Cet obstacle de formation sert à contrôler et bien positionner cet écoulement de passage. Ce présent travail de recherche scientifique a pour objectif d'analyser, théoriquement et empiriquement, ce phénomène d'écoulement hydraulique, examiné par seuil évoluent en canal rectangulaire composé rugueux. Des relations à caractères adimensionnels, qui apparaissent l'efficacité du facteur rugosité testée , seront exposées. Il est à noter que cet écoulement réalisé en canal rectangulaire composé rugueux n'a pas été entamé jusqu'à ce jour.

L'analyse de cet écoulement brusquement varié est régie fondamentalement par la théorie d'Euler qui s'applique nécessairement entre deux sections de contrôle d'écoulement en hydrostatique. D'autre terme scientifique cette théorie d'Euler se définit par la variation de la quantité de mouvement de l'écoulement qui se crée entre deux sections de control amont et l'aval de ce dernier. Cette quantité de mouvement est égale à la somme algébrique des forces hydrostatiques appliquées aux sections amont et aval de ce dernier (*Debabeche et al, 2009*).

L'objectif de cette thèse est d'analyser expérimentalement et théoriquement les écoulements brusquement variés formés et contrôlés par seuil mince créés dans les canaux rectangulaires composée avec lit majeur rugueux.

- Le premier axe de cette recherche est composé de deux chapitres dont Le premier expose les principales activités de *Khattaoui et Achour (2012)* qui est lié étroitement avec la théorie théorique faite par *Achour (2000)*. Cette dernière traite les écoulements dans les canaux brusquement élargie et on terminera par les recherches de *Benabdesselam et al (2017 et 2020)*.

Pour le deuxième chapitre une étude expérimentale sur les écoulements qui se produisent en canal rectangulaire composé lisse réalisé par *Riguet et al(2020)*.

- Pour le deuxième axe qui traite notre sujet de recherche , il aborde par voie d'expérimentation, les écoulements brusquement variés créés par un seuil mince en canal rectangulaire composé avec un lit majeur rugueux. Des relations adimensionnelles , liant les caractéristiques de l'écoulement seront également proposées .

**Premier volet  
bibliographique**

## Introduction

Pour cet axe premier bibliographique, une exposition des travaux les plus nouveaux concernant les écoulements en quelques canaux de différentes sections géométriques sera faite. A cet effet ce volet est composé de deux chapitres principaux. Le premier chapitre par lequel on va exposer les activités de Khattaoui et Achour (2012) *qui est lié aux recherches* théoriques des écoulements hydrauliques qui se produisent en canal rectangulaire composé lisse. une exposition des travaux de recherches de benabdesselamet Al (2017 et 2020) lié profondément aux études théorique et expérimentale de l'écoulement hydraulique produit en canal rectangulaire composé.

Pour le second chapitre, nous allons exposer les travaux de Riguët et al (2020) liés aux recherches dont leur but est d'apparaître l'effet de la section composée du canal rectangulaire sur les écoulements brusquement variés et de tenter d'avoir des approches empiriques adimensionnelles.

# *Chapitre I*

## **Ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composé**

## I. INTRODUCTION

On sait que les différents écoulements uniformes ou non uniformes qui se produisent dans les canaux composés sont difficiles à résoudre qui sont dus au transfert de masse entre les deux lits de la forme composée (Bousmar et al. 2005).

Pour le premier chapitre, nous présenterons les recherches faites par Khattaoui et Achour (2012). Dont ils se penchent à une théorie faite par Achour (2000) liée aux écoulements qui se produisent en galerie brusquement élargie, une relation mathématique développée a été exposée par les chercheurs en but d'estimer le rapport  $Y=h_2/h_1$  de l'écoulement brusquement produit en canal composé.

Aussi, on montrera les recherches scientifiques obtenues par Benabdesselam et Al (2017 et 2020), qui se présentent par des approches empiriques et théoriques obtenue avec les différents rapports  $\tau_y$  des deux lits pour la section d'élargissement brusque.

### I.2. Approche DE Khattaoui ET Achour(2012)

#### I.2.1. Rapport Y

La figure ci-dessous montre les deux sections du ressaut développé de la forme composé.

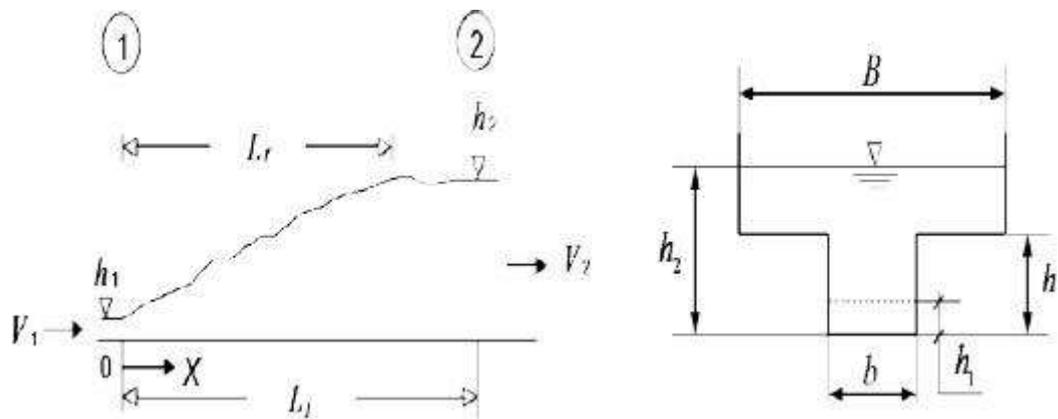


Figure 1.1 : ressaut hydraulique développé en canal composé

Les chercheurs (Bousmar et al. 2004) montrent le transfert de masse qui se forme entre le lit mineur et celui majeur. Ce transfert de masse se montre de la manière suivante en se penchant sur la figure (1.1) :

$$\rho Q (P_2 V_2 - P_1 V_1) = F_1 - F_2 \quad (1.1)$$

Le chercheur *Achour (2000)*, et son homologue *Borda-Carnot* prennent compte des forces de résistance de l'écoulement selon l'axe horizontale y compris la relation (1.1), l'expression déduite finale est suivante :

$$f_x = -k \cdot \bar{\omega} \cdot (h_2 - h)^x \cdot h_1^y \cdot (B - b)^z \quad (1.2)$$

Cette relation exprime la perte d'énergie due au transfert de masse entre les deux lits. Les facteurs x, y et z s'écrivent comme suit :  $x + y + z = 3$ , le paramètre k se formule ainsi :  $k = \varphi(L, \text{ou } L_r, h_1, h_2, h)$ . Finalement la relation d'Euler s'écrit comme suit :

$$\rho Q^2 (1/A_2 - 1/A_1) = f_1 - f_2 + f_x \quad (1.3)$$

La relation de  $f_x$  se formule comme suit :

$$f_x = (1/2) \cdot \bar{\omega} \cdot (h_2 - h) \cdot h_1 \cdot (B - b) \quad (1.4)$$

Sachant que  $\beta_1 = \beta_2 = 1$ . Les expressions  $A_1$  et  $A_2$  se formulent ainsi :  $A_1 = bh_1$  et  $A_2 = B(h_2 - h) + bh$ . L'hydrostatique est supposée au début entre (1-1) et (2-2) de l'écoulement, alors les deux expressions de  $f_1$   $f_2$  se formulent ainsi :

$$f_1 = \bar{\omega} \left( \frac{h_1}{2} \right) bh_1 \text{ et } f_2 = \bar{\omega} \cdot (h_2 - h/2) \cdot b \cdot h + \bar{\omega} \cdot [(h_2 - h)/2] \cdot B \cdot (h_2 - h). \quad (1.5)$$

Sachant,  $V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q$ , la relation (1.3) s'écrit finalement de la manière suivante :

$$2 \cdot F_1^2 \left( \frac{\beta}{Y - (1 - \beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} - \left( Y - \frac{1}{\tau} \right) \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (1.6)$$

$$\text{Où : } F_1 = \frac{Q}{\sqrt{b^2 h_1^3 g}} \quad (1.7)$$

En annulant la force de frottement, l'expression finale sera :

$$2 \cdot F_1^2 \left( \frac{\beta}{Y - (1 - \beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} \quad (1.8)$$

Les approches 1.4 et 1.6 sont sous la forme  $\emptyset(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$ . Les approches (1.4) et (1.6) pourraient s'écrire sous la forme suivante :  $Y^3 + aY^2 + bY + C = 0$ .

Avec le variable  $Y = x - \frac{a}{3}$  supposé, l'expression ci-dessus s'écrit ainsi :

$Y^3 + pY + q = 0$ . Cette relation peut être solutionnée par la méthode trigonométrique.

L'illustration 1.2 montre la corrélation de Y avec le facteur  $F_1$ . le paramètre de  $F_1$  minimale coïncide à  $h_2 = h$ , d'expression suivante :

$F_{1min} = [1/(2\sqrt{2})]\sqrt{(2/\tau + 1)^2 - 1}$  . ces deux figures indiquent que Y augmente proportionnellement avec le paramètre  $F_1$ . pour un  $F$  déterminé, Le rapport Y s'accroît en fonction de l'importance de  $b/B$  et s'abaisse en fonction de l'accroissement de  $h_1/h$  .

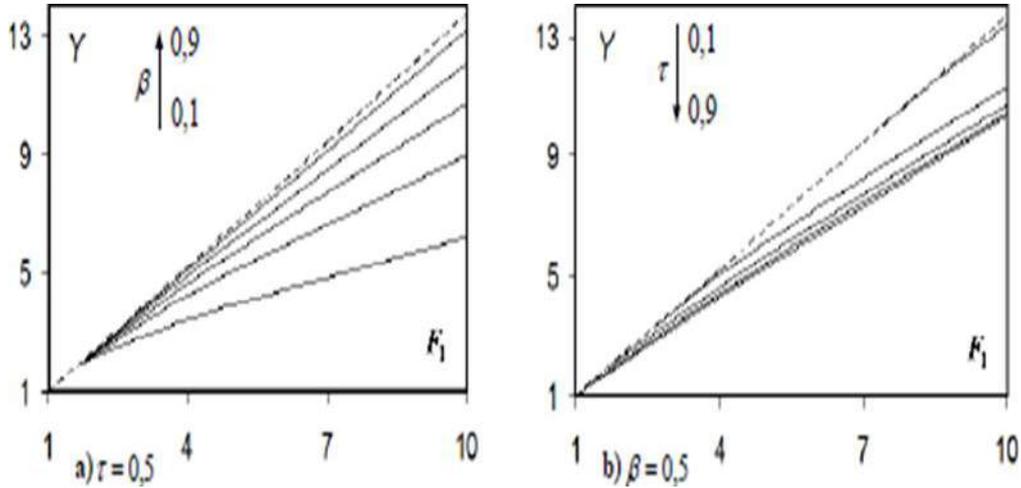


Figure 1.2 : illustration de y, estimé par (1.6), avec  $F_1$ . (---):  $\beta=1$ .

On remarque que le rapport Y évalué y compris les forces de frottements sont moindres que celui calculé sans frottement.

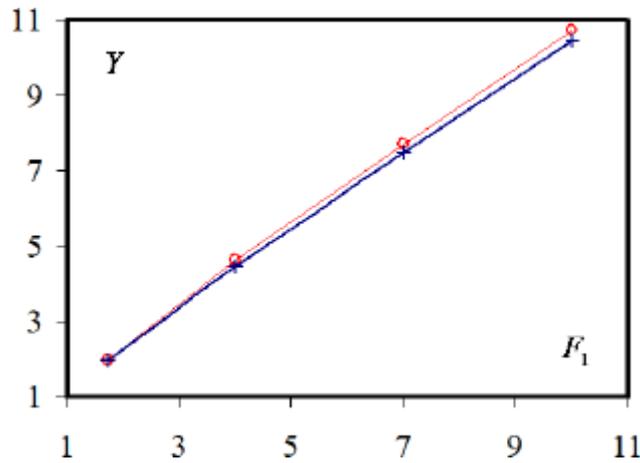


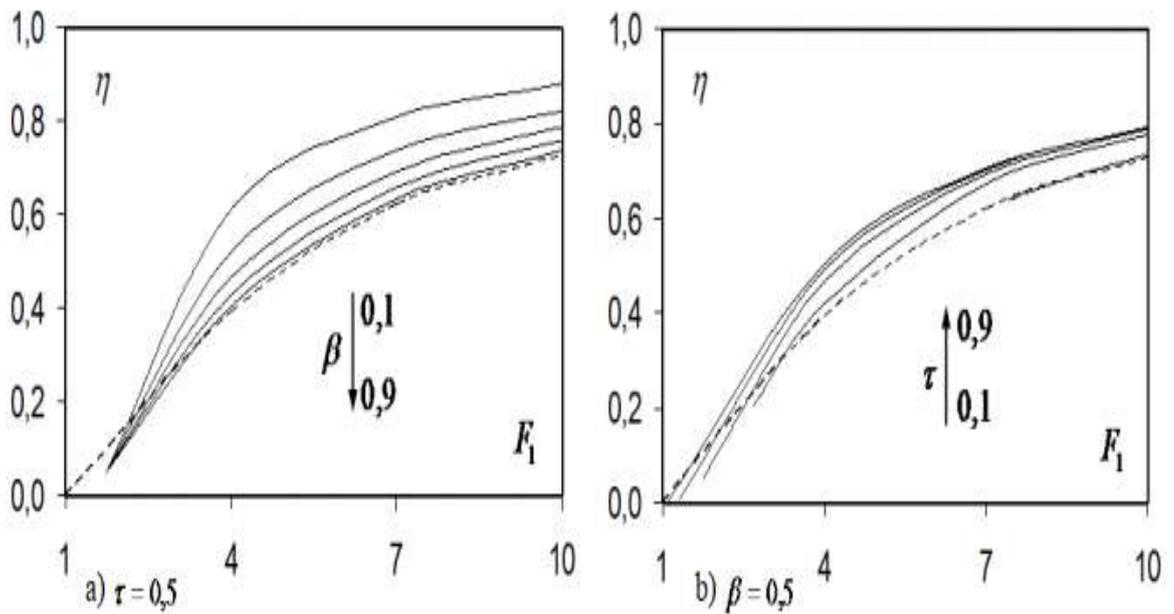
Figure 1.3 : étude Yen fonction de  $F_1$ . (o): équation (1.8), (+): équation (1.6).

**I.2.2. établissement de la rentabilité des écoulements :**

l'expression  $\eta = \Delta H/H_1$ , s'exprime par la relation (1.9), avec les mêmes hypothèses du rapport Y.

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (1.9)$$

L'approche (1.9) montre que le rendement de l'écoulement qui se produit en canal rectangulaire composé s'évalue explicitement sachant les facteurs suivant :  $F_1$ , Y,  $\beta$  et  $\tau$ . Cette figure indique clairement que  $\eta$  augmente avec l'accroissement de  $F_1$  Pour un  $\tau$  et un  $\beta$  donnés.



**Figure 1.4.** variation  $\eta$  en fonction de  $F_1$

(- - -) :  $\beta=1, \eta$  est évalué par la relation (1.9).

la figure (I.5) montre clairement que la caractéristique de l'écoulement  $\eta$  évalué y compris les forces de frottements est importante que celui évalué sans frottement.

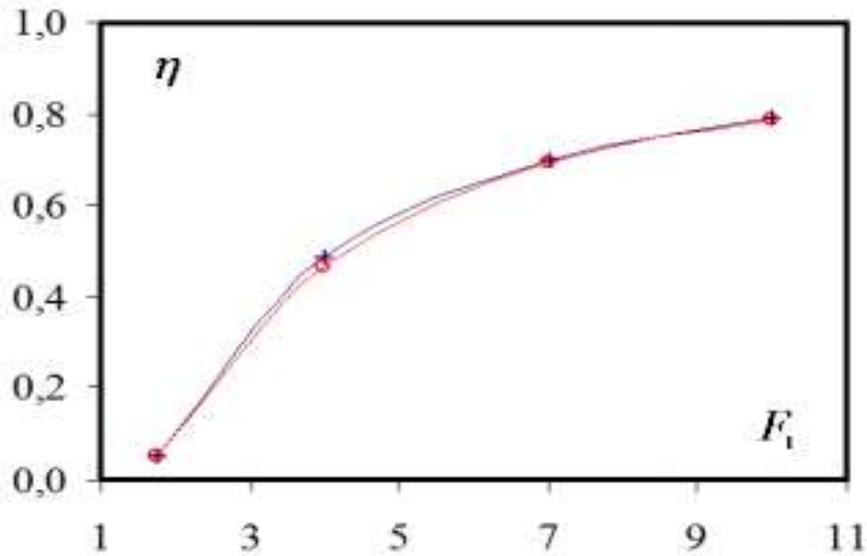


Figure 1.5:  $\eta$  en fonction de  $F_1$ . (o) : relation (1.9), (\*) avec résistance.

### I.3.L'APPROCHE DE HOUICHI ET BENADESALEM (2017et 2020)

#### I.3.1. procédure expérimentale

L'illustration ci-dessous expose le développement de l'écoulement hydraulique de l'écoulement brusquement varié crée en canal rectangulaire composé.

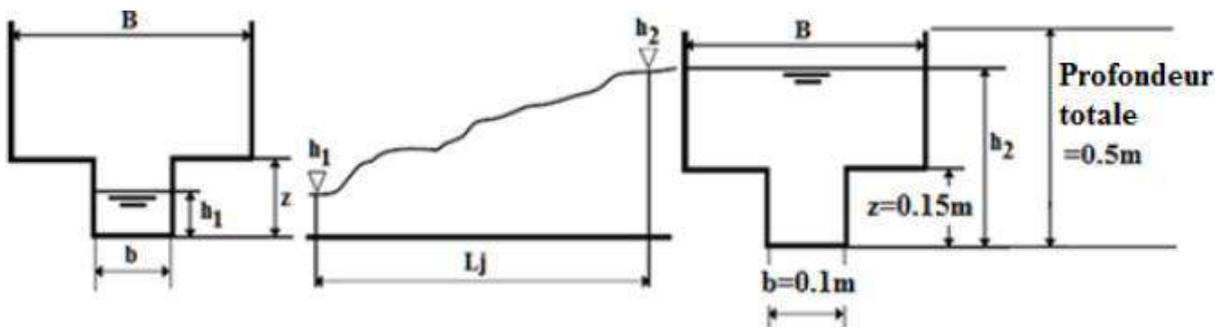


Figure 1.6: vu du ressaut en canal composé

Les essais expérimentaux de Houichi et Benabdesselam (2017et 2020) ont été exécutés en canal composé de dimension 4 m de longueur , les caractéristiques du banc d'expérimentation sont mentionnées au figure ci dessus.la variation du débit volumique arrive à 19 l/s. le rapport entre b et B se situe dans l'intervalle suivant (1/4, 1/3 et 1/2) .Aussi les différentes profondeurs  $h_1$  varient entre (2 et 5 cm).

Tableau 1.1. Gammes expérimentales des paramètres

Caractéristique	valeurs
$(h_1)$ .....	2,5-5,0 cm
$(h_2)$ .....	24,5-32,5 cm
$(L_j)$ .....	120-220 cm
$(Q)$ .....	9,9 -19,0 l/s
$(F_i)$ .....	4,28 -10,02
$(\tau_y)$ .....	0,25 -0,5
$(\tau_z)$ .....	0,167 -0,333

**I.3.2. développement de la relation Y**

Selon la théorie d’Euler appliquée au écoulement hydraulique produisant en canal composé lisse, l’équation qui engendre les caractéristiques  $h_1$  et  $h_2$  et le nombre de Froude  $F$  est déterminée selon (Houichi et al., 2013).

L’ approche mathématique a été développée par les chercheurs, qui s’écrit comme suit :

$$F_1^2 = \frac{1 - \frac{(Y - \frac{1}{\tau_z})^2}{\tau_y} - \frac{(2Y - \frac{1}{\tau_z})}{\tau_z}}{2 \left( \frac{\tau_y}{(Y - \frac{1}{\tau_y})/\tau_z} - 1 \right)} \quad (1.10)$$

Pour le deuxième cas, selon l’auteur Achour,  $F_x$  peut s’écire comme suit :

$$F_x = \rho g \frac{h_1}{2} (h_2 - z)(B - b) \quad (1.11)$$

En tenant compte de la force de frottement la relation  $F_x$  s’écrit ainsi :

$$F_1^2 = \frac{1 - \frac{(Y - 1/\tau_z)^2}{\tau_y} - \frac{(2Y - 1/\tau_z)}{\tau_z} - \left( \frac{1}{\tau_y} - 1 \right) \left( Y - \frac{1}{\tau_z} \right)}{2 \left( \frac{\tau_y}{Y - (1 - \tau_y)/\tau_z} - 1 \right)} \quad (1.12)$$

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

Les équations. (1.10) et (1.12) deviennent :

$$F_1^2 = \frac{(\tau_z + 1)^{0,5}}{\sqrt{2\tau_z}} \quad (1.13)$$

L'équation. (1.13) expose la limitation du nombre. Cette approche tolère de représenter  $Y = f(F_1)$ , selon le tableau ci-dessous :

Tableau 1.2. Froude et  $\tau_z$  (Eq. (1.13))

$\tau_z$	0,17	0,20	0,25	0,29	0,33
$F_1$	4,58	3,87	3,12	2,8	2,5

### I.3.3. la rentabilité

Le développement de l'expression du rendement avec et sans frottement est présenté ci-dessous :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2(Y/\tau_y - 1/\tau_z(1/\tau_y - 1))^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (1.14)$$

### I.3.4. Résultats et discussions

#### I.3.4.1. Approbation de l'approche Y

Le prototype réduit (avec et sans force) est appréciée en fonction des paramètres (RMSE) et l'erreur absolu (ERMax Ab). Cette erreur est le test le plus employé à la modélisation et la valeur théorique est zéro. Cette erreur s'évalue en fonction du nombre de la taille (n) du  $V_{th}$  et celle  $V_{exp}$  qui pourrait s'écrire de la façon suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{th} - V_{exp})^2}{n}} \quad (1.15)$$

Egalement, ERMax Ab exposée en (%):

$$ERMaxAb = Max \left[ 100 \left| \frac{(V_{th} - V_{exp})}{V_{th}} \right| \right] \quad (1.16)$$

La validation expérimentale des équations. (1.10) et (1.12), est récapitulée au tableau ci-dessous :

Tableau 1.3. illustration des erreurs relatives des modèles selon les valeurs de  $\tau_y$  (Eqs.(1.15)et(1.17))

$\tau_z$	RMSE sans Fx	RMSE avec Fx	ERMaxAb sans Fx	ERMaxAb avec Fx
0,25	0,30	0,530	6,90	11,10
0,333	0,28	0,416	6,60	9,60
0,5	0,38	0,310	8,70	6,50

On déduit de ces résultats que l’erreur RMSE avec Fx est minimale quand le  $\tau_z$  prend la valeur 0,5.

La figure (1.7) expose la variation de Y avec de F<sub>1</sub> avec  $\tau_y = 0,25$  (sans force), la figure (1.8) affiche la variation de Y avec F<sub>1</sub> et  $\tau_y = 0,333$  (sans force) et la figure (1.9) expose la variation de Y avec F<sub>1</sub> pour  $\tau_y=0,5$  (avec force ).

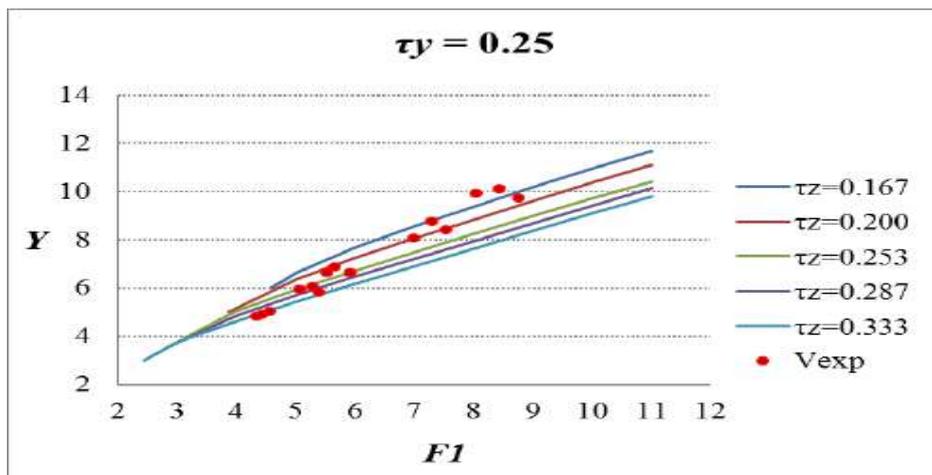


Figure 1.7 : illustration Y avec Fr (sans force)

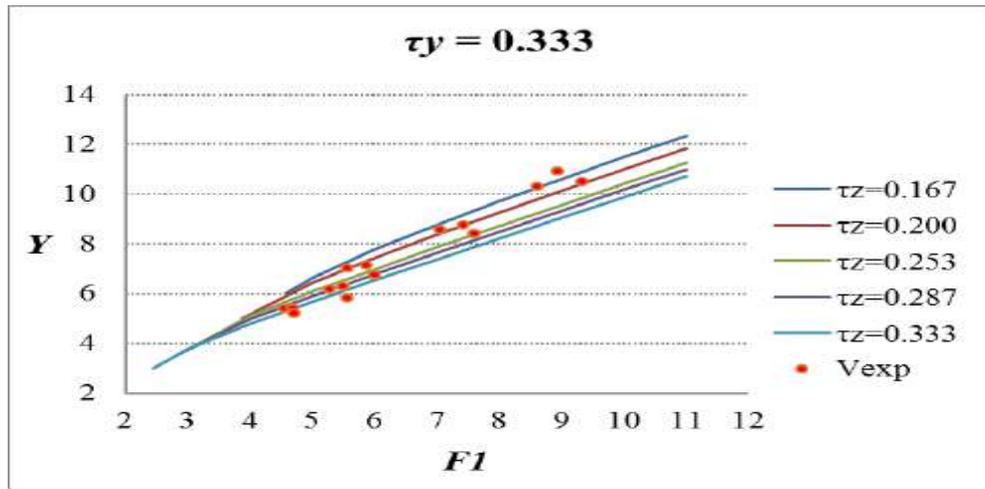


Figure 1.8 : corrélation Y avec F ( sans Fx )

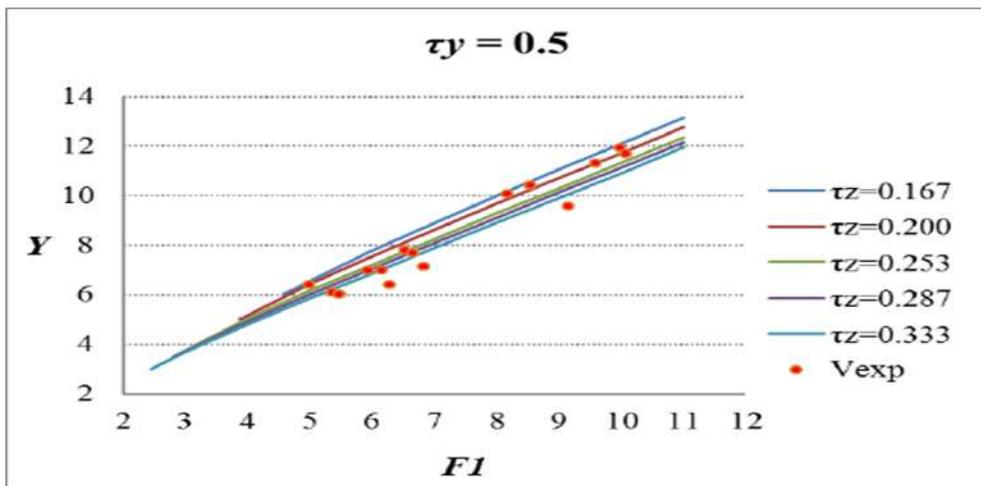


Figure.1.9: corrélation Y avec F ( sans Fx )

**I.3.4.2. Validation de l’approche du rendement relatif**

L’équation (1.14) donne l’expression du rendement pour les écoulements réalisés en canal rectangulaire composé; sachant  $F_1$  et  $Y$  pour la variété des rapports  $\tau_y$  et  $\tau_z$ . le rapport  $Y$  est estimé selon l’expression (1.10) avec  $\tau_y = 0,25$  et  $0,333$  ; aussi , le rapport  $Y$  est évalué par l’expression (1.12) avec  $\tau_y = 0,5$ .

Cette rentabilité des écoulements réalisés en canal composé est dessinée en fonction de  $Fr$ . l’intervalle de  $Fr$  varie entre 4 et 10. Aussi le rendement est situé entre 51,4% et 76,01%.

Sur la figure 1.10, le rendement de l'écoulement  $\eta_{REC}$  réalisé en canal rectangulaire, d'après l'équation. 1.17 (Chow, 1981), est exposée à titre de comparaison.

$$\eta_{REC} = 1 - \frac{(8F_1^2 + 1)^{1,5} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2 (2 + F_1^2)} \quad (1.17)$$

Aussi, la figure I.10 illustre que le rendement au canal composé est important que celui au canal rectangulaire, par ailleurs, pour une gamme  $F_1$  situé entre 4 et 10, le rendement de l'écoulement s'effectue en canal rectangulaire est assimilée entre 42,3% et 72,7%, ce qui montre l'amélioration de ce dernier.

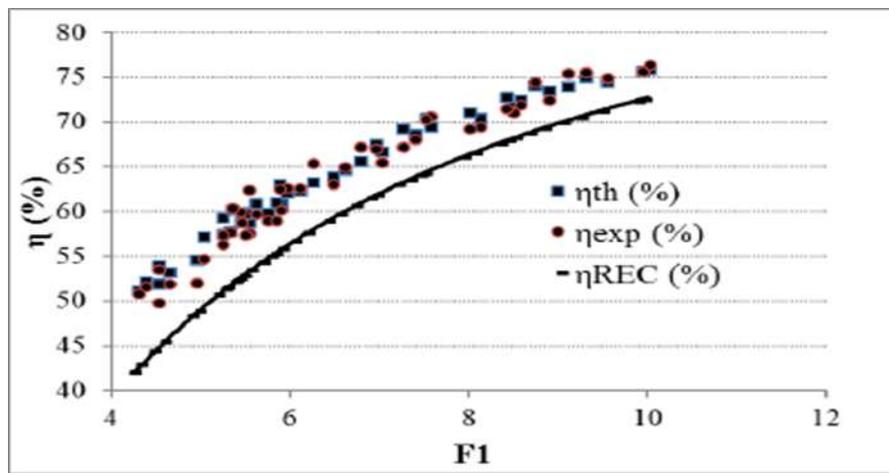


Figure 1.10: corrélation  $\eta$  avec de  $F_1$

La figure I.11 expose la limite du rendement qui est cerné entre +5% et -5% pour des motifs expérimentaux et théoriques.

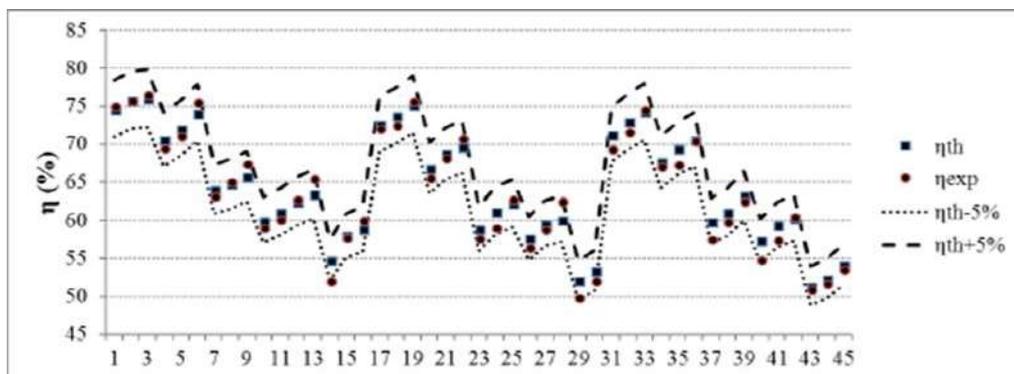


Figure 1.11: évolution  $\eta$

## I.4. Conclusion

Pour cet axe premier qui engendre le premier chapitre , nous avons exposé les recherches scientifiques réalisés par Khattaoui et Achour(2012). Qui sont appliquées directement au écoulement en canal rectangulaire composé .ils ont démontré une fonction liant : $\phi(F_1 ; Y ; \beta ; \tau) = 0$ .également une relation théorique a été fournie par *Khattaoui et Achour (2012)* en faisant rajouter l'effet des frottements liés au section composée du canal.

Ensuite une relation globale de la force de frottement est développée théoriquement par *Achour (2000)* en s'appuyant sur les écoulements effectués au sein de la galerie circulaire brusquement élargie.

Une approche établie par benabdesselam et Al (2017 et 2020) a été exposée. Cette relation d'ordre expérimentale et expérimentale liée aux expérimentations des écoulements brusques contrôlés par seuil mince réalisé en canal rectangulaire composé. Les expressions Y ont été montrées avec et sans  $F_x$ , qui sont assimilés à la relation de Borda-Carnot. Des essais ont été réalisés sous les valeurs du  $\tau_y$  .L'expérimentation faite a justifiée l'acceptation des relations théoriques démontrée sans  $F_x$  quand les valeurs  $\tau_y$  sont situées entre 0,25 et 0,333 et avec  $F_x$  quand  $\tau_y$  prend la valeur à 0,5.

La validation des modèles est reposée essentiellement en fonction des valeurs basses de l'erreur quadratique et de l'erreur relative importante, ces valeurs sont cernées entre à **0,3054** et **6,47**. Aussi La justification de la rentabilité de l'écoulement est démontrée et que erreur maximale ne dépasse pas **4,83 %** . en conclusion , on déduit l'importance de la section composée à la dissipation de l'énergie comparé à la section rectangulaire.

## **Chapitre II**

# **Ressaut Hydraulique Formé en Canal Rectangulaire composé**

## II.1.Introduction

A travers ce présent chapitre , on va décrire les recherches de Riguet et al(2020) qui concerne l'expérimentation et le control des écoulements brusquement variés qui se produisent en canal de forme composé.

## II.2.illustration du banc d'essai

### II.2.1. illustration du banc d'expérimentation.

Le banc d'essai est construit en tôle résistant à l'écoulement de forme rectangulaire, ce dernier est lié avec un moyen de restitution de l'eau pompé, ce bassin est raccordé avec une conduite de diamètre bien déterminée. Cette dernière est raccordée par pompe sur laquelle est introduit un réducteur de section qui se termine finalement en canal d'expérimentation. Ainsi l'écoulement torrentiel est réalisé par ce réducteur de section.

Le banc d'essai est de dimension suivante : de longueur 12 m ,de hauteur 60cm et de 60 cm de largeur .les côtés du banc d'essai sont en matière plexiglas permettant de prendre des mesures et de prises de vue lors de développement du ressaut. Aussi, ce banc est caractérisé par :  $b= 0,2m$  pour le lit mineur ,  $h= 0,2m$  et  $B= 0,6m$  pour le lit majeur , la mesure des débits volumique est évalué par un déversoir de Hachemi Rachedi connu.



*Photos2.1 (a, b, c):vu du canal de mesure .*



*Photo2.2:série de convergents.*



*Photo 2.3: la cloche sous pression.*



*Photo2.4:vu de la vanne*



*Photo 2.5 : Pompe centrifuge*



*Photo2.6:vu de bassin*



*Photo2.7:vu dedéversoir.*

### II.2.2. la détermination des débits spécifiques

Ce déversoir réalisé et testé par *HachemiRachedi (2006)* est bien étalonné est conditionné aux mesures des débits volumiques de l'écoulements en faisant introduire la hauteur d'eau

affleurée à l'approche ci-dessous bien entendu que  $\beta < 0,45$  est vérifié.

$$Q = 0,3794B\sqrt{2g\beta} \left(1 + 0,16496 \cdot B^{2,0716}\right)^{3/2} h_{dev}^{3/2} \quad (2.1)$$

Etant donnée que :

Q: débit d'écoulement m<sup>3</sup>/s;

B: largeur du canal d'essai m;

g: la gravité m/s<sup>2</sup> ;

$\beta$ : Rapport de l'élargissement

b: largeur du déversoir m;

h: lame d'eau affleuré m.

### II.2.3. instrument de mesurage

Cet instrument de haute précision permet de mesurer les différentes hauteurs des écoulements brusquement variés développées au sein du banc d'essai.

Cet instrument a pour rôle de mesurer les profondeurs d'écoulement qui se produit dans le banc d'expérimentation.



*Photo.2.8: appareil d'affleurement.*

### II.2.4. la description des parois de control

Les parois minces de formation des écoulements de passage du torrentiel au écoulement calme sont réalisées en matières métalliques de différentes dimensions dont leurs valeurs sont indiqués à la photo ci-dessous :



Photo2.9:différentes dimensions des parois

### II.3. récapitulation des résultats

#### II.3.1. la problématique d'essai

Le développement pour écoulements brusquement variés dans le banc d'essai est conditionné par les parois minces de formation. Ce développement permet le passage l'écoulement fort à l'écoulement calme. D'où, les caractéristiques obtenues sont les différents débits spécifiques pompés ; les hauteurs d'eau mesurées à l'aval et amont.

Les écoulement réalisés sont en deux étapes, l'un en canal rectangulaire avec  $h_0/h_2 \geq 1$ , et le second se réalise dans la section composée  $h_0/h_2 < 1$ .(Figure 2.1)

L'importance de cet essai est de voir l'effet de la section composée aux caractéristiques des écoulements.

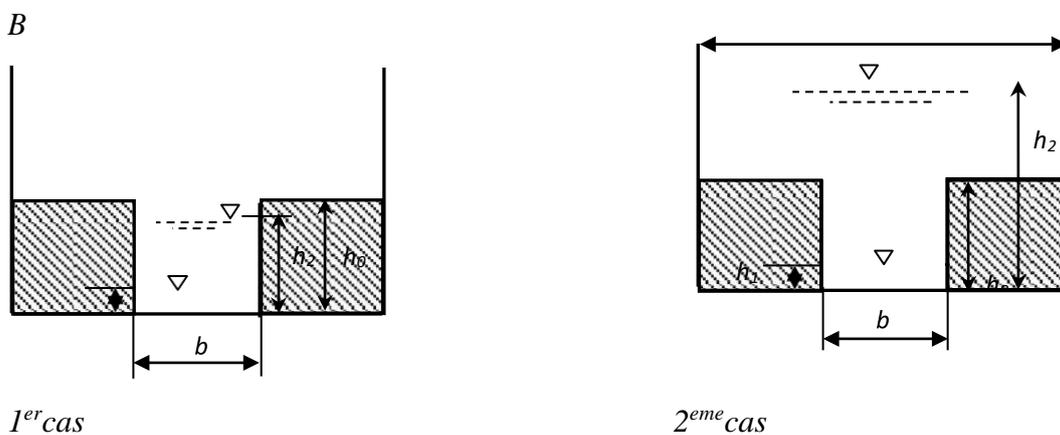


Figure 2.1: représentation de l'écoulement en canal composé

### II.3.2. déroulement de l'expérimentation

Une fois le développement des écoulements brusquement variés créés au sein du banc d'essai, l'étape implorante est de récapituler toutes les mesures caractéristiques de cet écoulement tel que : la deuxième hauteur conjuguée ; la première hauteur conjuguée ; le débit spécifique : les longueurs caractérisant l'écoulement développé ainsi les différentes mesures des parois de control.

Toutes ces mesures récapitulés permettront de déduire tous les rapports adimensionnels caractérisant ces écoulements réalisés.

Des différentes hauteurs d'amont permettant de générer cet écoulement torrentiel ont été conçues et définies, ainsi une série du nombre de Froude qui caractérise cet écoulement a été également acquise.

Le développement du ressaut est réalisé en fonction du débit refoulé et les parois de control, ainsi l'augmentation de débit engendre l'accroissement des caractéristiques de l'écoulement et la mise des seuils adéquats pour reformer le ressaut.

Schématisation des écoulements brusquement variés créés et formés en canal composé pour une ouverture initiale constante avec un débit spécifique graduel, montrés par les photographies ci dessous.

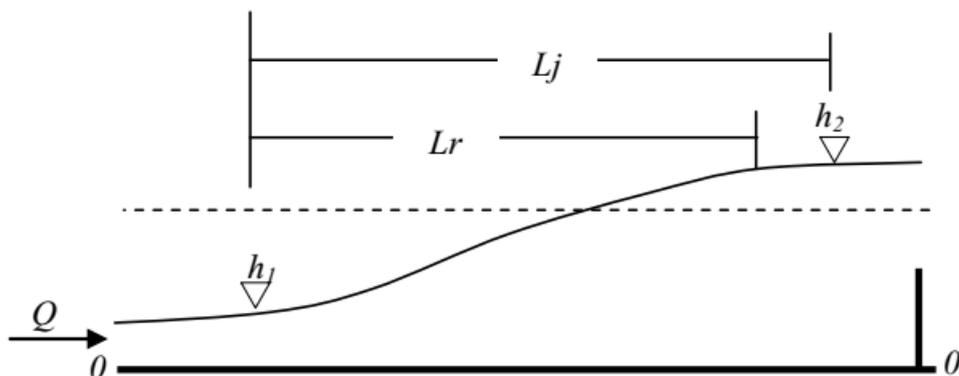


Figure 2.2..illustration du canal rectangulaire composé



*Photo 2.10.*écoulement formé pour  $F_1=5,58$ ;  $s=6$  cm;  $L_j=103$ cm;  $h_2=15,8$ cm ;  $h_1=2,5$ cm



*Photo 2.11* écoulement formé pour  $F_1=8,24$ ;  $s=15$  cm;  $L_j=186$ cm;  $h_2=24,9$ cm ;  $h_1=2,5$ cm

L'expression d'évaluer  $F_1$  est indiqué ci contre: 
$$F_1 = \sqrt{\frac{Q^2}{gb^2h_1^3}}$$

## II.4. discussion des résultats

### II.4.1. représentation du rapport Y et du nombre de Froude $F_1$

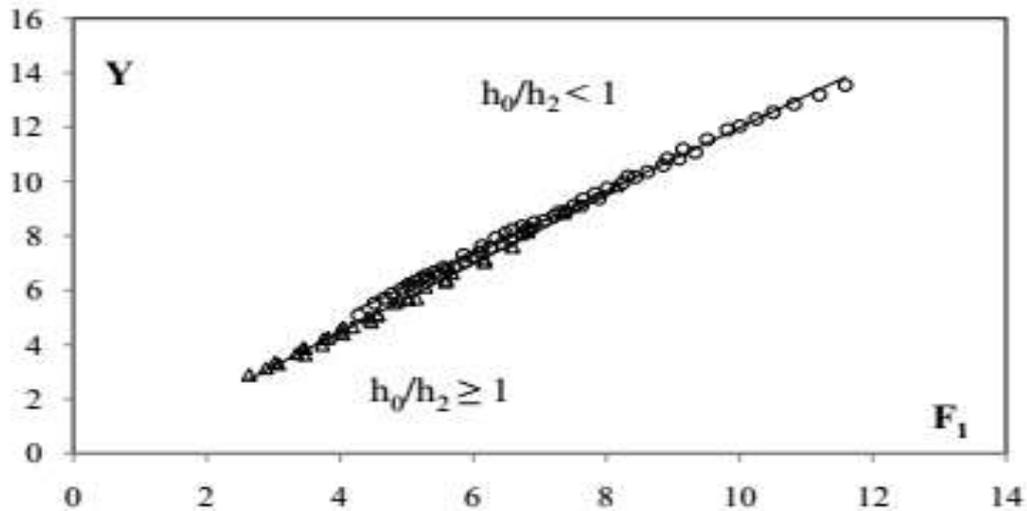


Figure 2.3. rapport Y avec  $F_1$

On note que la caractéristique Y s'évoque linéairement avec l'augmentation du facteur  $F_1$  pour la section composée du canal.

La corrélation des mesures expérimentales concernant le couple  $(Y, F_1)$  est de type linéaire

On constate que la section composée du canal présente deux nuages distincts, qui se présente pour les deux lits du canal composé.

Ainsi, la section composée présente un effet positif à la section mineur que celle de la section majeur. Par conséquent la corrélation a donnée deux approches qui se sont indiquées ci-dessous.

$$\begin{aligned} \text{Pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad Y &= 1,258 F_1 - 0,573 ; R^2=0,995 \\ &2,64 < F_1 < 8,14 \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Pour } h_0/h_2 < 1 : \quad Y &= 1,165 F_1 + 0,328 ; R^2=0,995 \\ &4,27 < F_1 < 11,58 \end{aligned} \quad (2.3)$$

L'illustration (2.4) ci-dessous indique la corrélation de Y avec S.

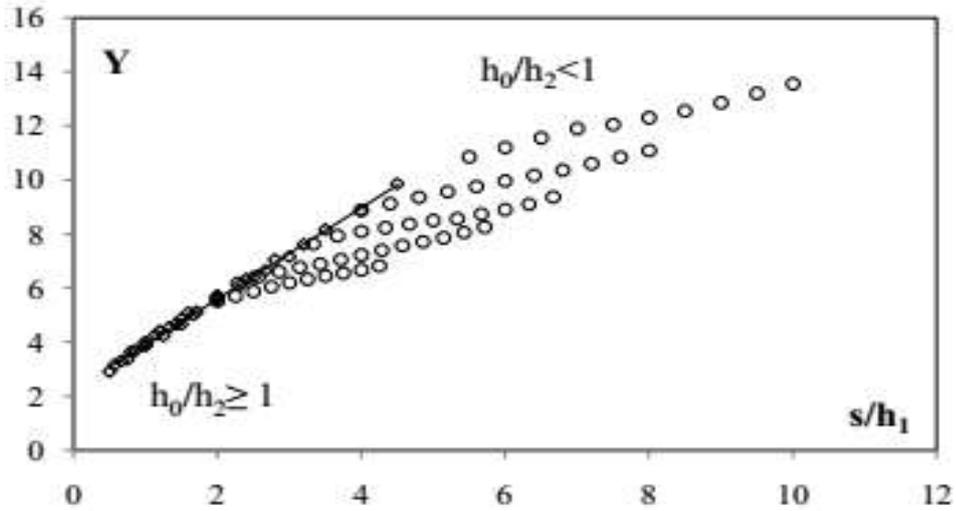


Figure 2.4. rapport Y avec avec  $S = s/h_1$

On constate que la corrélation des motifs expérimentaux au lit mineur pour le couple (Y,S) donne une courbe unique de type linéaire montrée par l'expression(2.4).

$$Y = 1,684 s / h_1 + 2,226 ; R^2=0,997 \quad (2.4)$$

Par contre au lit majeur , la corrélation des motifs expérimentaux montre un effet important des ouvertures pour le même couple (Y,S) et que chaque ouverture initiale lui correspond une allure bien déterminée. Figure(2.5)

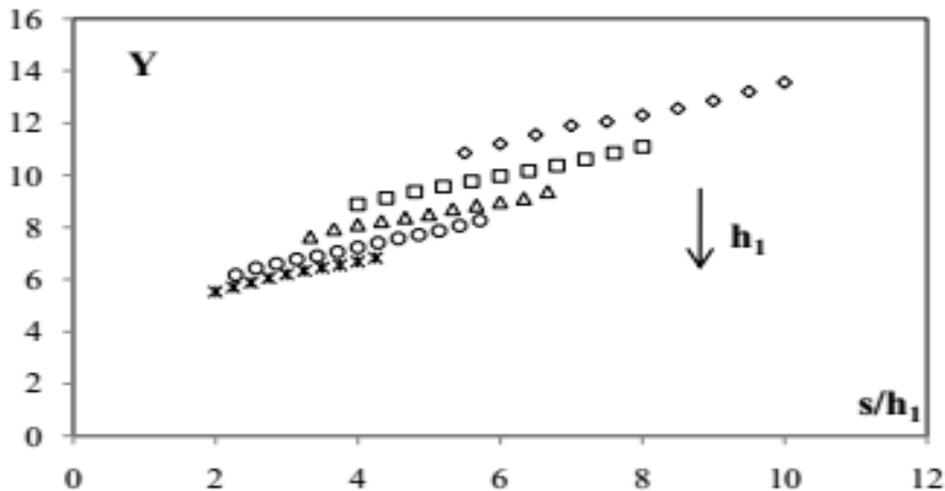


Figure 2.5 :illustration du Y avec le seuil S pour différentes ouvertures  $h_1$ :( $\diamond$ )2 ; ( $\square$ )2,5 ;( $\Delta$ )3;

(o)3,5;(\*)4, avec  $h_0/h_2 < 1$ . Pour  $h_0/h_2 < 1$ .  $h_1$ :( $\diamond$ )2 ; ( $\square$ )2,5 ;( $\Delta$ )3; (o)3,5;(\*)4.

On note que d'après cette figure, l'effet des ouvertures est perceptible. Chacune lui correspond une ouverture fixée. Par conséquent, pour une valeur fixée du seuil,  $Y$  s'abaisse avec l'accroissement de l'ouverture initiale.

Les figures 2.6. (a, b, c, d, e) indiquent que  $Y$  varie en fonction du rapport  $s/h_1$ , pour les cinq ouvertures relatives, tels que:  $h_1/B=0,033, 0,041, 0,05, 0,058, 0,066$ .

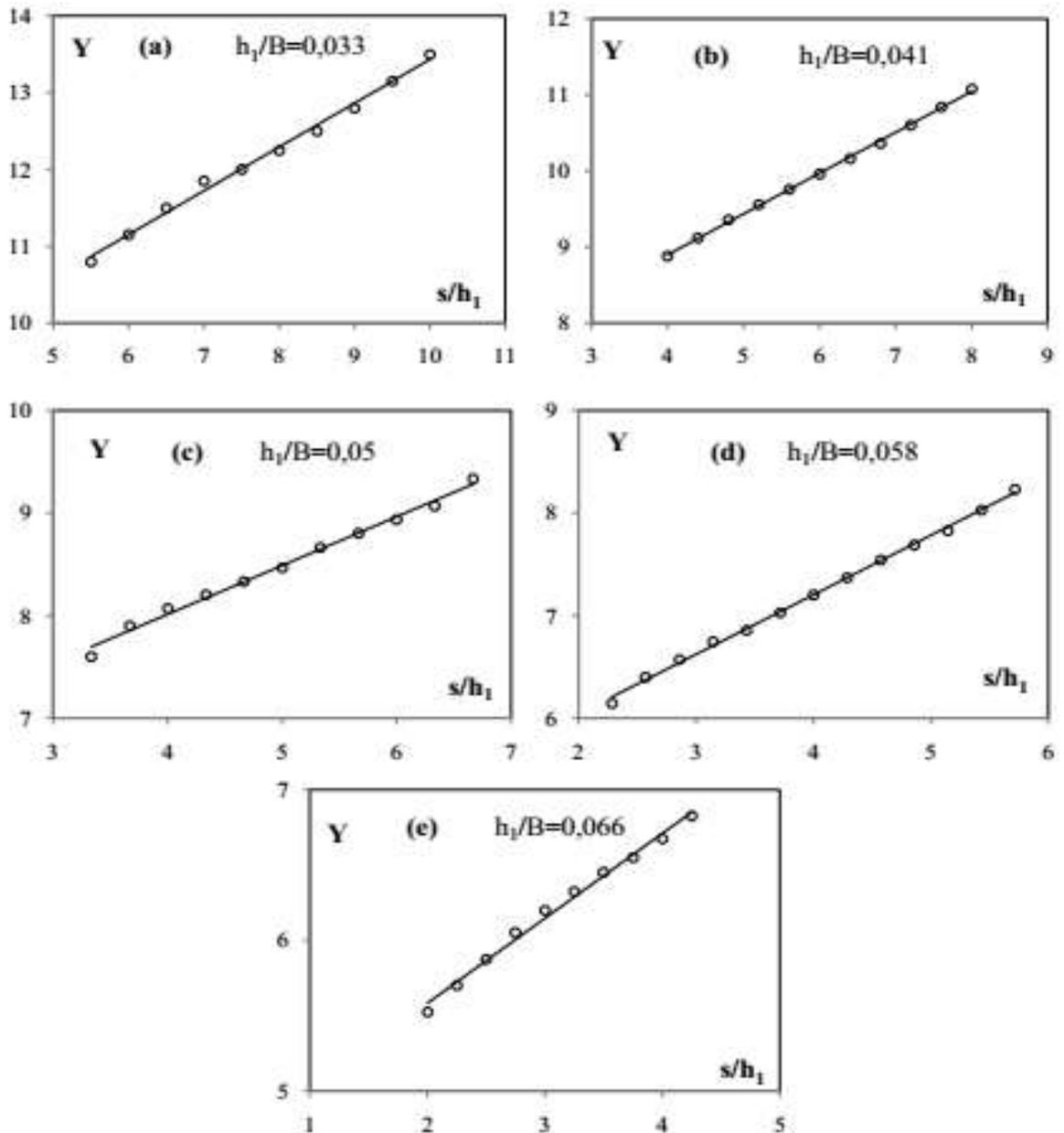


Figure 2.6. ces différentes illustrations montrent la variation du  $Y$  en fonction de  $S=s/h_1$  pour diverses ouvertures relatives.

Selon les figures 2.6. (a, b, c, d, e), la corrélation des mesures expérimentales pour le couple  $(Y,S)$  suit une relation linéaire, pour différentes ouvertures initiales d'expression suivante :  $Y = aX+b$ . le paramètre  $a$  prend une moyenne 0,545. par contre la corrélation de couple de valeur  $(b, h_1/B)$  suit une expression linéaire indiquée ci-dessous :

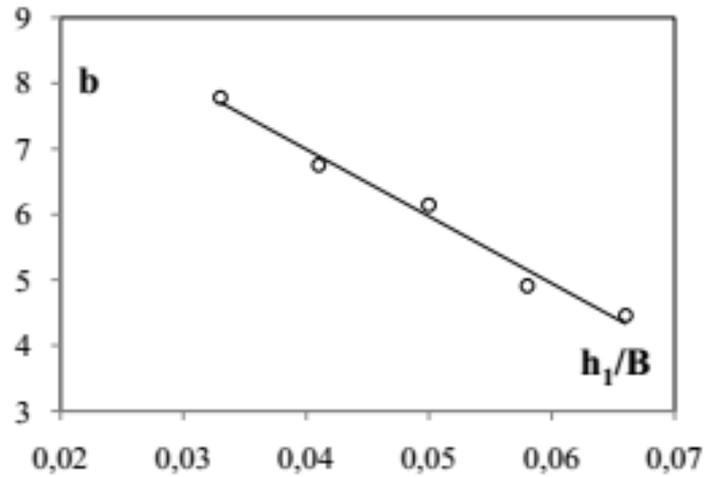


Figure 2.7. coefficient "b" varie avec "y1".

$$b = -102,3 h_1 / B + 11,08; R^2 = 0,982 \quad (2.5)$$

En injectant les paramètres a et b par leurs valeurs dans l'approche globale on aura ce qui suit :

$$Y = 0,545s / h_1 - 102,3 h_1 / B + 11,08$$

$$4,27 \leq F_1 \leq 11,58 \text{ et } 0,033 \leq h_1/B \leq 0,066 \quad (2.6)$$

La figure (2.8) montre que Yexp et Yapp sont validés par la première bissectrice.

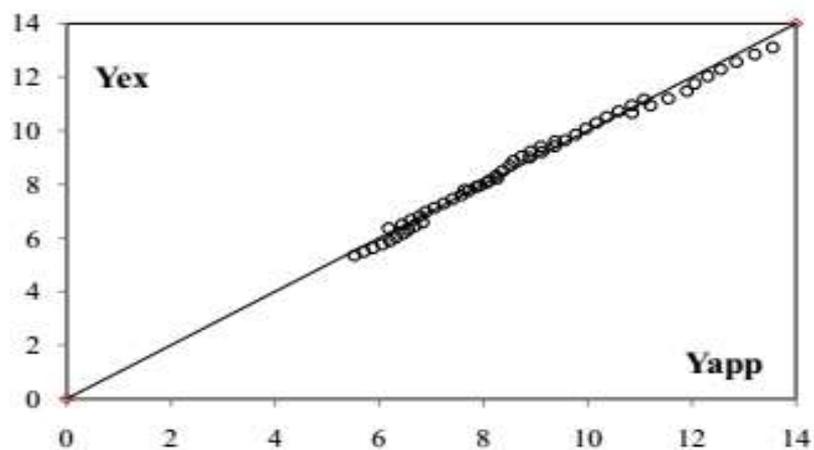


Figure 2.8 : rapport Yexp et Yapp

Cette figure justifie clairement que l'approche globale empirique obtenue est validée la fiabilité de leurs mesures expérimentales obtenues.

#### II.4.2. Variation $L_j/h_1$ en fonction du $F_1$

Cette représentation (2.9) indique la corrélation entre  $L_j/h_1$  avec  $F_1$  pour la section composée du canal .

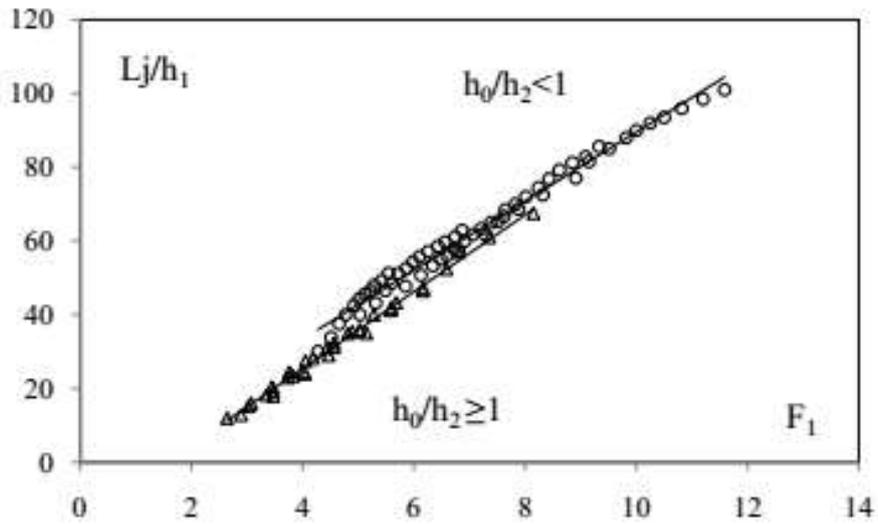


Figure 2.9.illustration des mesures de  $L_j/h_1$  comparés avec  $F_1$  pour la section composée

Les approches globales obtenues pour la forme composée sont indiquées ci-dessous :

- Pour  $h_0/h_2 \geq 1$  :  $L_j / h_1 = 10,41F_1 - 16,23 ; R^2 = 0,993$
- Pour  $h_0/h_2 < 1$  :  $L_j / h_1 = 9,378F_1 - 4,211 ; R^2 = 0,985$  (2.7)

### II.4.3.représentation de $L_r/h_1$ en fonction du $F_1$

Cette représentation ci-dessous montre que  $L_r/h_1$  varie linéairement avec le facteur  $F_1$ , pour la forme composée.

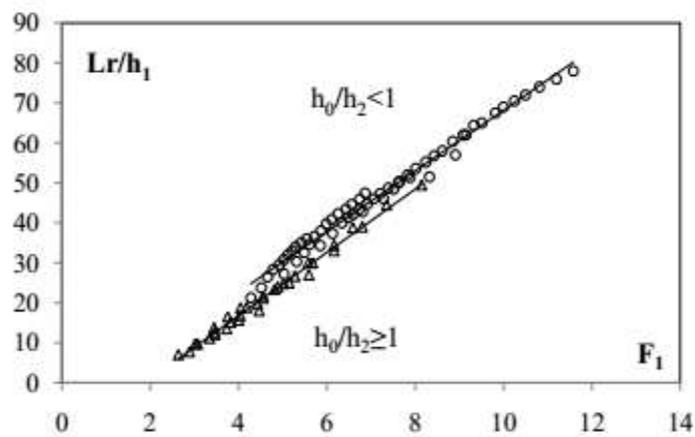


Figure 2.10 .illustration du rapport  $L_r/h_1$  avec  $F_1$  pour les deux lits du canal

La corrélation des mesures expérimentales entre le rapport  $Lr/h_1$  et de  $F_1$  donne deux approches liées aux lits mineur et majeur du canal d'essai.

- Pour  $h_0/h_2 \geq 1$   $Lr/h_1 = 7,907F_1 - 14,85 ; R^2 = 0,991$
  - Pour  $h_0/h_2 < 1$   $Lr/h_1 = 7,599F_1 - 7,788 ; R^2 = 0,987$
- (2.8)

**II.4.4.représentation de  $s/h_1$ avec le paramètre  $F_1$**

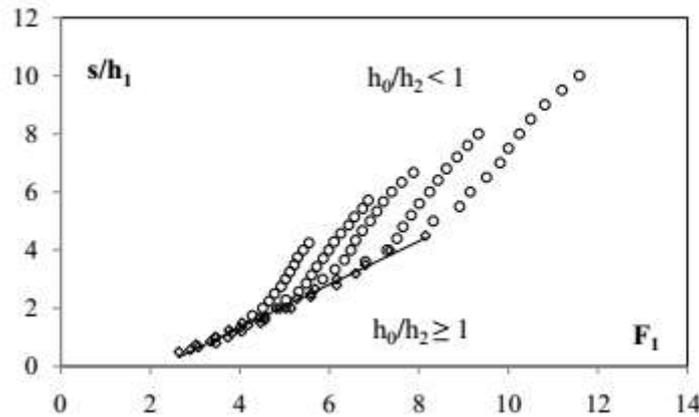


Figure. 2.11. Illustration du  $S/h_1$  et de  $F_1$  pour la section composée.

La corrélation des mesures d'essai du couple de valeur  $(S/h_1, F_1)$  pour le lit mineur a produit l'approche suivante (2.9)

$$s/h_1 = 0,743F_1 - 1,645 ; R^2 = 0,989 \tag{2.9}$$

Cependant au lit majeur, l'effet des ouvertures au couple de valeur  $(S/h_1, F_1)$  est perceptible.

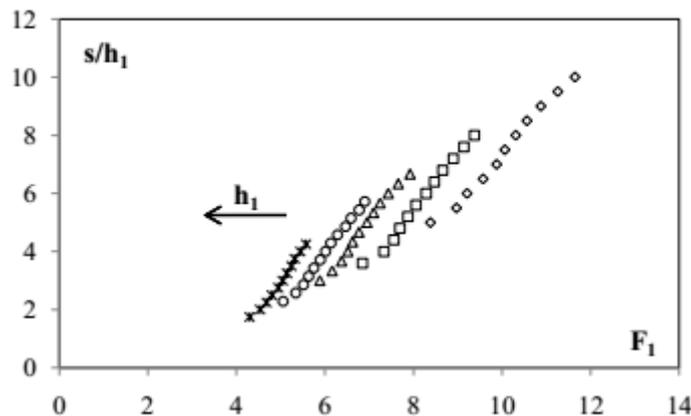


Figure. 2.12. Illustration de  $S/h_1$  et  $F_1$  pour différentes ouvertures initiales

Cette représentation ci-dessus montre que l'effet des ouvertures initiales est très perceptibles lors de comparaison des valeurs du couple  $(S/h_1, F1)$ . Par ailleurs, la corrélation de ces couples de mesures pour chacune des ouvertures initiales donne des relations qui sont montrées dans les figures ci-dessous.

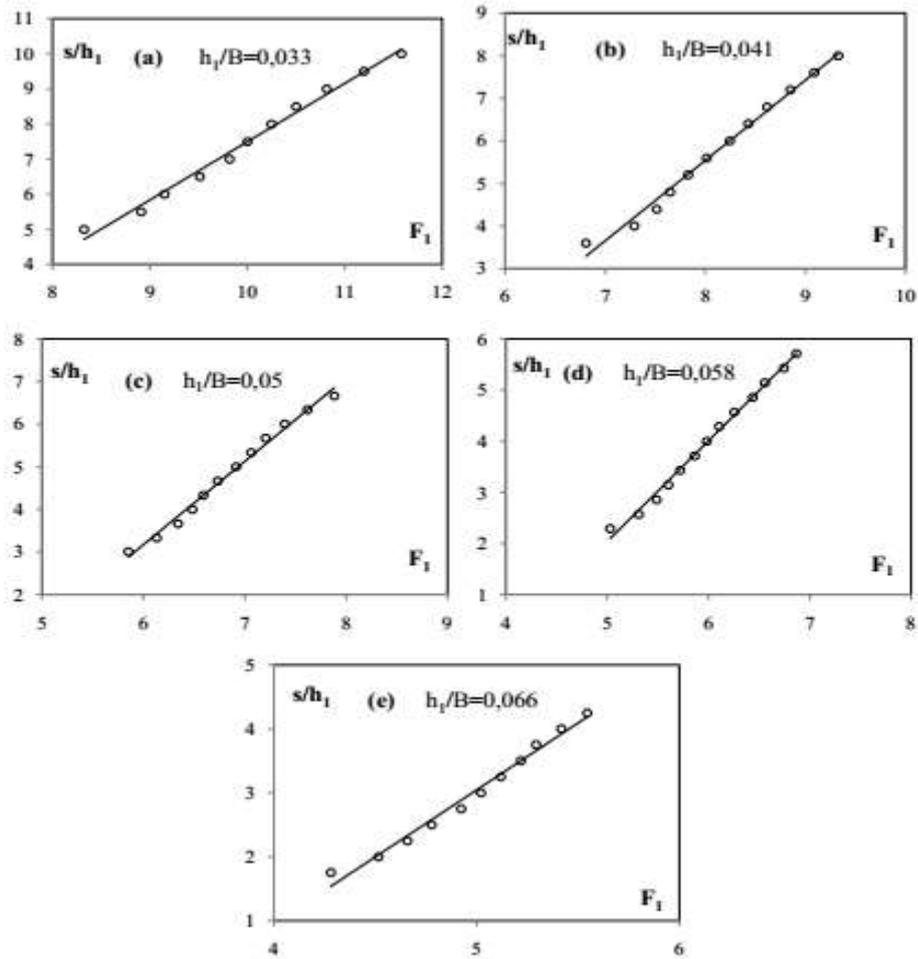


Figure. 2.13: Représentation du  $S$  en fonction du  $F_1$  pour diverses ouvertures initiales.

L'exploitation des résultats obtenus à partir des figures ci-dessus a donné une expression explicite de forme  $S/h_1 = aF_1 + b$  dont le facteur  $a$  varie proportionnellement avec l'ouverture relative initiales et le paramètre  $b$  varie aussi.

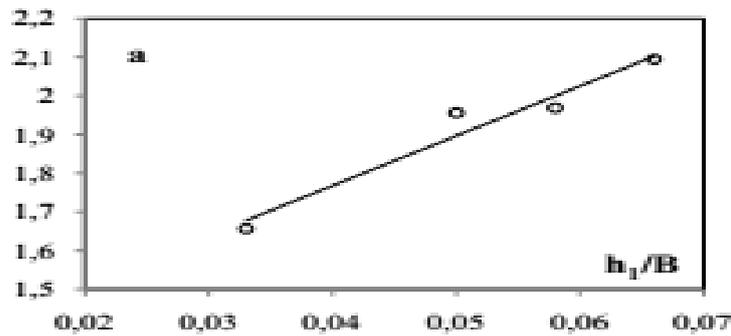


Figure 2.14. illustration du facteur 'a' avec  $h_1/B$ .

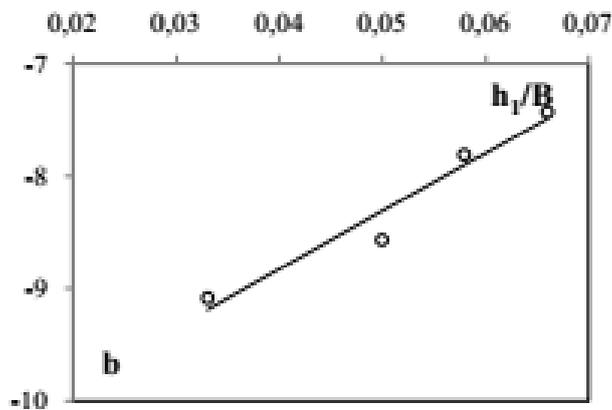


Figure 2.15. illustration du facteur 'b' avec  $h_1/B$ .

Les corrélations des résultats obtenus à partir des figures 2.14 et 2.15 donnent deux expressions suivantes :

$$\begin{aligned} a &= 12,85 h_1 / B + 1,254 ; \quad R^2 = 0,952 \\ b &= 51,28 h_1 / B - 10,87 ; \quad R^2 = 0,948 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Par conséquent l'approche globale liant  $S/h_1, h_1/B$  et  $F$  est indiquée ci-dessous

$$\begin{aligned} s/h_1 &= (12,85 h_1 / B + 1,254) F_1 + 51,28 h_1 / B - 10,87 \\ 4,27 &\leq F_1 \leq 11,58 \quad \text{et} \quad 0,033 \leq h_1/B \leq 0,066 \end{aligned} \quad (2.11)$$

La validation de cette approche empirique globale adimensionnelle obtenue est justifiée expérimentalement avec les mesures expérimentales obtenues.

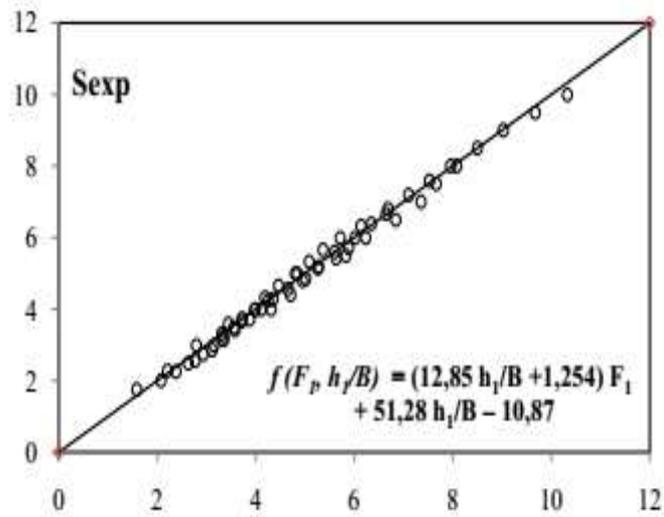


Figure 2.16: comparaison entre l'approche globale et leurs mesures expérimentales

## II.5.conclusion

Cet axe premier qui engendre le deuxième chapitre a traité les écoulements brusquement variés produisant en canal de forme composée contrôlé par parois minces. L'auteur a bien montré le protocole expérimental servant à réaliser les essais, sans oublier tous les instruments et appareils nécessitant pour concrétiser cette expérimentation. Le chercheur a bien exposé leurs résultats obtenus.

L'exploitation de toutes les mesures expérimentations par le chercheur a produit ce qui suit :

01/ deux approches globales du rapport  $Y$  de type linéaire varient avec le paramètre  $F_1$ , Pour la section composée du canal ont été obtenues. Cette section présente un effet positif caractéristique de l'écoulement.

02/Aussi, l'auteur a pu obtenir deux approches empiriques adimensionnelles liant  $L_j/h_1$ ,  $L_r/h_1$  et le paramètre  $F_1$ , et ceci pour les deux lits de la section composée. cette section aussi présente un effet réducteur des caractéristiques des écoulements brusquement variés pour la section composée.

03/ l'auteur a aussi obtenu une approche fonctionnelle à caractère adimensionnelle du seuil relatif  $s/h_1$  avec le paramètre  $F_1$ , il a pu démontrer que l'effet des ouvertures initiales au lit majeur du canal est perceptible.

Finalement, l'approche globale liant  $s/h_1$ ;  $F_1$  et  $h_1/B$  a été obtenue.

## CONCLUSION DU PREMIER VOLET

### Récapitulation des résultats pour le premier axe bibliographique.

Pour ce premier axe bibliographique, nous avons exposé les recherches scientifiques réalisées par Khattaoui et Achour (2012), qui sont appliquées directement au écoulement réalisé en canal rectangulaire composé. Ils ont démontré une fonction liant :  $\phi(F_1; Y; \beta; \tau) = 0$ . Également, une relation théorique a été fournie par Khattaoui et Achour (2012) en faisant rajouter l'effet des frottements liés à la section composée.

Ensuite, une relation globale de l'impulsion de frottement est développée théoriquement par Achour (2000) en s'appuyant sur les écoulements effectués au sein de la galerie circulaire brusquement élargie.

Une approche établie par Benabdesselam et Al (2017 et 2020) a été exposée. Cette relation d'ordre expérimentale et expérimentale liée aux expérimentations des écoulements brusques contrôlés par seuil mince réalisé en canal rectangulaire composé. Les expressions  $Y$  ont été montrées avec et sans  $F_x$ , qui sont assimilés à la relation de l'auteur Borda-Carnot. Les essais ont été réalisés sous des valeurs du  $\tau_y$ . L'expérimentation faite a justifié l'acceptation des relations théoriques démontrées sans  $F_x$  quand les valeurs  $\tau_y$  sont situées entre 0,25 et 0,333 et avec  $F_x$  quand  $\tau_y$  prend la valeur à 0,5.

La validation des modèles est reposée essentiellement sur les limites de l'erreur quadratique et celle relative, ces valeurs sont cernées entre à **0,3054** et **6,47**. Aussi, la justification de la rentabilité de l'écoulement est démontrée et que l'erreur maximale ne dépasse pas 4,83%. En conclusion, on déduit l'importance de la section composée à la dissipation de l'énergie comparée à la section rectangulaire.

Aussi pour le premier axe qui engendre le deuxième chapitre bibliographique, nous avons exposé les écoulements brusquement variés produisant en canal de forme composée contrôlé par parois minces. L'auteur a bien montré le protocole expérimental servant à réaliser les essais, sans oublier tous les instruments et appareils nécessitant pour concrétiser cette expérimentation. Le chercheur a bien exposé leurs résultats obtenus.

L'exploitation de toutes les mesures expérimentations par le chercheur a produit ce qui suit :

01/ deux approches globales du rapport  $Y$  de type linéaire varient avec le paramètre  $F_1$ , pour la section composée du canal ont été obtenues. Cette dernière présente un effet positif pour le lit mineur de la section composée.

02/Aussi, l'auteur a pu obtenir deux approches empiriques adimensionnelles liant  $L_j/h_1$ ,  $L_r/h_1$  et le facteur  $F_1$ , et ceci pour les deux lits de la section composée. Cette section aussi présente un effet réducteur des caractéristiques des écoulements brusquement variés au lit mineur.

03/ l'auteur est arrivé à démontrer une approche fonctionnelle à caractère adimensionnelle du seuil relatif  $s/h_1$  avec le facteur  $F_1$ , il a pu démontrer que l'effet des ouvertures initiales au lit majeur du canal est perceptible. Finalement, l'approche globale liant  $s/h_1$ ;  $F_1$  et  $h_1/B$  a été obtenue.

***Deuxième partie***

**Etude théorique et  
expérimentale**

## Introduction du deuxième volet

Aperçu général de la partie de contribution

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

Les écoulements qui se forment en canal composé engendrent par une interaction entre les deux lits du canal composé. Cet écoulement provoque un transfert de masse entre les deux lits, associé à la création de turbulences d'écoulement à la jonction de la section composée. ce qui provoque une dissipation de l'énergie, cette interférence change la capacité d'écoulement de la forme composée Proust (2005).

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

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

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

Ce deuxième axe principal est subdivisé en trois chapitres primordiaux :

- En premier lieu, On présentera le banc d'expérimentation avec leurs appareillages de mesure.
- En second lieu, on essaiera de développer une approche théorique qui engendre surtout la caractéristique de résistance à l'écoulement ,dont on voudrait voir son efficacité aux écoulements brusque que se manifeste au sein des ouvrages hydrauliques.
- En dernier lieu, on doit exploiter toutes les mesures expérimentales obtenues par l'analyse des écoulements brusques qui se produisent dans les canaux de forme

composé rugueux, en but fondamental de produire des approches empiriques régissant les différentes caractéristiques d'écoulement.

# *Chapitre I*

## **Illustration du banc expérimental**

## I.1.INTRODUCTION

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

### I.2. banc d'essai

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

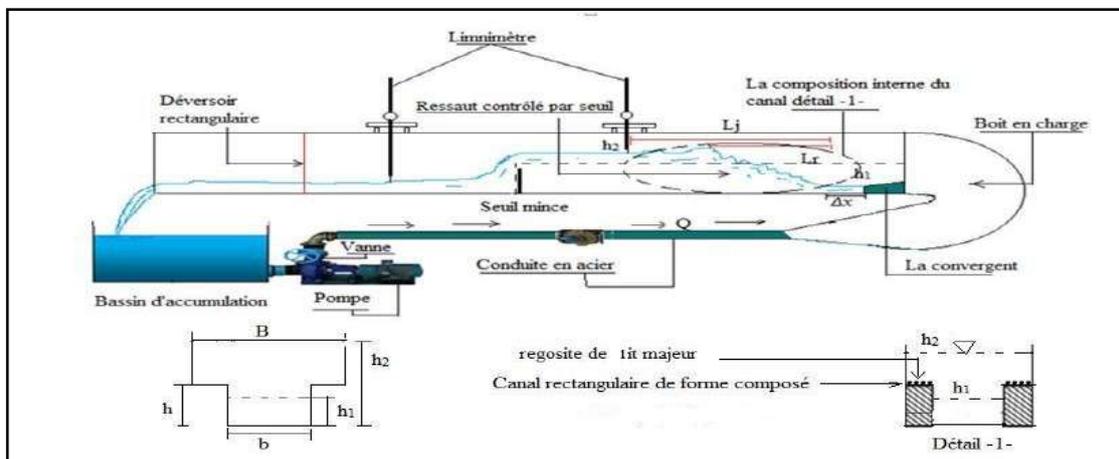


Figure 1.1. vue d'ensemble du canal d'essai



*Photo 1.1. Vue du canal*

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

*Photo1.2.Pompecentrifuge axiale**Photo1.3.La vanne de régulation du débit.*

## I.2. INSTRUMENTS UTILISES AU MESURAGE

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

Le dispositif spécifique destiné aux mesures des débits dispose de caractéristiques bien définies suivantes : la largeur de l'échancrure de 11 cm ; largeur au miroir de 25 cm. il est lié directement à l'aval du canal de forme composé rugueux. ce dispositif est validé par *Hachemi Rachdi (2007)*, avec des conditions d'applications.



*Photo1.4. dispositif de mesurage des débits volumiques*

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

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

Sachant les caractéristiques suivantes :

Q : débit spécifique m<sup>3</sup>/s

$\beta$  : Rapport de l'échancrure .

b : échancrure de valeur : 11 cm

B : la largeur du déversoir 25 cm

$g$  : la gravitation  $m/s^2$ .

$h_{dev}$ : profondeur affleurée  $m$ .

### I.2.2. instrument limnimétrique

Les hauteurs d'eau des écoulements brusques développés et contrôlés au banc d'essai sont évalués par un instrument spécifiques de double précision s'appelle le limnimètre. cet appareil est bien installé et ajusté au front de l'écoulement crée.(photo 1.5)

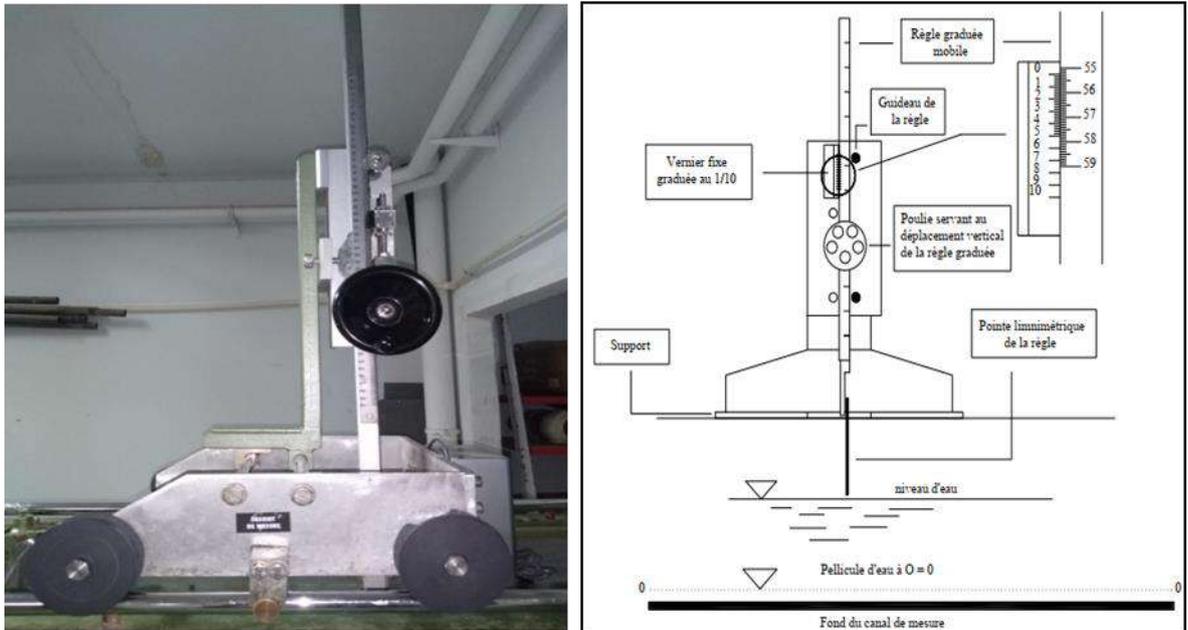


Photo 1.5. appareillage de lecture des profondeurs .

## I.3. déroulement expérimental

### I.3.1.les étapes des essais

Ces essais réalisés au laboratoire se sont spécifiés aux écoulements brusques produits et contrôlés au sein du banc d'expérimentation de section composée rugueuse. Des différentes ouvertures  $h_1$  ont été expérimentées (photo 1.6).



*Photo 1.6. Différentes parois des ouvertures conçues*

La création des écoulements de passage du régime torrentiel au régime calme est réalisé et formé par des parois spécifiques placées en travers de cet écoulement .ces différentes seuils de control sont préparés au laboratoire (photo1.7)

*Photo1.7.Les parois minces pour contrôler un écoulement de passage des régimes.*

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

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

$Y=h_2/h_1$  rapport des profondeurs ;

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

$Lj/h_1$  rapport de longueur relative ;

$L_r/h_1$  rapport de longueur du rouleau ;

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

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

Ce moyen de rugosité est nécessaire à le concevoir au laboratoire vu l'écoulement très érosif auprès des ouvrages hydrauliques notamment à l'aval des barrages de stockage d'eau qui peut provoquer la détérioration de ces ouvrages. A cet effet ces tapis rugueux qui doivent être imposés aux lits majeurs des canaux de section composée sont nécessaires à réaliser pour dissiper cette énergie importante de l'écoulement. Par le moyen des pellets homogènes et uniformes on est arrivé à concevoir quatre tapis rugueux uniformes photo (1.10).

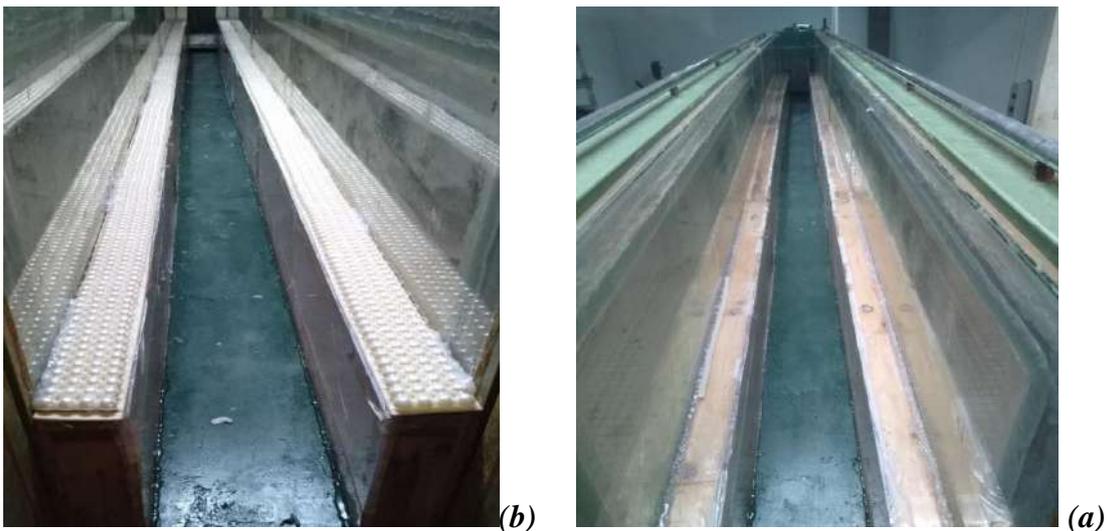
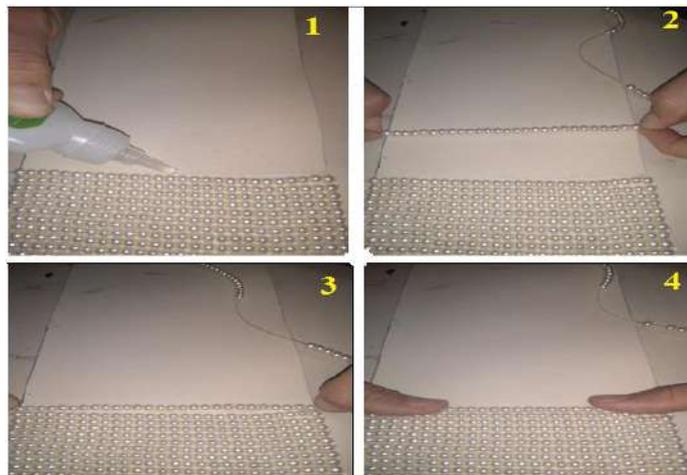
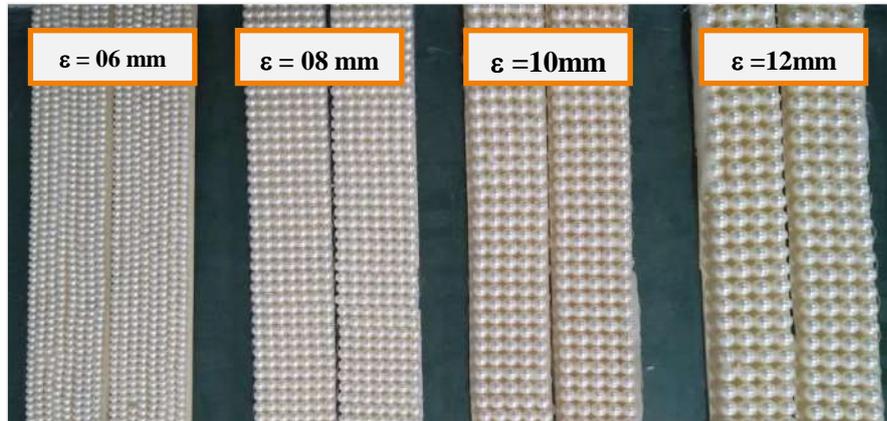


Photo 1.8.a) section composée rugueuse b) section composée lisse



*Photo 1.9. la conception des tapis rugueux*



*Photo 1.10. Les tapis rugueux divers*

## I.5. récapitulation des résultats

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

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

## ***Chapitre II***

# **Etude théorique**

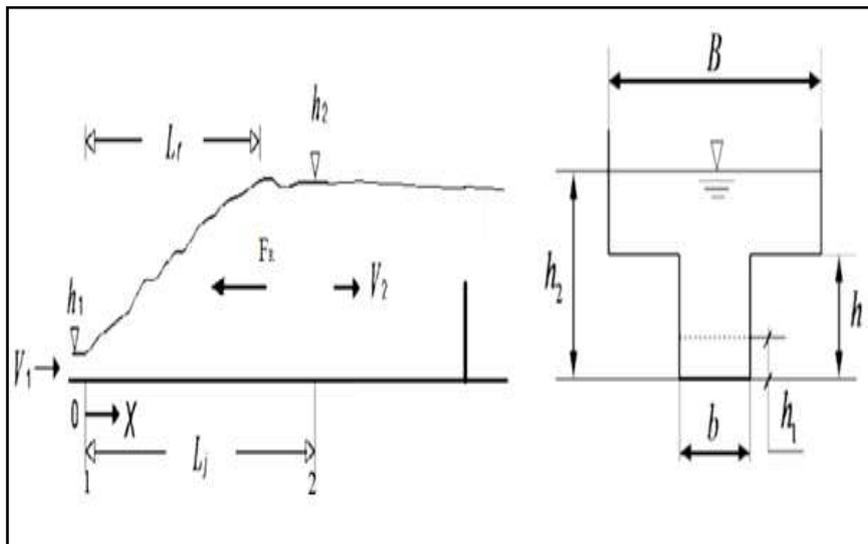
## II.1. Aperçu général

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

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

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

### II.2.1. description théorique



*Figure 2.1. illustration schématique du banc d'essai de section composée rugueux.*

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

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

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

### II.2.2. développement de la relation adimensionnelle selon Euler

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

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

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

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

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

Les suppositions d'Euler aux écoulements sont :

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

L'expressions (2.1) se formule comme suit :

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

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

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

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

$v$  : vitessed'écoulement (m/s)

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

l'application de la théorie d'EULER entre les deux sections de l'écoulement brusquement varié de passage se forme comme suit :  $\Delta P = \Delta P_2 - \Delta P_1 \quad (2.4)$

Avec :

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

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

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

L'expression (2. 4) divisée par  $\Delta t$ , on aura ce qui suit :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$A_1 = b h_1 \quad (2.13)$$

$$A_2 = B(h_2 - h) + b h. (2.14)$$

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

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

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

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

avec :

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

$C$  : facteur de rugosité ;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### II.3. récapitulation des Résultats

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

L'évaluation du paramètre  $C_r$  se déduit par les mesures obtenues au laboratoire , ainsi une illustration sur la figure (2.22) concernant

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

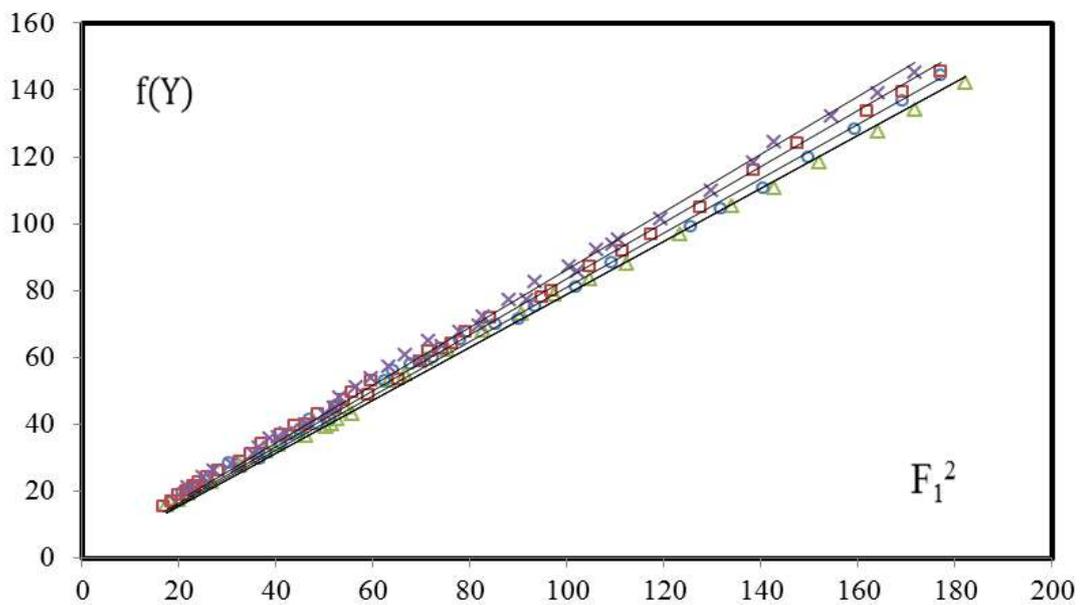


Figure 2.2 .Variation  $f(Y)$  en fonction de  $F_1^2$ .

$\varepsilon(mm) = (\times) 06, (\square) 08, (o) 10$  et  $(\Delta) 12$ .

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

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

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

Le facteur 'S' désigne le paramètre (1-Cr). Ainsi les résultats obtenus de Cr sont mentionnés au tableau ( 2.1) .

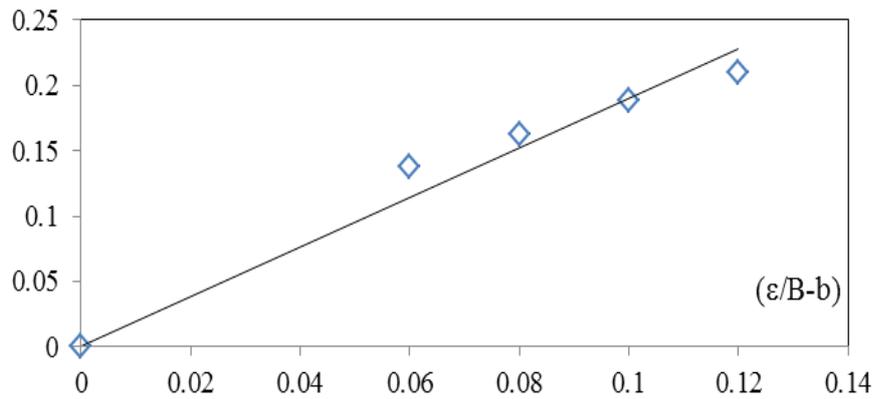
*Tableau 2.1.illustration Cr*

$\epsilon/B-b$	Cr	R <sup>2</sup>
<b>0,06</b>	0,13	0,99
<b>0,08</b>	0,16	0,99
<b>0,10</b>	0,18	0,99
<b>0,12</b>	0,21	0,99

Les valeurs calculées indiquent la variation du facteur Cr qui s'évolue avec l'importance de ( $\epsilon/B-b$ ). la corrélation des couples des mesures ( $\epsilon/B-b$ , Cr) produit une approche suivante :

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

L'allure (2.3) montre la corrélation de Cr avec ( $\epsilon/B-b$ ).



*Figure 2.3. évolution du paramètre Cr avec  $\epsilon/B-b$*

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

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

La figure (2.4) illustre la comparaison entre les deux membre suivantes :  $f(y_1, y_2) = \xi$  ( $\varepsilon/B-b, F_1$ ) . cette illustration montre que la plut part des motifs expérimentaux s'ajustent parfaitement de bissectrice justifiant la fiabilité de ces dernières.

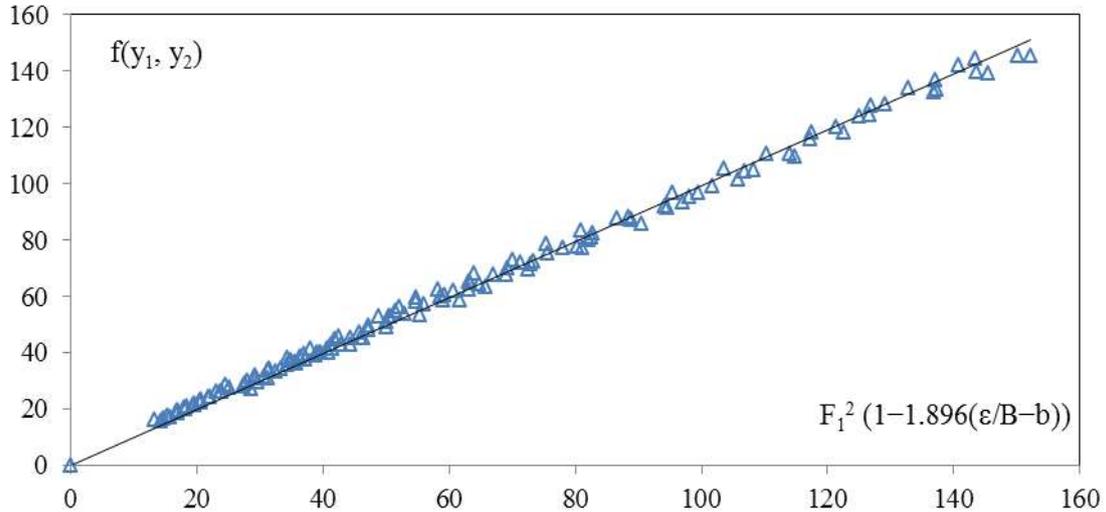


Figure 2.4. illustration de  $f(y_1, y_2)$  variant avec  $F_1^2 (1 - 1.896(\varepsilon/B - b))$

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

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

L'approche (2.22) obtenue est implicite , à cet effet nous avons analyser les mesures expérimentales du rapport  $Y$  avec l'expression qui engendre le facteur de résistance  $Cr$  et de  $Fr$  .cette étude a permis d'avoir une approche explicite permettant de déduire le rapport  $Y$  explicitement(2.23). cette corrélation des mesures expérimentes est illustrée dans la figure (2.5).

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

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

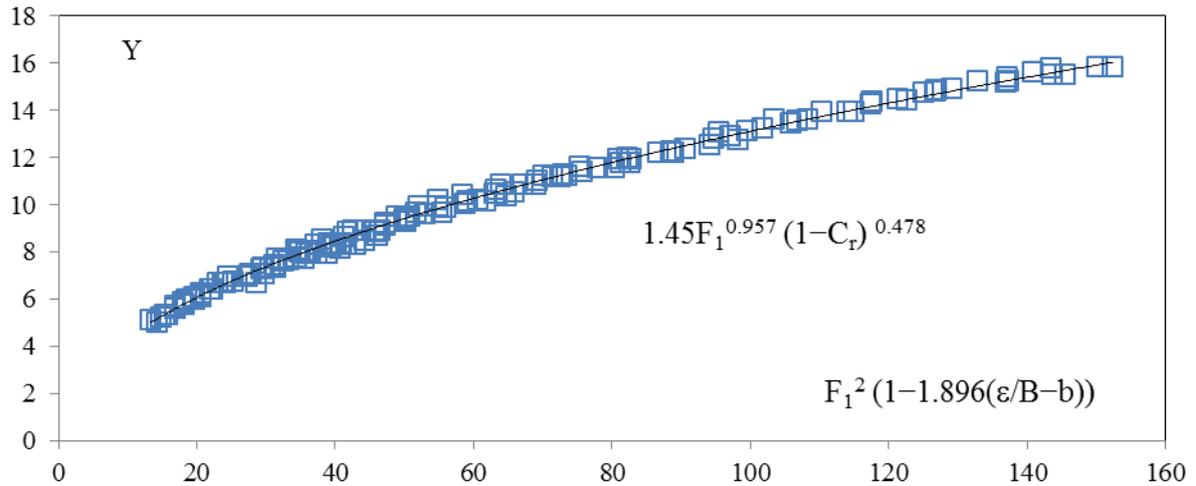


Figure 2.5 .illustration du Y avec de  $F_1^2 (1-C_r)$ .

(□) motifs d'essai .

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

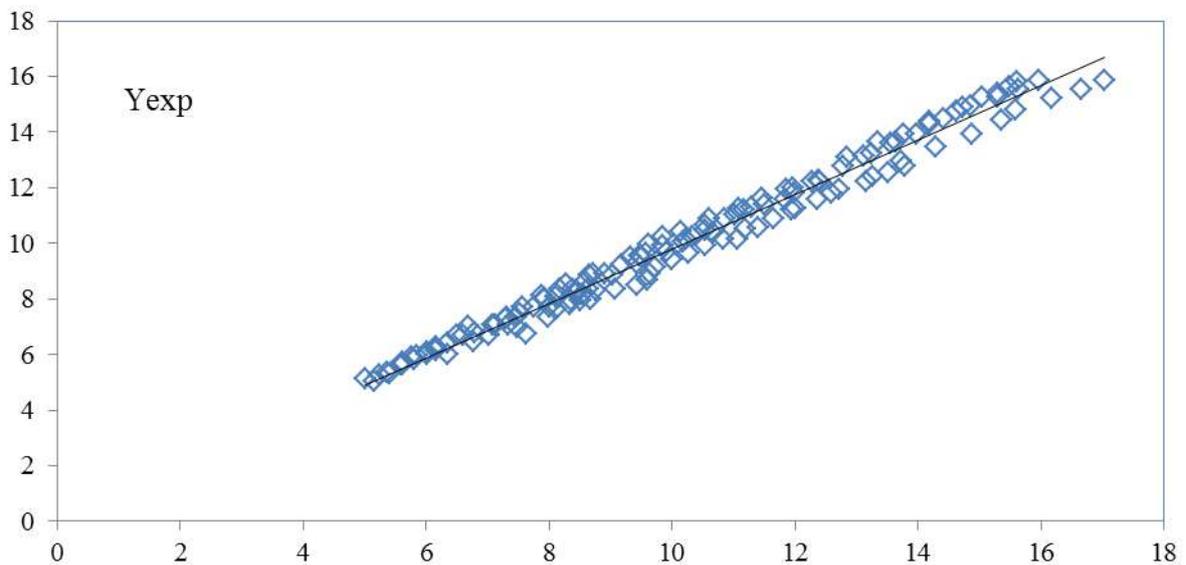


Figure 2.6. illustration de Y avec l'approche (2.22).

(□)Motifs d'essai.

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

*Tableau 2.2.rapport  $Y$  exp et celui  $Y$  de l'approche empirique obtenue*

$Y_{\text{exp}}$	$Y_{\text{app}}$	$\Delta Y/Y$ (%)	$Y_{\text{exp}}$	$Y_{\text{app}}$	$\Delta Y/Y$ (%)
5.13	4.94	3.64	14.75	14.65	0.65
5.35	5.29	1.14	15.25	15.33	-0.53
5.63	5.53	1.74	15.55	15.67	-0.79
6.13	6.09	0.49	15.85	16.02	-1.05
6.78	6.72	0.78	6.73	7.14	-6.18
7.08	7.06	0.15	6.03	5.92	1.78
7.28	7.24	0.52	6.46	6.32	2.19
7.48	7.46	0.26	6.71	6.57	2.21
7.73	7.94	-2.82	7.80	7.81	-0.13
7.95	8.30	-4.44	7.97	8.13	-2.01
8.18	8.49	-3.80	8.49	8.84	-4.20
8.33	8.71	-4.68	8.69	9.01	-3.72
10.16	10.18	-0.20	5.65	5.82	-2.99
10.48	10.50	-0.21	5.73	5.91	-3.19
10.88	10.83	0.50	5.95	6.04	-1.53
11.20	11.15	0.42	6.38	6.40	-0.43
11.60	11.82	-1.87	6.55	6.63	-1.25
12.24	12.41	-1.36	6.78	6.91	-1.99
12.00	11.94	0.48	7.00	7.14	-2.06
12.80	12.79	0.07	7.20	7.29	-1.20
13.15	13.11	0.27	7.40	7.57	-2.33
13.65	13.66	-0.06	7.68	7.86	-2.45
14.30	14.21	0.64	7.85	8.11	-3.27
10.23	10.30	-0.66	8.43	8.40	0.39
10.40	10.64	-2.27	8.71	8.62	1.04
8.36	8.32	0.45	9.03	9.03	0.02
8.92	8.85	0.76	5.08	5.25	-3.51
9.28	9.39	-1.21	5.30	5.47	-3.18
9.68	9.86	-1.89	5.53	5.73	-3.72

Tableau 2.2. (Suit) comparaison entre  $Y_{exp}$  et celui  $Y$  de l'approche empirique obtenue.

$Y_{exp}$	$Y_{app}$	$\Delta Y/Y$ (%)	$Y_{exp}$	$Y_{app}$	$\Delta Y/Y$ (%)
9.50	9.27	2.39	6.97	6.99	-0.34
9.67	9.52	1.47	7.33	7.48	-1.94
8.12	7.81	3.83	7.60	7.60	0.02
8.32	8.39	-0.78	7.93	7.97	-0.47
8.88	8.60	3.10	9.13	9.12	0.14
10.24	9.80	4.26	9.40	9.38	0.19
10.44	10.11	3.15	9.63	9.65	-0.14
10.88	10.58	2.78	9.90	9.91	-0.14
11.24	11.05	1.68	10.17	10.18	-0.16
11.64	11.45	1.63	10.50	10.52	-0.21
11.96	11.85	0.88	8.36	8.50	-1.69
12.24	12.26	-0.18	8.92	9.04	-1.37
13.10	12.84	1.98	10.16	10.40	-2.36
13.65	13.36	2.09	10.56	10.73	-1.58
13.95	13.79	1.16	10.88	10.98	-0.88
14.40	14.22	1.28	11.24	11.31	-0.61
14.90	14.76	0.96	11.60	11.65	-0.39
15.25	15.08	1.09	11.96	11.98	-0.21
15.65	15.52	0.80	12.24	12.41	-1.42
5.25	5.17	1.45	12.56	12.76	-1.59
5.75	5.54	3.74	12.76	13.02	-2.05
5.90	5.70	3.42	11.20	11.25	-0.41
5.98	5.78	3.26	11.80	11.88	-0.67
6.29	6.09	3.04	12.40	12.52	-0.98
6.71	6.43	4.21	12.95	12.96	-0.05
7.00	6.63	5.32	13.45	13.51	-0.42
8.06	8.05	0.15	13.95	14.06	-0.81
8.20	8.36	-1.95	14.45	14.51	-0.44
8.34	8.57	-2.75	14.80	14.74	0.40
7.07	7.27	-2.95	15.20	15.31	-0.75
7.33	7.39	-0.82	15.55	15.78	-1.46
7.70	7.69	0.11	15.85	16.13	-1.74
8.00	7.87	1.60	11.50	11.27	2.03

Tableau 2.2. (Suit)comparaison entre  $Y_{exp}$  et celui  $Y$  de l'approche empirique obtenue

$Y_{exp}$	$Y_{app}$	$\Delta Y/Y$ (%)	$Y_{exp}$	$Y_{app}$	$\Delta Y/Y$ (%)
8.90	8.67	2.59	11.90	11.71	1.64
9.53	9.43	1.11	12.30	12.15	1.23
9.93	9.81	1.20	12.75	12.60	1.20
10.07	10.14	-0.72	13.10	13.05	0.38
8.56	8.21	4.06	13.55	13.39	1.15
9.96	9.57	3.93	14.00	13.86	1.03
10.68	10.51	1.61	14.40	14.32	0.53
11.04	10.99	0.47	14.85	14.80	0.37
11.40	11.47	-0.66	15.45	15.27	1.15
11.80	11.97	-1.42	8.96	9.02	-0.62
12.28	12.38	-0.85	9.68	9.67	0.08
11.30	11.27	0.25	9.96	10.01	-0.46
13.25	13.25	0.00	10.24	10.26	-0.18
13.60	13.57	0.20	10.52	10.51	0.06
13.95	14.00	-0.39	10.72	10.77	-0.47
14.50	14.44	0.40	10.88	10.94	-0.57
14.95	14.88	0.45	6.90	7.10	-2.86
15.40	15.33	0.47	7.20	7.35	-2.08
15.80	15.66	0.86	7.50	7.54	-0.54
5.05	5.09	-0.76	7.83	7.86	-0.37
5.33	5.33	-0.11	8.20	8.19	0.14
5.63	5.54	1.59	8.33	8.32	0.15
5.80	5.74	0.99	8.63	8.59	0.55
6.00	5.95	0.79	8.90	8.79	1.28
6.09	5.94	2.39	9.07	8.92	1.61
6.23	6.09	2.30	9.40	9.40	0.03
6.43	6.28	2.30	9.70	9.74	-0.43
6.69	6.53	2.38	10.00	10.09	-0.90
8.89	8.98	-1.10	10.23	10.30	-0.66
7.07	7.02	0.66	5.97	6.23	-4.29
7.33	7.26	1.02	6.14	6.33	-3.06
7.73	7.50	3.03	6.29	6.49	-3.21

8.03	7.86	2.11	6.51	6.70	-2.81
------	------	------	------	------	-------

*Tableau (2.2). Suite et fin. Comparaison  $Y_{exp}$  avec  $Y_{app}$*

$Y_{exp}$	$Y_{app}$	$\Delta Y/Y$ (%)	$Y_{exp}$	$Y_{app}$	$\Delta Y/Y$ (%)
8.33	8.11	2.67	6.86	6.86	0.01
8.63	8.55	0.99	7.11	7.18	-0.90
9.23	9.12	1.22	7.31	7.34	-0.36
9.53	9.44	0.94	7.71	7.67	0.59

## II.4.CONCLUSION

Pour ce deuxième axe qui engendre le deuxième chapitre théorique , nous avons tenté d'analyser l'effet du paramètre rugosité aux caractéristiques de l'écoulement .

En premier temps, on a analysé l'approche semi théorique expérimentalement en but de produire une approche homologe explicite  $Y$ . Cette nouvelle fonction explicite aboutie permet d'évaluer directement cette caractéristique d'écoulement variant avec  $Cr$  et du  $Fr$  .c testé imposé au lit majeur du canal composé. Cette dernière est imposée au lit majeur du canal .

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

# **Chapitre III**

## **Analyse expérimentale**

### III.1.INTRODUCTION

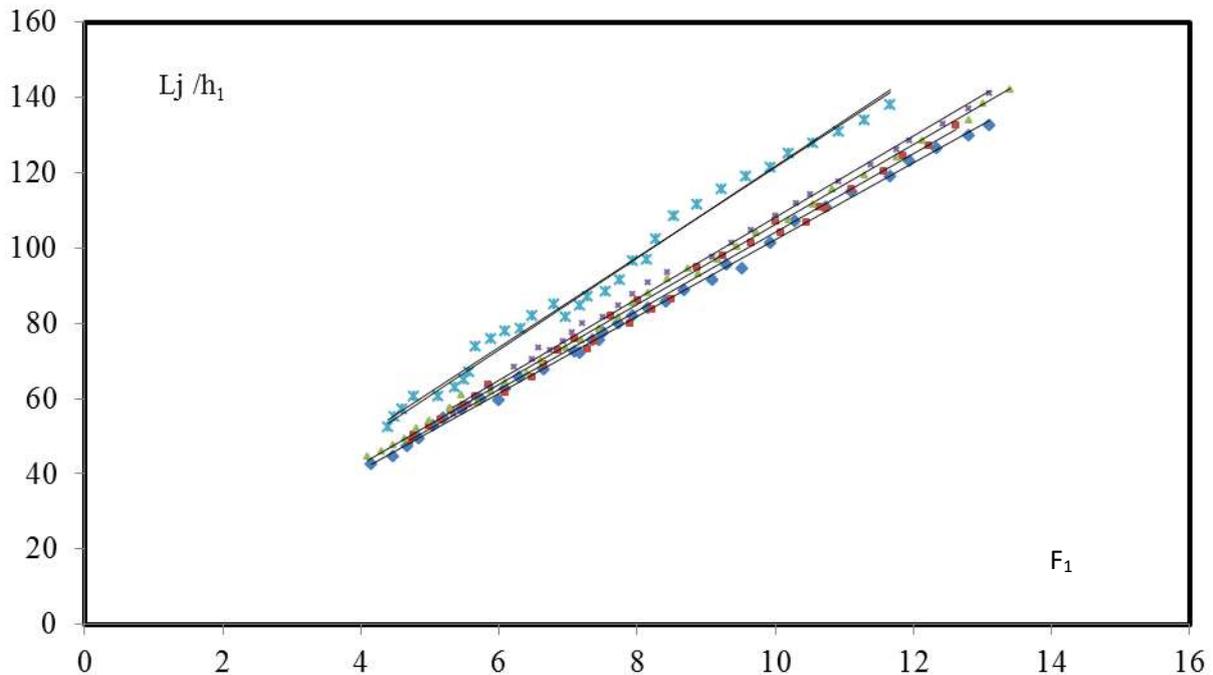
Le premier axe de la bibliographie expose que les caractéristiques de l'écoulement de passage des deux régimes torrentiel au fluvial sont : le facteur  $F_1$ , la profondeur initiale amont, la profondeur aval  $h_2$  et  $Y$  des profondeurs. ce passage bibliographique montre clairement que les travaux les plus récemment réalisés ceux de Khataoui et Achour (2012), et ceux de Benabdessalem (2017-2020) concernant les recherches des écoulements brusquement variés réalisés dans les canaux rectangulaires de section composées. Cependant les travaux en relation avec les écoulements de passage entre le régime torrentiel et fluvial qui se produisent en canaux composés rugueux sont, à notre connaissance les travaux de Kateb et all (2012) réalisés en canal triangulaire rugueux et ceux réalisés par Ghomri et all (2012) en canal en U rugueux. A cet effet que notre sujet de recherche concernant les écoulements brusquement variés de passage des deux régimes torrentiel au fluvial réalisés en canaux rectangulaires de forme composées avec lit majeur rugueux a été fortement proposé.

A travers ce deuxième axe qui engendre le troisième chapitre purement expérimental, nous allons analyser ces écoulements qui se produisent en canal rectangulaire de forme composée avec lit majeur rugueux. Ce passage empirique permet de produire des expressions fonctionnelles adimensionnelles par lesquelles on pourrait dimensionner les ouvrages hydrauliques.

## III.2. Etude de variation des caractéristiques de l'écoulement

### III.2.1. analyse du rapport $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude $Fr$ .

L'illustration. 3.1. indique clairement le rapport  $L_j/h_1$  varie avec le paramètre  $F_1$  pour ces facteurs de résistances testées:  $\varepsilon(\text{mm}) = 00,00 ; 06; 08 ; 10$  et  $12$  imposée au lit majeur.



**Figure 3.1.** illustration de  $L_j/h_1$  variant avec  $Fr$ .

$\varepsilon(\text{mm})$  (♦) 12 ; (■) 10 ; (▲) 08 ; (x) 06 et (\*) 00.

(—) Courbes de corrélation.

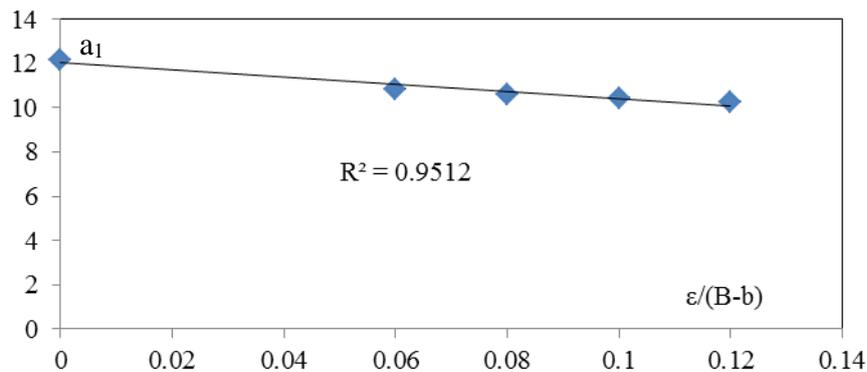
Cette figure illustre que le rapport  $L_j/h_1$  varie avec le facteur de régime  $Fr$  et ceci pour cinq paramètres de rugosité équivalente. de plus cinq allures perceptibles qui coïncide avec pour chacune une rugosité bien déterminée. l'adéquation de ces motifs d'essai produit des courbes de forme linéaires suivantes :  $L_j/h_1 = a_1(F_1)$ . on remarque aussi que l'accroissement du rapport  $L_j/h_1$  engendre l'augmentation du Froude . ainsi un facteur  $F_1$  fixé , la caractéristique  $L_j$  de l'écoulement diminue avec l'importance du facteur rugosité  $\varepsilon$ .

Les résultats déduits de cette corrélation sont récapitulés au tableau ( 1.1)

Tableau(0.1). traçage du graphique  $L_j/h_1 = f(Fr)$ 

$\varepsilon/(B-b)$	facteur $a_1$	$R^2$
0,12	10.23	0.99
0,10	10.43	0.99
0,08	10.62	0.99
0,06	10.81	0.99
0,00	12.18	0.99

La corrélation des mesures d'essai de couple de valeurs  $(\varepsilon/(B-b), a_1)$  produit une approche explicite suivante :  $a_1 = -16.33(\varepsilon/B - b) + 12.033$

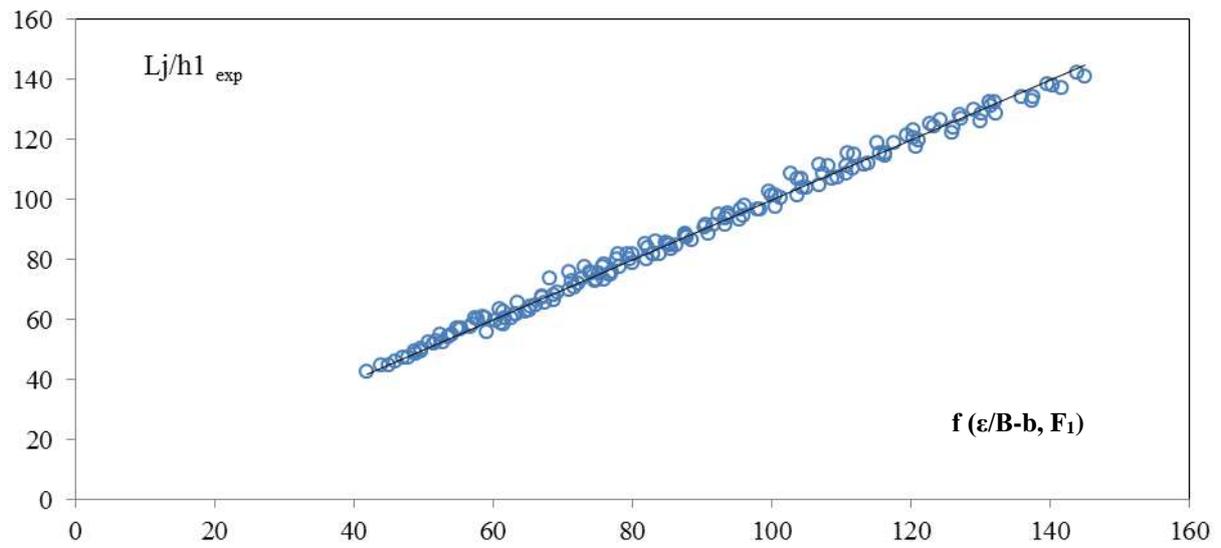
Figure 3.2. corrélation du facteur  $a_1$  avec le rapport  $(\varepsilon/B-b)$ .

La corrélation entre le paramètre  $a_1$  et le rapport  $\varepsilon/B-b$  produit une approche explicite de forme linéaire :  $a_1 = -16.33(\varepsilon/B - b) + 12.033$  et ceci avec un coefficient de détermination acceptable :  $R^2=0,9512$ . Finalement la relation générale adimensionnelle liant le paramètre  $F_1$  et le rapport  $\varepsilon/(B-b)$  se récapitule comme suit :

$$L_j/h_1 = (-16.33 (\varepsilon/B - b) + 12.033)F_1 \quad (3.1)$$

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

L'illustration de la comparaison entre l'approche globale obtenue  $L_j/h_1$  app avec  $L_j/h_{1\text{exp}}$  est justifiée par la figure (3.3). ainsi la première bissectrice valide parfaitement les mesures obtenues au laboratoire qui ont produit cette approche fonctionnelle adimensionnelle.



*Figure 3.3. comparaison entre  $Lj/h1_{exp}$  et l'approche globale  $f(\epsilon/B-b, F_1)$*

La représentation ci-dessus montre très clairement que la corrélation entre des mesures expérimentales et celles obtenues de l'approche empirique est très acceptable. Par conséquent leurs écarts relatifs ne dépassent pas en majorité 5%.

**Tableau 3.2: erreur entre  $L_j/h_1$  rel et  $L_j/h_1$  exp**

$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ expérimentale	erreur relaif(%)	$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ expérimentale	erreur relaif(%)
42.50	41.89	-1.46	73.33	74.82	1.99
44.75	44.95	0.44	75.67	77.10	1.86
47.25	47.03	-0.47	78.67	79.98	1.64
49.50	48.79	-1.46	81.67	82.90	1.48
72.50	71.47	-1.45	85.33	85.25	-0.09
75.50	75.11	-0.52	88.00	87.63	-0.42
52.57	50.77	-3.55	91.67	90.64	-1.14
54.86	52.41	-4.66	94.67	93.67	-1.06
57.14	54.92	-4.05	93.20	95.39	2.30
60.00	57.88	-3.65	96.80	98.36	1.58
59.67	60.40	1.21	100.40	101.35	0.94
62.67	61.41	-2.04	104.00	104.38	0.36
65.67	63.46	-3.48	108.40	107.43	-0.90
77.67	75.65	-2.66	107.50	109.35	1.70
80.00	77.85	-2.76	111.50	113.24	1.53
82.00	80.06	-2.42	115.50	116.18	0.58
84.00	82.30	-2.07	119.50	121.14	1.35
67.60	67.10	-0.75	124.00	126.16	1.71
72.00	72.19	0.26	128.50	130.23	1.33
75.60	74.13	-1.98	134.00	137.46	2.51
85.60	84.78	-0.97	138.50	139.54	0.75
88.80	87.51	-1.47	142.00	143.75	1.22
91.60	91.67	0.07	55.75	59.05	5.59
94.40	95.89	1.55	58.50	61.47	4.84
95.50	93.77	-1.85	60.50	62.70	3.50
101.50	99.99	-1.51	63.00	65.16	3.32
107.00	103.60	-3.28	73.50	72.76	-1.02
111.00	108.18	-2.61	68.29	68.75	0.67
115.00	111.89	-2.78	70.57	71.66	1.52
119.00	117.53	-1.25	72.86	74.61	2.35
123.00	120.38	-2.17	75.14	76.60	1.90

Tableau 3.2(suit): erreur entre  $L_j/h_1$  rel et  $L_j/h_1$  exp

$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ expérimentale	erreur relaif(%)	$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ expérimentale	erreur relaif(%)
126.50	124.23	-1.83	77.71	78.10	0.50
130.00	129.09	-0.71	80.00	79.62	-0.48
132.50	132.03	-0.36	81.67	83.01	1.62
48.50	48.91	0.85	84.67	85.42	0.88
50.25	49.64	-1.23	87.67	87.85	0.21
52.75	51.83	-1.77	90.67	90.30	-0.41
54.50	53.69	-1.51	93.67	93.40	-0.29
56.75	55.19	-2.84	97.60	100.58	2.97
58.25	57.08	-2.05	101.20	103.66	2.37
60.50	58.99	-2.56	104.80	106.77	1.85
63.50	60.92	-4.23	108.40	110.70	2.08
61.71	63.33	2.55	112.00	113.88	1.65
65.71	67.42	2.54	114.40	116.28	1.62
73.14	75.87	3.59	117.50	120.73	2.68
75.14	76.82	2.19	122.00	125.85	3.06
80.00	82.08	2.54	126.00	130.00	3.08
83.67	85.54	2.19	128.50	132.09	2.72
86.33	88.46	2.41	133.00	137.37	3.18
69.20	69.27	0.10	137.00	141.64	3.28
72.80	71.23	-2.21	141.00	144.87	2.67
76.00	73.87	-2.89	96.50	95.64	-0.90
82.00	79.24	-3.49	102.50	99.65	-2.86
86.00	83.35	-3.18	108.50	102.69	-5.65
98.00	96.08	-1.99	111.50	106.80	-4.40
101.20	100.46	-0.73	115.50	110.96	-4.09
104.00	104.90	0.86	119.00	115.17	-3.32
106.80	108.66	1.71	121.50	119.44	-1.72
110.40	111.69	1.15	125.00	122.67	-1.90
95.00	92.31	-2.92	128.00	127.03	-0.77
107.00	104.16	-2.73	131.00	131.43	0.33
111.00	110.74	-0.24	134.00	135.89	1.39
115.50	115.52	0.01	138.00	140.39	1.70
120.50	120.36	-0.11	81.60	83.93	2.78
124.50	123.30	-0.97	84.80	86.23	1.66
127.00	127.26	0.20	87.20	87.78	0.66
132.50	131.26	-0.95	88.40	90.89	2.74

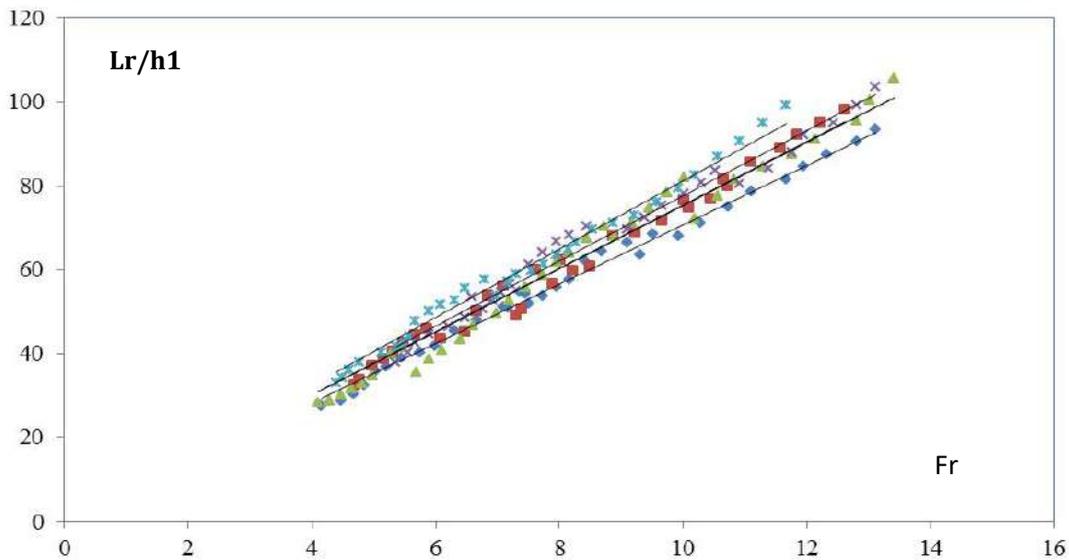
Tableau 3.2(suit): erreur entre  $L_j/h_1$  rel et  $L_j/h_1$  exp

$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ expérimentale	erreur relaif(%)	$L_j/h_1$ relation	$L_j/h_1$ expérimentale	erreur relaif(%)
44.75	43.89	-1.96	91.60	93.25	1.77
46.00	46.04	0.09	96.80	98.04	1.26
47.50	47.86	0.76	60.57	61.62	1.71
49.50	49.71	0.42	62.86	64.60	2.70
52.00	51.57	-0.83	64.86	66.10	1.88
54.25	53.46	-1.47	67.14	67.11	-0.05
57.43	56.70	-1.29	78.57	75.89	-3.53
60.86	58.48	-4.07	82.00	78.01	-5.11
59.00	61.11	3.45	85.14	81.76	-4.13
62.00	63.24	1.96	52.25	52.87	1.18
64.33	65.40	1.62	55.00	54.10	-1.66
66.67	68.67	2.92	57.25	55.34	-3.44
70.00	70.89	1.25	60.50	57.43	-5.34

### III.2.2.analyse de la caractéristique relative $L_r/h_1$ avec le facteur $F_1$ .

La figure (3.4) indique clairement la corrélation entre  $L_r/h_1$  et  $F_1$  pour diverses rugosités absolues:  $\varepsilon = 00,00 ; 06 ; 08 ; 10$  et  $12$  exposée au lit majeur

Cette figure expose l'évolution du rapport de  $L_r/h_1$  avec la paramètre du régime  $Fr$  et ceci pour cinq facteur de rugosité absolue.de plus cinq nuages sont perceptibles qui correspond pour chacun une rugosité fixée. bl'adéquation des ces mesures produit des courbes de type linéaires suivantes : $L_r/h_1 = a_2(F_1)$ .on constate aussi que l'accroissement du rapport  $L_r/h_1$ provoque l'augmentation du Froude .Par conséquent pour un paramètre de régime d'écoulement  $F_1$  , la caractéristique  $L_r$  d'écoulement s'abaisse avec l'importance du facteur rugosité  $\varepsilon$ .



**Figure 3.4.** Illustration de  $L_r/h_1$  variant avec  $Fr$ .

$\varepsilon(mm)$  (♦) 12 ; (■) 10 ; (▲) 08 ; (x) 06 et (\*) 00.

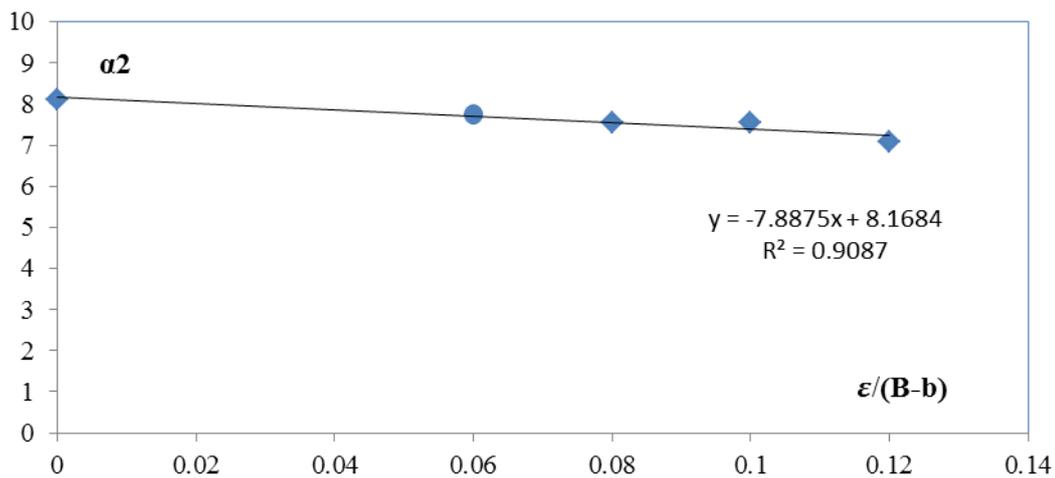
(—) Courbes de corrélation.

Les résultats déduits de cette corrélation sont récapitulés au tableau (3.3)

**Tableau (0.3). le tracé du graphique  $L_r/h_1 = f(F_r)$**

$\varepsilon/(B-b)$	$a_2$	$R^2$
<b>0,12</b>	7.07	0.99
<b>0,10</b>	7.53	0.98
<b>0,08</b>	7.53	0.98
<b>0,06</b>	7.75	0.99
<b>00,00</b>	8.12	0.99

La corrélation des mesures d'essai de couple de valeurs ( $\varepsilon/(B-b)$ ,  $a_2$ ) donne une approche explicite:  $a_2 = - 7.8875 (\varepsilon/(B-b)) + 8.1684$



**Figure 3.5.** corrélation du facteur  $a_2$  avec le rapport  $(\varepsilon/B-b)$ .

La corrélation entre le paramètre  $a_2$  et le rapport  $\varepsilon/(B-b)$  donne une approche explicite de forme linéaire :  $a_2 = - 7,8875 (\varepsilon/(B-b)) + 8,1684$  (3.2)

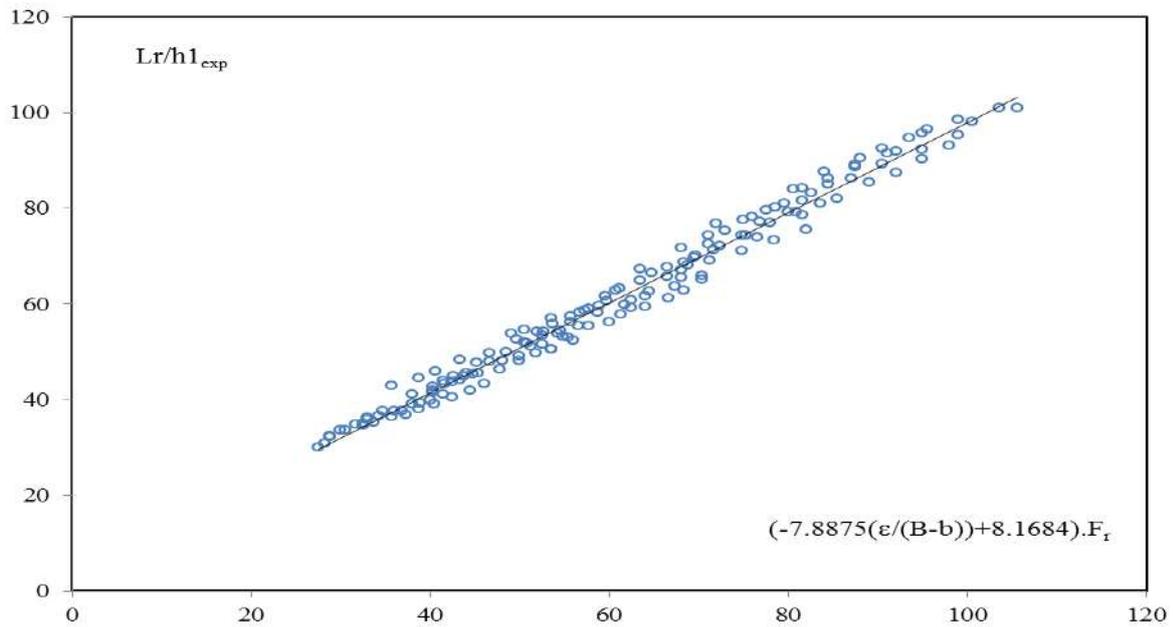
et ceci avec un coefficient de déterminant satisfaisant :  $R^2=0,9087$ . Finalement la relation générale adimensionnelle liant le facteur  $F_1$  et le rapport  $\varepsilon/(B-b)$  se récapitule comme suit :

$$L_r/h_1 = (- 7,8875 (\varepsilon/(B - b)) + 8,1684)F_1 \quad (3.3)$$

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

L'illustration de la comparaison entre l'approche globale obtenue  $L_r/h_1$  app avec  $L_j/h_{1exp}$  est validée par la figure (3.6). Par conséquent la première bissectrice justifie exactement

les mesures obtenues au laboratoire qui ont résulté cette approche fonctionnelle adimensionnelle à caractère générale.



**Figure 3.6.** comparaison entre  $(Lr / h1)$  expérimentale et l'approche empirique  $f(\epsilon/B-b, F1)$

La représentation (3.6) indique très nettement que la corrélation entre des mesures expérimentales et celles acquises de l'approche empirique est très valable. Par conséquent leurs écarts relatifs ne dépassent pas dans la plupart les 5%.

*Tableau 3.4: erreur entre  $Lr/h1$  rel et  $Lr/h1$  exp*

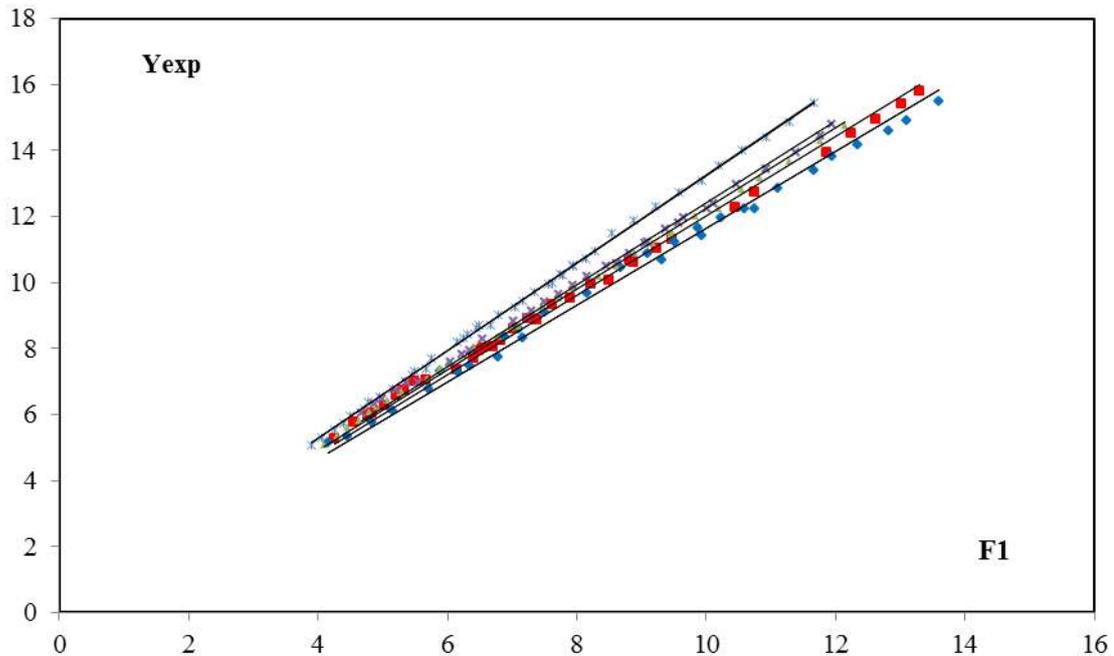
$Lr/h1_{relation}$	$Lr/h1_{expérimentale}$	Erreur relatif(%)	$Lr/h1_{relation}$	$Lr/h1_{expérimentale}$	Erreur relatif(%)
51.25	51.23606	0.027198	68	67.02881	1.428222
54.25	53.84836	0.740354	71.2	69.11251	2.931861
35.7143	36.39705	-1.9117	74.8	71.21738	4.789605
36.8571	37.57744	-1.95441	78.4	73.34318	6.450025
38.8571	39.3714	-1.32357	82	75.48973	7.939358
40.2857	41.4993	-3.01249	72	76.84176	-6.72467
41.6667	43.30086	-3.92197	77.5	79.56971	-2.6706
43.3333	44.02859	-1.60452	81.5	81.6364	-0.16736
45.3333	45.49614	-0.3592	84.5	85.11988	-0.73359
52	54.23903	-4.30584	87.5	88.65155	-1.31606
53.6667	55.81112	-3.99581	91	91.51114	-0.5617
55.6667	57.39811	-3.11031	95.5	96.58768	-1.13893
57.6667	58.99986	-2.31183	100.5	98.05481	2.43302
48	48.10263	-0.21381	105.5	101.0111	4.254864
50.8	51.75505	-1.88002	38	41.11146	-8.18805
54.8	53.14752	3.015479	40.25	42.79699	-6.32793
62.4	60.77867	2.598278	42.5	43.64819	-2.70162
64.4	62.73918	2.578906	44.75	45.36725	-1.37933
66.4	65.71858	1.026238	53.5	50.65532	5.317165
68.4	68.7437	-0.50248	46.5714	47.86114	-2.76938
63.5	67.22546	-5.86687	48.5714	49.88804	-2.71072
68	71.68504	-5.41918	50.5714	51.94276	-2.71173
71	74.27591	-4.61396	52.5714	53.32786	-1.43891
75	77.55733	-3.40977	54.5714	54.37462	0.360585
78.5	80.21629	-2.18636	56.5714	55.42815	2.020897
81.5	84.26035	-3.38693	61.3333	57.79331	5.771726
84.5	86.3071	-2.13858	64	59.46841	7.080603
87.5	89.06146	-1.78452	66.6667	61.1594	8.260951
90.5	92.54471	-2.25935	68.3333	62.86611	8.00077
93.5	94.65595	-1.23631	70.3333	65.0214	7.552462
32.5	34.70861	-6.79572	69.6	70.02511	-0.61078
33.75	35.2228	-4.36386	72.4	72.16864	0.319558
37.25	36.78043	1.260587	75.2	74.33361	1.152114
38.75	38.09551	1.689013	78	77.06965	1.192758
40.5	39.1586	3.312098	80.8	79.28209	1.8786
42.5	40.50111	4.703273	83.6	80.95507	3.163795
44.5	41.85862	5.935689	80.5	84.05227	-4.41276
46	43.23097	6.019641	84	87.61856	-4.3078

Tableau 3.4: erreur entre  $Lr/h1$  rel et  $Lr/h1$  exp

$Lr/h1_{relation}$	$Lr/h1_{expérimentale}$	Erreur relatif(%)	$Lr/h1_{relation}$	$Lr/h1_{expérimentale}$	Erreur relatif(%)
59.6667	60.70013	-1.73201	63.5	64.92069	-2.2373
60.6667	62.7717	-3.46978	66.5	67.64441	-1.72092
50	49.15335	1.693308	69.5	69.71156	-0.3044
53.6	50.54224	5.704769	71	72.49982	-2.11242
56	52.41406	6.403461	73	75.32429	-3.18396
60	56.22509	6.291511	76	78.18452	-2.87437
62.4	59.14131	5.222252	79.5	81.08006	-1.9875
68.8	68.17933	0.902137	82.5	83.27464	-0.93895
71.6	71.28594	0.438626	87	86.23096	0.883951
74.8	74.43836	0.483476	90.5	89.22147	1.412742
76.8	77.09989	-0.39048	95	92.24577	2.899193
80	79.25143	0.935707	99	95.30348	3.733854
68	65.49915	3.677718	53.6	56.97709	-6.30054
76.5	73.9098	3.385877	57.2	58.53805	-2.33925
81.5	78.57696	3.586556	58.8	59.58648	-1.33755
85.5	81.96848	4.130431	59.6	61.70185	-3.5266
89	85.40744	4.03658	61.2	63.30445	-3.43864
92	87.49332	4.898563	64.8	66.55045	-2.70131
95	90.30046	4.946882	40.2857	41.83301	-3.84083
98	93.137	4.962247	41.4286	43.85154	-5.84848
28.25	30.84157	-9.17371	42.5714	44.87264	-5.4056
40	39.83994	0.400145	44	45.55771	-3.54025
41.4286	41.0914	0.813925	52.5714	51.51847	2.002866
46.6667	49.81236	-6.74069	55.4286	52.95614	4.460624
49.6667	52.57567	-5.85699	57.7143	55.50359	3.830437
52.6667	54.17689	-2.86745	33	35.89194	-8.76346
55.6667	56.20081	-0.95947	34.25	36.7277	-7.23415
58.6667	58.24932	0.711449	36	37.56984	-4.36067
61.6667	59.90563	2.855781	38	38.98748	-2.59863
64	61.57736	3.785376	47.75	46.33254	2.9685
67.3333	63.68847	5.413116	50	48.15733	3.685346
43.7143	44.93707	-2.79718	88	90.50694	-2.84879
45.1429	47.84263	-5.98042	92	91.96279	0.04044
49.1429	53.83274	-9.54327	95	95.63614	-0.66962
50.5714	54.51273	-7.79359	99	98.60916	0.394792
56.6667	58.24504	-2.7853	103.5	100.8587	2.551941

**III.2.3.étude du rapport Yen fonction du  $F_1$**

Cette illustration 3.7 affiche la corrélation entre  $Y$  avec le facteur du régime  $F_1$ , et ceci pour différents facteurs de rugosité examinée. L'écoulement se produit au lit majeur rugueux avec les profondeurs dépassant 20 cm jusqu'au 50cm.



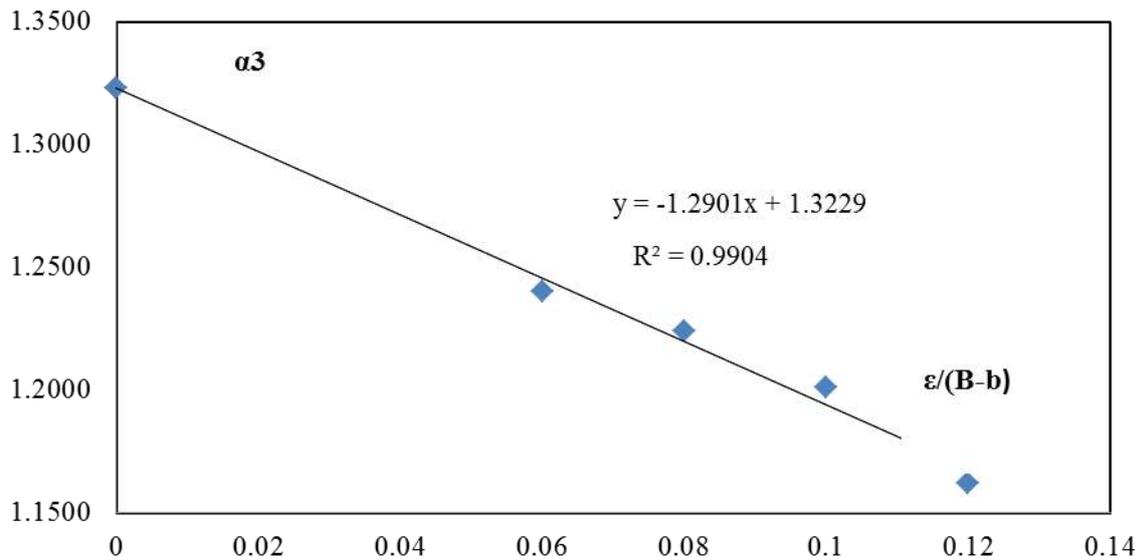
**Figure 3.7.** illustration des mesures expérimentales entre  $Y$  et  $F_1$ , pour cinq rugosités examinées :  $\epsilon(mm)$ ( $\blacklozenge$ ) 12 ;( $\blacksquare$ ) 10 ; ( $\blacktriangle$ ) 08 ; ( $\times$ ) 06 et ( $*$ ) 00.

On note par cette illustration, quatre allures distincts qui coïncide pour chacun une rugosité bien déterminée .La corrélation des ces mesures obtenues au laboratoire donne des approches de forme  $Y = b_1 (F_1)$

Les résultats déduits de la cette corrélation sont résumés au tableau (3.5)

**Tableau 3.5.**facteur  $a_3$  de corrélations

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



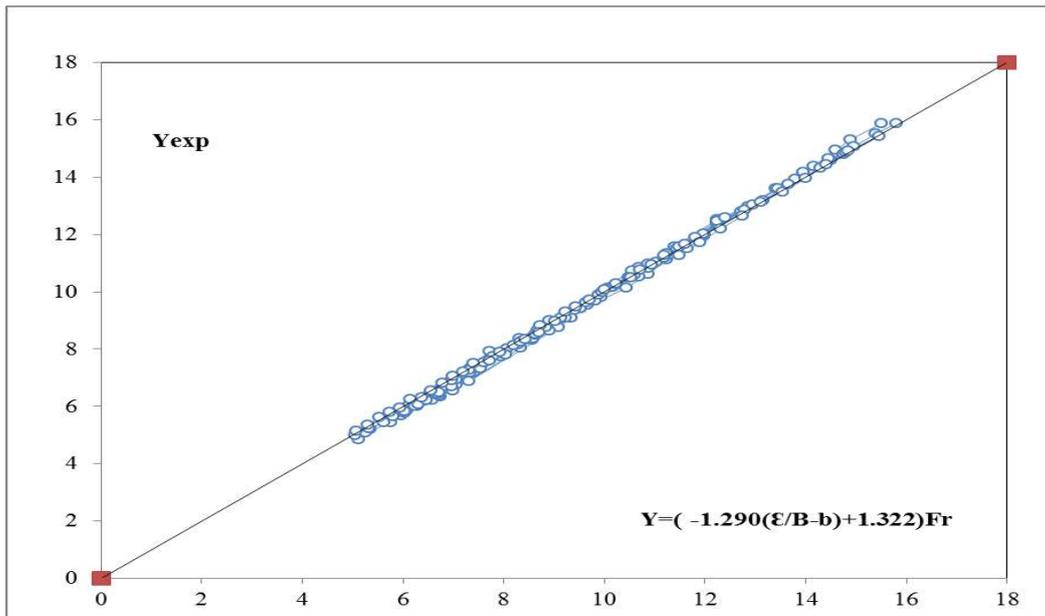
*Figure 3.8: corrélation du paramètre  $a_3$  avec ( $a_3$ ,  $\epsilon/B-b$ )*

La corrélation des mesures d'essai obtenus a donné une approche adimensionnelle de type linéaire entre le paramètre  $a_3$  et le rapport relatif  $\epsilon/(B-b)$ :  $a_3 = -1,290 (\epsilon/(B-b)) + 1,322$ , avec le coefficient de détermination :  $R^2 = 0,990$ .

Par conséquent, l'approche globale fonctionnelle qui lie  $Y$ , le paramètre  $F_1$  et le rapport de rugosité ( $\epsilon/(B-b)$ ) a pour expression suivante :  $Y = (-1,290(\epsilon/B-b) + 1,322) F_1$  **(3.4)**

Avec  $0,00 \leq \epsilon/B-b \leq 0,12$

La comparaison entre l'approche globale  $Y$  et celle expérimentale  $Y_{exp}$  est illustré à la figure La figure (3.9). on note que cette illustration justifie parfaitement la fiabilité des mesures expérimentales acquise au laboratoire. Et que la plus part des ces mesures suivent la première bissectrice.



**Figure 3.9:** rapport  $Y$  en fonction  $f(\epsilon/B-b, F_1)$ .

(→) Première bissectrice

A partir des résultats obtenus on déduit les erreurs relatives entre  $Y_{exp}$  et  $Y_{approche}$ .

Ces erreurs calculées en majorités ne dépassent pas le pourcentage de 5% et sont montrées au tableau (3.6).

**Tableau (3.6) erreur entre  $h2/h1_{exp}$  et  $h2/h1_{d'ajustement}$ .**

Yexp.	Y appr.	Erreurs relatives(%)	Yexp.	Y appr	Erreurs relatives(%)
8.571	8.301	-3.262	5.75	5.446	-5.582
7.3	6.881	-6.085	5.975	5.694	-4.932
9.1	8.766	-3.809	6.025	5.778	-4.281
9.667	9.536	-1.375	6.75	6.33	-6.628
8.32	8.365	0.534	7.05	6.767	-4.184
10.44	10.14	-2.96	6.286	6.013	-4.544
10.88	10.621	-2.435	6.571	6.207	-5.863
11.24	11.11	-1.167	6.714	6.355	-5.652
11.64	11.523	-1.013	7	6.554	-6.81
11.96	11.941	-0.157	7.943	7.734	-2.697
12.24	12.364	1.005	8.057	7.999	-0.721
10.7	10.865	1.518	8.857	8.813	-0.506
11.4	11.586	1.603	7.333	7.334	0.003
7.7	7.638	-0.814	5.625	5.438	-3.43
8	7.822	-2.271	5.8	5.648	-2.694
8.233	8.133	-1.232	6.65	6.423	-3.53
8.6	8.385	-2.568	7.4	7.186	-2.985
8.9	8.639	-3.024	7.55	7.323	-3.1
9.333	9.089	-2.684	6.086	5.848	-4.07
9.533	9.416	-1.247	6.229	5.995	-3.904
9.933	9.813	-1.228	6.429	6.192	-3.818
10.067	10.148	0.799	6.686	6.442	-3.781
10.68	10.527	-1.451	8.686	8.668	-0.208
11.04	11.022	-0.164	7.067	6.943	-1.777
12.28	12.464	1.476	7.333	7.186	-2.057
12.72	12.812	0.717	8.033	7.803	-2.952
10.6	10.589	-0.107	8.633	8.502	-1.551
11.3	11.314	0.124	9.233	9.088	-1.603

Tableau (3.6) erreur entre  $h_2/h_{1exp}$  et  $h_2/h_{1d'ajustement}$ .

Yexp.	Y appr.	Erreurs relatives(%)	Yexp.	Y appr	Erreurs relatives(%)
13.95	14.144	1.373	9.533	9.419	-1.215
14.5	14.598	0.672	9.833	9.687	-1.513
14.95	15.057	0.708	8.36	8.271	-1.08
15.4	15.52	0.772	10.16	10.175	0.149
15.8	15.87	0.443	10.48	10.505	0.239
5.05	4.987	-1.261	10.88	10.839	-0.382
5.325	5.232	-1.784	11.2	11.176	-0.219
11.44	11.516	0.659	9.633	9.618	-0.156
11.5	11.559	0.507	9.9	9.892	-0.083
12	11.989	-0.089	10.167	10.168	0.012
12.25	12.425	1.411	10.5	10.516	0.156
12.8	12.866	0.516	8.92	8.999	0.879
13.15	13.201	0.384	10.56	10.727	1.561
13.65	13.764	0.828	10.88	10.983	0.934
14.3	14.335	0.244	11.24	11.326	0.757
14.75	14.797	0.32	11.6	11.672	0.621
6.029	5.823	-3.533	11.96	12.023	0.521
6.314	6.071	-4.002	12.24	12.465	1.806
6.457	6.222	-3.779	11.2	11.261	0.543
6.714	6.476	-3.68	11.8	11.913	0.947
6.971	6.682	-4.338	12.4	12.577	1.404
7.8	7.741	-0.762	12.95	13.026	0.581
6.967	6.907	-0.869	13.45	13.594	1.063
7.6	7.525	-0.997	13.95	14.171	1.561
7.933	7.904	-0.367	14.45	14.638	1.287
8.3	8.161	-1.707	14.8	14.874	0.497
8.833	8.747	-0.983	10.5	10.507	0.066
9.133	9.079	-0.598	10.95	10.948	-0.02
9.4	9.347	-0.563	11.5	11.282	-1.929
11.9	11.734	-1.418	10	10.072	0.717
12.3	12.191	-0.896	10.233	10.289	0.539
12.75	12.654	-0.762	6.143	6.237	1.516
13.1	13.122	0.17	7.314	7.262	-0.715
13.55	13.477	-0.538	7.714	7.597	-1.549
14	13.956	-0.316	8.429	8.338	-1.087
14.4	14.44	0.276	8.714	8.571	-1.677

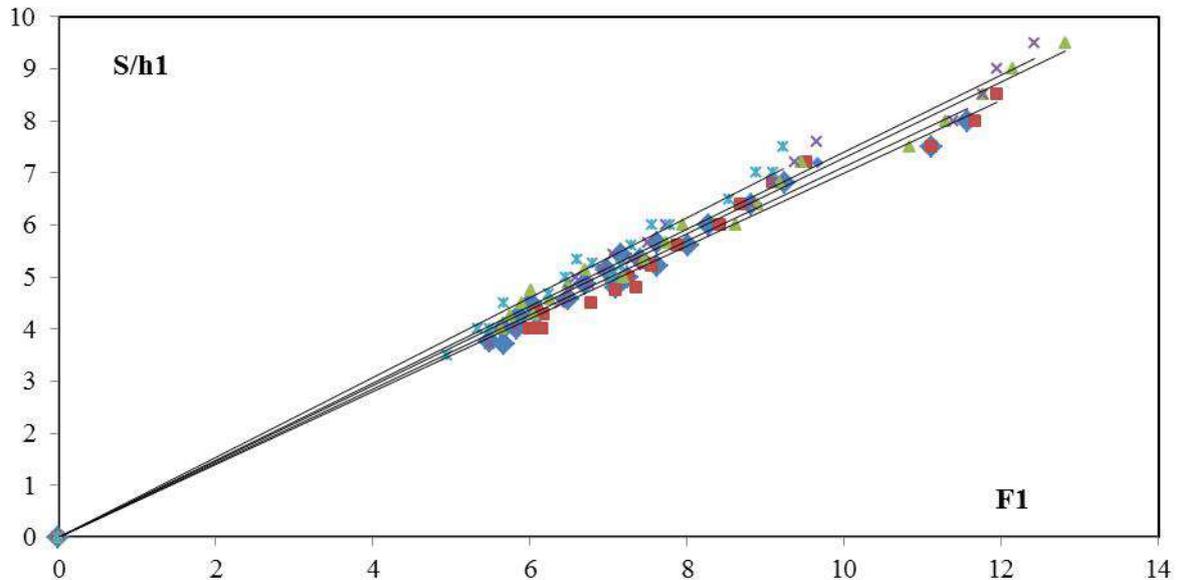
*Tableau (3.6) erreur entre  $h_2/h_{1exp}$  et  $h_2/h_{1d'ajustement}$ .*

Yexp.	Y appr.	Erreurs relatives(%)	Yexp.	Y appr	Erreurs relatives(%)
14.85	14.929	0.532	9.029	8.983	-0.509
15.45	15.424	-0.167	5.075	5.148	1.425
8.72	8.805	0.97	5.3	5.366	1.222
9.24	9.305	0.702	5.525	5.63	1.867
9.44	9.474	0.359	5.725	5.809	1.444
9.96	9.986	0.261	5.95	5.944	-0.099
10.24	10.245	0.053	6.375	6.31	-1.032
10.52	10.507	-0.124	6.55	6.542	-0.121
10.72	10.771	0.471	6.775	6.824	0.725
8.2	8.127	-0.904	7	7.063	0.889
8.333	8.261	-0.878	7.2	7.207	0.099
8.633	8.532	-1.192	7.4	7.499	1.315

### III.2.4.étude du rapport $S/h_1$ variant avec le paramètre $F_1$

Toutes les mesures expérimentales obtenues ont permis de produire des rapports adimensionnels du seuil relatif  $s/h_1$  et le paramètre  $F_1$  sont injectés dans la figure (3.10).

On note principalement des différents nuages de points leurs correspondent des différentes rugosités testées. Aussi on constate que l'augmentation  $s/h_1$  provoque promotionnellement l'augmentation du paramètre de régime  $F_1$ .



**Figure 3.10.**présentation des rapport  $s/h_1$  avec le paramètre  $F_1$  pour diverses rugosités absolues  $\varepsilon$ (mm) : (◆) 12 ; (■) 10 ; (▲) 08 ; (x) 06 et (\*)00,00 mm.

La corrélation de ces rapports de mesures entre le rapport du seuil relatif  $s/h_1$  et le paramètre du Froude  $F_1$  donne des courbes linéaires de forme  $s/h_1 = a_4 F_1$  et ceci pour chacune de rugosité examinée.

Les résultats obtenus des coefficients  $a_4$  leurs correspondent la rugosité relatives sont affichés au tableau (3.7)

**Tableau (3.7).** paramètre  $a_4$

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

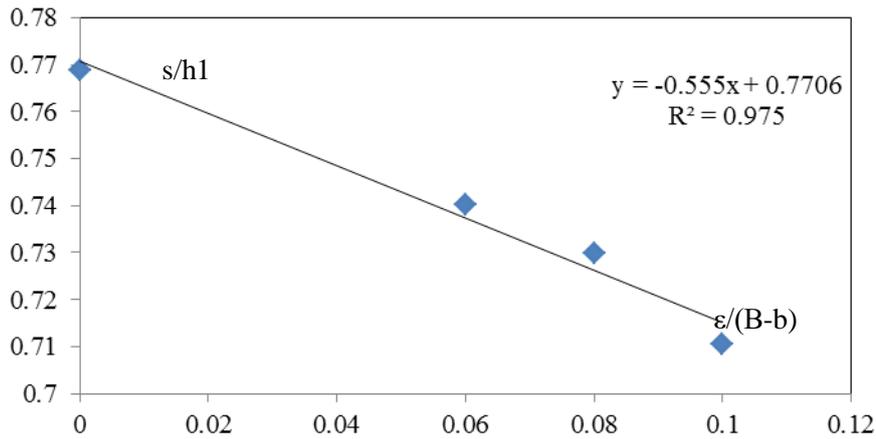


Figure 3.11: Représentation du "  $\alpha_4$ " avec  $\varepsilon/B-b$

la corrélation entre les coefficients  $a_4$  et les rapports  $\varepsilon/(B-b)$  produit une relation fonctionnelle adimensionnelle avec un coefficient de déterminant très acceptable. Cette relation s'écrit comme suit :  $a_4 = -0,555(\varepsilon / (B-b)) + 0,7706$  avec  $R^2 = 0,975$ . Ainsi l'approche globale du seuil relatif variant en fonction du paramètre  $F_1$  et le rapport relatif rugosité obtenue est la suivante :  $S/h_1 = (-0,555 \varepsilon / (B-b) + 0,7706) F_1(3.5)$ .

avec l'intervalle de tolérance :  $00,00 \leq \varepsilon / (B-b) \leq 0,12$

d'après les mesures d'expérimentation acquises et qui sont exploitées dans la figure ci-dessous, on note fondamentalement que la validation de l'approche adimensionnelle obtenue est argumentée car la majorité de ces mesures obtenues au laboratoire s'ajustent exactement autour de la première bissectrice.

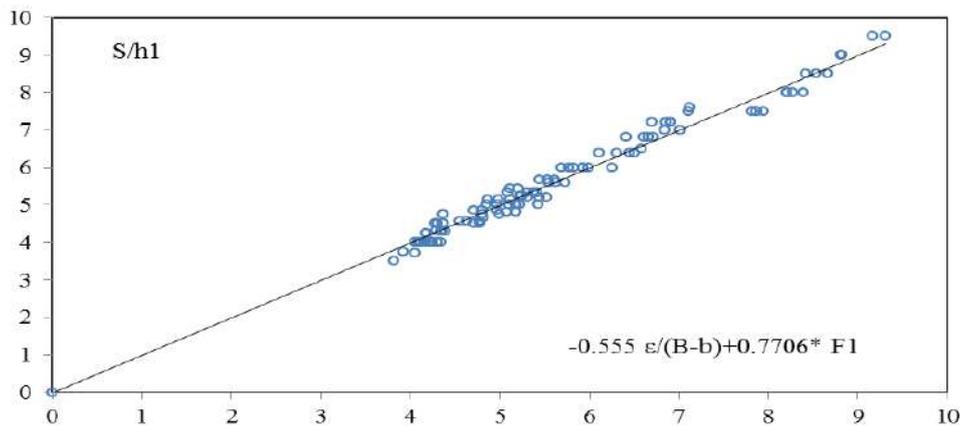


Figure 3.12: Présentation  $S/h_1$  avec  $f(\varepsilon/B-b, F_1)$

Selon les valeurs acquies de cette approche adimensionnelle, on note que l'erreur relative entre les mesures issues de l'approche globale et celles obtenues des essais est moindre de 5%.

Ces valeurs d'erreurs relatives sont affichées au tableau (3.8)

Tableau 3.8: erreur  $S/h_{1\text{exp}}/S/h_{1\text{rel}}$ 

$S/h_{1\text{exp}}/$	$S/h_{1\text{theor}}/$	$\Delta S/h_1$ (%)	$S/h_{1\text{exp}}/$	$S/h_{1\text{theor}}/$	$\Delta S/h_1$ (%)
4.000	4.221	-5.526	6.000	5.772	3.805
4.000	4.256	-6.411	6.000	6.259	-4.321
4.333	4.292	0.955	6.400	6.458	-0.906
4.000	4.337	-8.413	6.800	6.659	2.078
4.286	4.348	-1.453	7.200	6.862	4.701
4.500	4.772	-6.039	7.500	7.865	-4.871
4.750	4.995	-5.149	8.000	8.201	-2.512
5.000	5.107	-2.144	8.500	8.541	-0.485
4.800	5.181	-7.935	9.000	8.817	2.036
5.250	5.249	0.015	9.500	9.306	2.044
5.200	5.318	-2.266	3.714	4.050	-9.047
5.600	5.549	0.916	4.000	4.300	-7.488
6.000	5.925	1.254	4.500	4.711	-4.686
6.400	6.116	4.439	4.571	4.780	-4.561
6.800	6.406	5.789	4.750	4.796	-0.974
7.200	6.701	6.927	5.000	4.853	2.931
7.500	7.820	-4.261	4.857	4.977	-2.464
8.000	8.214	-2.673	5.143	5.110	0.648
8.500	8.413	1.020	5.000	5.182	-3.638
3.750	3.925	-4.657	5.429	5.210	4.029
4.000	4.056	-1.404	5.333	5.378	-0.845
4.000	4.170	-4.252	5.667	5.537	2.281
4.250	4.189	1.432	6.000	5.698	5.035
4.500	4.297	4.521	6.400	6.506	-1.657
4.286	4.354	-1.604	6.800	6.709	1.333
4.571	4.636	-1.413	7.200	6.915	3.962
4.857	4.795	1.280	7.600	7.122	6.287
5.143	4.988	3.010	8.000	8.395	-4.938
4.800	5.079	-5.813	8.500	8.672	-2.021
5.429	5.118	5.718	9.000	8.811	2.097
5.000	5.178	-3.563	9.500	9.163	3.545
5.333	5.293	0.749	3.500	3.813	-8.955
5.200	5.448	-4.775	4.000	4.233	-5.831
5.667	5.448	3.853	4.000	4.117	-2.924
5.600	5.731	-2.337	4.500	4.371	2.867
6.000	5.922	1.302	4.667	4.815	-3.184
6.400	6.310	1.404	5.000	5.424	-8.482
6.800	6.607	2.843	5.000	4.973	0.537
7.200	6.908	4.059	5.200	5.522	-6.201
7.500	7.943	-5.905	5.250	5.236	0.264

Tableau 3.8: erreur  $S/h_{1\text{exp}}/S/h_1$  rel

$S/h_{1\text{expérimentale}}$	$S/h_{1\text{théorique}}$	$\Delta S/h_1$ (%)	$S/h_{1\text{expérimentale}}$	$S/h_{1\text{théorique}}$	$\Delta S/h_1$ (%)
8.000	8.276	-3.451	5.333	5.093	4.513
4.000	4.092	-2.307	5.600	5.621	-0.381
4.250	4.173	1.812	6.000	5.821	2.985
4.500	4.281	4.859	6.000	5.997	0.043
4.750	4.363	8.142	6.500	6.577	-1.177
4.286	4.391	-2.449	7.000	6.840	2.292
4.571	4.548	0.504	7.000	7.012	-0.177
4.857	4.708	3.071	7.500	7.106	5.253
5.143	4.869	5.317	5.333	5.415	-1.526
5.000	5.220	-4.395	5.667	5.612	0.963

### III.2.5. développement de l'expression de la rentabilité

Les écoulements brusquement varié contrôlé, servent de passage du régime torrentiel au régime fluvial sont caractérisés essentiellement par le facteur **rendement**  $\eta$ . ce passage d'écoulement permettra de diminuer fortement l'énergie provoquées par les forces érosives à l'aval des ouvrages hydrauliques et de rendre ainsi l'écoulement fluvial.

A cet effet la théorie principale connue s'écrit :

$$H_1 = h_1 + Q^2 / (2.g.A_1^2) = h_2 + Q^2 / (2.g.A_2^2) + \Delta H \quad (3.6)$$

L'expression de facteur  $\eta$  entre deux sections de l'écoulement formé de passage(ressaut) se formule de la manière suivante :

$$\eta = (H_1 - H_2) / H_1 \quad (3.7)$$

Sachant que  $H_1$  : représente l'énergie totale au début du ressaut ;

$H_2$  : représente également la charge totale à la fin de cet écoulement développé .

La relation de la rentabilité entre le début et la fin du ressaut développé s'écrit comme suit :

$H_1 = \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_1$ ,  $H_2 = \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_2$  avec l'intervalle connue du rendement qui ne dépasse pas l'unité :  $\eta < 1$ .

En injectant  $H_1$  et  $H_2$  dans l'expression (3.7) :

$$\eta = 1 - \left[ \left( \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \right) / \left( \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \right) \right] \quad (3.8)$$

On remplace  $V_1 = Q/A_1$  et  $V_2 = Q/A_2$  l'équation (3.8) devient :

$$\eta = 1 - \left[ \left( \alpha_2 \frac{Q^2}{2gA_2^2} + h_2 \right) / \left( \alpha_1 \frac{Q^2}{2gA_1^2} + h_1 \right) \right] \quad (3.9)$$

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

Le facteur  $F_1 = Q/\sqrt{b^2h_1^3g}$ .le rendement devient ainsi :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (3.10)$$

Les résultats obtenus tolèrent à tracer les courbes de la rentabilité de l'approche globale théorique adimensionnelle  $\eta$  variant en fonction du facteur Froude  $F_1$ , pour la section composée avec différentes rugosités imposées au lit majeur.

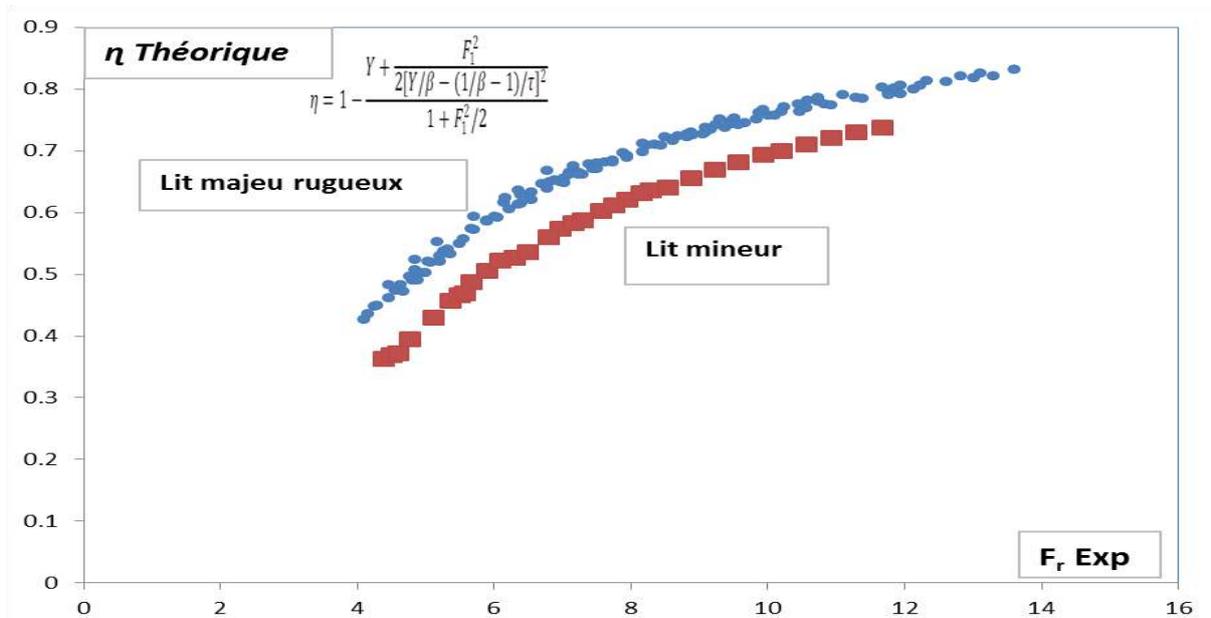


Figure 3.13. Présentation  $\eta$  avec  $F_r$

On note d'après la figure 3.13 que le rendement réalisé au lit majeur dépasse son homologue crée au lit mineur. Aussi on constate clairement que pour un facteur  $F_1$  fixé , la dissipation de l'énergie cinétique est importante au lit majeur que celle au lit mineur.

Aussi une approche théorique permet l'évaluation du facteur rentabilité  $\eta^*$  .

Cette approche est celle de Sinniger et Hager (1986) .elle est formulée ci-dessous , qui s'applique pour  $F_r > 2$  :  $\eta^* = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right]^2$

En exploitant les mesures expérimentales obtenues afin de calculer les rendements empiriques et ceux globaux de siniger et Hager. Ainsi , cette exploitation de ces mesures se concrétise par la figure (3.14)

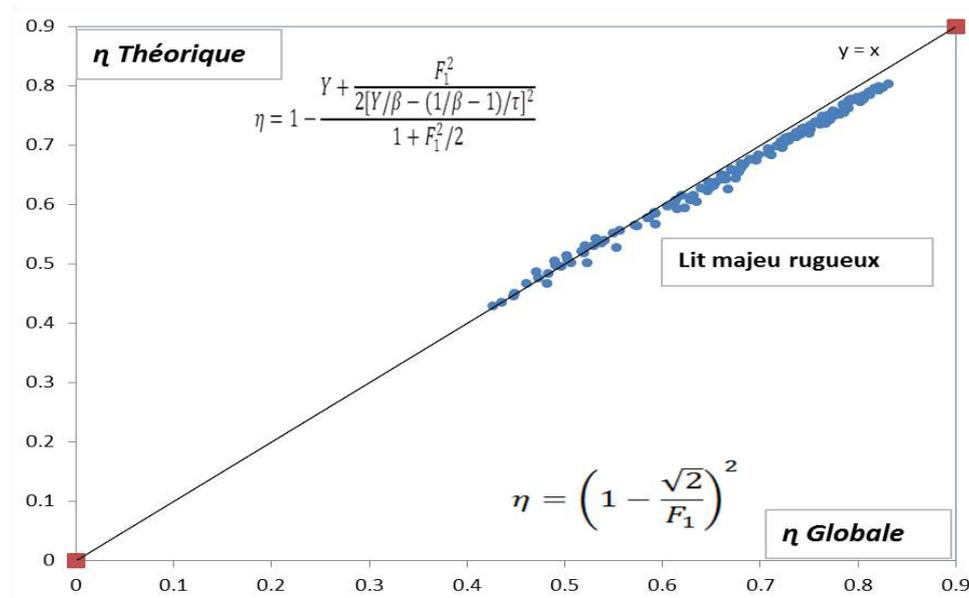


Figure 0(3.14) :présentation de  $\eta$ théorique et  $\eta$ Globale

A partir de cette figure 4.13, on remarque nettement la concordance des valeurs des deux rendements des deux approches, dont leurs motifs d'essais se répartissent autour de la première bissectrice pour le cas du lit majeur du canal. ce qui justifie leur fiabilité et l'applicabilité en pratique .

Tableau 3.9 : écart entre  $\eta_{exp}$  et celui  $\eta_{glob}$ 

$\eta_{globale}$	$\eta_{exp}$	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{globale}$	$\eta_{exp}$	$\Delta\eta$ (%)
0.448	0.446	0.391	0.831	0.803	3.445
0.473	0.476	-0.690	0.427	0.428	-0.388
0.497	0.495	0.329	0.449	0.450	-0.090
0.506	0.501	0.965	0.462	0.467	-1.066
0.537	0.538	-0.104	0.483	0.483	0.052
0.574	0.564	1.846	0.538	0.535	0.457
0.520	0.518	0.539	0.586	0.578	1.349
0.530	0.530	-0.111	0.593	0.585	1.342
0.541	0.540	0.234	0.491	0.497	-1.381
0.550	0.551	-0.304	0.503	0.508	-0.920
0.628	0.611	2.731	0.518	0.521	-0.487
0.647	0.623	3.689	0.536	0.536	-0.086
0.679	0.654	3.689	0.661	0.642	2.920
0.616	0.593	3.714	0.572	0.565	1.248
0.628	0.607	3.376	0.585	0.578	1.294
0.632	0.615	2.711	0.614	0.607	1.193
0.649	0.628	3.240	0.649	0.636	2.126
0.656	0.638	2.664	0.671	0.657	2.186
0.664	0.648	2.490	0.684	0.667	2.371
0.681	0.663	2.655	0.691	0.676	2.261
0.696	0.674	3.204	0.639	0.627	1.946
0.708	0.686	3.174	0.709	0.690	2.743
0.723	0.695	3.832	0.719	0.699	2.766
0.726	0.705	2.909	0.726	0.707	2.542
0.742	0.717	3.268	0.734	0.715	2.581
0.775	0.748	3.505	0.744	0.723	2.834
0.779	0.754	3.247	0.744	0.724	2.633
0.729	0.707	3.122	0.751	0.733	2.442
0.748	0.724	3.155	0.764	0.742	2.846
0.801	0.776	3.129	0.770	0.750	2.566
0.806	0.782	2.909	0.775	0.756	2.506
0.812	0.788	2.858	0.785	0.765	2.573
0.817	0.794	2.813	0.793	0.774	2.381
0.821	0.799	2.703	0.799	0.781	2.360
0.436	0.435	0.038	0.472	0.487	-3.199
0.483	0.467	3.301	0.490	0.504	-2.907
0.523	0.501	4.154	0.502	0.514	-2.359
0.553	0.527	4.629	0.521	0.530	-1.776
0.593	0.566	4.635	0.532	0.543	-1.928
0.623	0.594	4.797	0.605	0.597	1.380

0.635	0.604	4.908	0.557	0.555	0.287
-------	-------	-------	-------	-------	-------

**Tableau 3.9 .suite et fin . écart entre  $\eta_{exp}$  et  $\eta_{glob}$**

$\eta_{globale}$	$\eta_{exp}$	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{globale}$	$\eta_{exp}$	$\Delta\eta$ (%)
0.667	0.626	6.141	0.592	0.587	0.817
0.653	0.631	3.286	0.613	0.604	1.405
0.665	0.642	3.510	0.620	0.615	0.816
0.587	0.578	1.561	0.647	0.638	1.408
0.680	0.659	3.108	0.661	0.650	1.667
0.712	0.684	3.916	0.670	0.659	1.729
0.675	0.644	4.542	0.681	0.667	1.936
0.724	0.701	3.159	0.689	0.676	1.989
0.737	0.713	3.272	0.698	0.684	2.041
0.752	0.725	3.575	0.708	0.693	2.104
0.761	0.734	3.545	0.661	0.647	2.068
0.771	0.743	3.696	0.717	0.699	2.501
0.781	0.751	3.906	0.722	0.705	2.278
0.751	0.719	4.200	0.729	0.713	2.215
0.767	0.735	4.095	0.737	0.721	2.165
0.786	0.754	4.074	0.744	0.729	2.124
0.790	0.762	3.659	0.756	0.738	2.495
0.802	0.772	3.702	0.726	0.712	1.970
0.806	0.777	3.524	0.742	0.726	2.127
0.813	0.784	3.578	0.757	0.740	2.260
0.821	0.791	3.616	0.763	0.748	2.012

### III.3. Exercice de calcul des caractéristiques d'écoulement

Sachant les différentes approches fonctionnelles à caractère générale, on expose un exercice de vérification et d'application pour calculer les différents rapports caractérisant un écoulement qui se forme en canal rectangulaire composé rugueux.

On donne une rugosité absolue de valeur  $\varepsilon=10$  mm ;

- Le débit d'écoulement de valeur égale  $Q=27$  l/s, ce dernier traverse le bassin d'accumulation de forme composée rugueux .
- On donne une ouverture initiale  $h_1=3$  cm,
- Ainsi le calcul du facteur  $F_1$  est :

$$F_1^2 = Q^2 / (gb^2h^3), \text{ soit } F_1 \cong 11,060$$

Le rapport relatif de l'écoulement développé est :

$$L_j/h_1 = (-16,33 (\varepsilon/B - b) + 12,033)F_1$$

- $L_j/h_1=115,024$  par conséquent :  $L_j \cong 345,072$  cm
- Le rapport de l'écoulement brusquement varié de passage qui se réalise en canal rectangulaire composé rugueux est  $Y=h_2/h_1$  est :

D'après la relation empirique obtenue :  $Y = (-1,290(\varepsilon/B-b) + 1,322)Fr$

$$Y \cong 13,19 \text{ donc } h_2 = 39,58 \text{ cm}$$

Cependant, selon la relation théorique :  $Y = 1,444 F_1^{0,956} (1 - 4,061(\varepsilon/b))^{0,478}$

Par conséquent  $Y \cong 13,17$  donc  $h_2 = 39,51$  cm

Alors l'expression de l'écart relatif donne :  $(Y_{\text{exp}} - Y_{\text{theo}}) / Y_{\text{exp}} \cong 0,19\%$ . (très acceptable)

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

Selon l'expression aboutie :  $(-7,8875. (\varepsilon / B - b) + 8,1684). F_1$

$$L_r / h_1 = 81,62 \text{ donc } L_r = 244,86 \text{ cm}$$

- L'approche empirique développé expérimentalement pour le seuil relatif est d'expression suivante :  $s / h_1 = (-0,555 \varepsilon / (B-b) + 0,7706). F_1$

$$S/h_1 = 7,90 \text{ donc } S = 24 \text{ cm}$$

### III.4. récapitulation des résultats du troisième chapitre

A travers ce passage qui est purement expérimental, on traitera les études des écoulements brusquement varié, passant du régime torrentiel au régime fluvial. Cet écoulement qui se forme essentiellement dans les canaux rectangulaires composés rugueux.

En exploitant toutes les mesures obtenues au laboratoire, on est arrivé à produire des rapports adimensionnels qui nous ont permis de développer des approches fonctionnelles à caractères générales qui se résument comme suit :

01/Des approches adimensionnelles concernant le rapport de longueurs relatives  $L_j/h_1$  varient avec le paramètre  $F_1$  et du facteur rugosité relatif  $\varepsilon/B-b$ . on a noté que l'effet de cette rugosité est perceptible qui se traduit par la réduction remarquable de la longueur du ressaut.

02/ Ensuite des approches fonctionnelles adimensionnelles ont été obtenues liant le rapport adimensionnel  $Lr/h_1$ , le facteur rugosité relative  $\varepsilon/B-b$  et  $F_1$ . cette présente approche linéaire a bien éclairé que le facteur rugosité joue un effet réducteur perceptible aux caractéristiques d'écoulement.

03/Egalement les corrélations des mesures obtenues ont produit une approche empirique importante liant le rapport  $Y$ , le paramètre rugosité relative  $\varepsilon/B-b$  et le Froude  $F_1$ . ce facteur rugosité a joué un effet réducteur signifiant aux rapport des profondeurs d'écoulement.

04/Les analyses des mesures concernant le rapport  $S/h_1$  liés avec le paramètre rugosité relatives  $\varepsilon/B-b$  et le facteur Froude  $F_1$  ont produit une relation importante adimensionnelle permettant de créer et positionner le passage entre le régime torrentiel et celui fluvial.

05/Enfin de cette analyse expérimentale, on est arrivé à produire l'approche très remarquable du rendement  $\eta$  variant en fonction du facteur  $F_1$ , cette rentabilité a montré que l'effet du facteur rugosité relative  $\varepsilon/(B-b)$  imposé au lit majeur du canal rectangulaire composé est très remarquable justifiant la dissipation importante de l'énergie cinétique.

## CONCLUSION DU DEUXIÈME AXE FONDAMENTAL

Ce deuxième axe primordial de notre contribution de recherche scientifique a traité les écoulements brusquement variés qui se présentent souvent à l'aval des ouvrages hydrauliques notamment les barrages d'eau. Ces écoulements traités expérimentalement et théoriquement, sont créés et contrôlés dans le canal d'expérimentation composé rugueux.

Cet axe est composé de trois chapitres principaux :

Pour le chapitre premier, on a montré avec précision le banc d'expérimentation avec leurs appareillages et instruments destinés à collecter les mesures des caractéristiques de l'écoulement de passage du régime torrentiel au régime calme. Cet écoulement brusque est produit par l'emplacement en travers des parois de contrôle. Concernant le mesurage des débits volumiques, ils sont assurés par le déversoir inséré au canal d'essai dont on affleure les diverses lames déversant.

En fin de ce chapitre premier, on a décrit clairement la procédure de conception des différents tapis rugueux.

Pour le deuxième chapitre, nous avons tenté d'analyser l'effet du paramètre rugosité aux diverses caractéristiques de l'écoulement produit dans le canal concerné rugueux.

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

En deuxième temps, on a corrélié toutes les motifs expérimentaux du rapport  $Y$  avec ceux obtenus de l'approche théorique adimensionnelle développée  $Y_{théo}$  dont elle varie avec  $Fr$  et  $Cr$ . Cette corrélation a montré effectivement la validité de cette approche théorique obtenue justifiant la fiabilité des mesures expérimentales réalisées au laboratoire. Par conséquent, l'erreur relative de ces mesures déduites des deux expressions obtenues ne dépasse en majorité les 5%.

Pour le troisième chapitre, A travers lequel un travail purement expérimental réalisé qui est lié aux études des écoulements brusquement variés, de passage du régime torrentiel au régime fluvial. Ce passage qui se forme essentiellement dans les canaux rectangulaires composés rugueux.

En exploitant toutes les mesures réalisées, on est arrivé à produire pour ce dernier

chapitre des rapports adimensionnels qui nous ont permis de développer des approches fonctionnelles à caractères générales qui se résument comme suit :

01/Des approches adimensionnelles concernant le rapport de longueurs relatives du ressaut  $L_j/h_1$  varient avec le facteur  $F_1$  et du facteur rugosité relatif  $\varepsilon/B-b$ . on a noté que l'effet de cette rugosité est perceptible qui se traduit par la réduction remarquable de la longueur du ressaut.

02/Ensuite des approches fonctionnelles adimensionnelles ont été obtenues liant le rapport  $L_r/h_1$ , le paramètre adimensionnel  $\varepsilon / B-b$  et le paramètre  $F_1$ . cette approche linéaire a exposé clairement que le facteur rugosité joue un effet réducteur perceptible aux caractéristiques d'écoulement.

03/Egalement les corrélations des mesures obtenues ont produit une approche empirique importante liant le rapport  $Y$ , le paramètre rugosité relative  $\varepsilon/B-b$  et le Froude  $F_1$ . ce facteur rugosité a joué un effet réducteur significatif aux rapports des profondeurs d'écoulement .

04/Les analyses des mesures concernant le rapport  $S/h_1$  liés avec le paramètre rugosité relatives  $\varepsilon/B-b$  et le facteur Froude  $F_1$  ont produit une relation importante adimensionnelle permettant de créer et positionner le passage entre le régime torrentiel et celui fluvial.

05/Enfin de cette analyse expérimentale, on est arrivé à produire l'approche très remarquable du rendement  $\eta$  variant en fonction du facteur  $F_1$ , cette rentabilité a montré que l'effet du facteur rugosité relative  $\varepsilon/(B-b)$  imposé au lit majeur du canal rectangulaire composé est très remarquable justifiant la dissipation importante de l'énergie cinétique.

# Aperçu général

## CONCLUSION GENERALE

Cette présente recherche scientifique a pour fonction primordiale d'étudier, de point de vue théorique et expérimental, les écoulements brusquement variés qui se manifestent souvent à l'aval des ouvrages hydrauliques. A cet effet notre contribution se localise à l'étude de ces écoulements brusquement variés qui se sont réalisés dans un modèle physique réduit de forme rectangulaire composée avec lit majeur rugueux.

Cette thèse est scindée en deux axes essentiels :

Le premier axe de la bibliographie est composé en deux chapitres primordiaux :

Pour le chapitre premier bibliographique, nous avons exposé les recherches scientifiques réalisés par Khattaoui et Achour(2012), Qui sont appliquées directement au écoulement réalisé en canal rectangulaire composé. Ils ont démontré une fonction liant  $\phi(F_1; Y; \beta; \tau) = 0$ . également une relation théorique a été fournie par Khattaoui et Achour (2012) en faisant rajouter l'effet des frottements liés à la section composée du canal. Ensuite une relation globale de l'impulsion de frottement est développée théoriquement par Achour (2000) en s'appuyant sur les écoulements effectués au sein de

la galerie circulaire brusquement élargie. Une approche établie par benabdesselam et Al (2017 et 2020) a été exposée. Cette relation d'ordre expérimentale et expérimentale liée aux expérimentations des écoulements brusques contrôlés par seuil mince réalisé en canal rectangulaire composé. Les expressions  $Y$  ont été montrées avec et sans  $F_x$ , qui sont assimilés à la relation de Borda-Carnot. les essais ont été réalisés sous les mesures du  $\tau_y$ . L'expérimentation faite a justifiée l'acceptation des relations théoriques démontrée sans  $F_x$  quand les valeurs  $\tau_y$  sont situées entre 0,25 et 0,333 et avec  $F_x$  quand  $\tau_y$  prend la valeur à 0,5. La validation des modèles est reposée essentiellement sur l'erreur quadratique moyenne et celle maximale, ces valeurs sont cernées respectivement entre à 0,3054 et 6,47. Aussi La justification de la rentabilité de l'écoulement est démontrée et que l'erreur maximale ne dépasse pas 4,83%. En conclusion, on déduit l'importance de la section composée à la dissipation de l'énergie comparé à la section rectangulaire.

Pour le chapitre deuxième de la bibliographie, on a exposé les écoulements brusquement variés produisant en canal de forme composée contrôlé par parois minces. L'auteur a bien montré le protocole expérimental servant à réaliser les essais, sans oublier tous

les instruments et appareils nécessitant pour concrétiser cette expérimentation. Le chercheur a bien exposé leurs résultats obtenus.

L'exploitation de toutes les mesures expérimentations par le chercheur a produit ce qui suit :

01/ deux approches globales du rapport  $Y$  de type linéaire qui varient avec le paramètre  $F_1$ , Pour la section composée du canal ont été obtenues. Cette section présente un effet positif au lit mineur.

02/Aussi, l'auteur a pu obtenir deux approches empiriques adimensionnelles liant  $L_j/h_1$ ,  $L_r/h_1$  et le facteur de régime  $F_1$ , et ceci pour les deux lits de la section composée. cette section aussi présente un effet réducteur des caractéristiques des écoulements brusquement variés au lit mineur que le lit majeur.

03/ l'auteur est arrivé à démontré une approche fonctionnelle à caractère adimensionnelle du facteur adimensionnel  $s/h_1$  en fonction du paramètre  $F_1$ , il a pu démontrer que l'effet des ouvertures initiales au lit majeur du canal est perceptible. Finalement, l'approche globale liant  $s/h_1$ ;  $F_1$  et  $h_1/B$  a été obtenue.

Pour le deuxième axe primordial de notre contribution de recherche scientifique, on a traité les écoulements brusquement variés qui se présentent souvent à l'aval des ouvrages hydrauliques notamment les barrages d'eau. Ces écoulements traités expérimentalement et théoriquement, sont créés et contrôlés en canal rectangulaires composé rugueux.

Cet axe est composé de trois chapitres principaux :

Concernant le premier chapitre, on a montré avec précision le Protocole expérimental avec leurs appareillages et instruments destinés à collecter les mesures des caractéristiques de l'écoulement de passage du régime torrentiel au régime calme. Cet écoulement brusque est produit par l'emplacement en travers des parois de contrôle. Concernant le mesurage des débits volumiques, ils sont assurés par le déversoir inséré au canal d'essai dont on affleure les diverses lames déversant.

En fin de ce chapitre premier, on a décrit clairement la procédure de conception des différents tapis rugueux.

Pour le deuxième chapitre, nous avons tenté d'analyser l'effet du paramètre rugosité aux caractéristiques diverses des écoulements brusquement variés développés en canal composé rugueux.

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

En deuxième temps, on a corrélié toutes les motifs expérimentaux du rapport  $Y$  avec ceux obtenus de l'approche théorique adimensionnelle développée  $T_{théo}$ . Ce rapport varie avec  $Fr$  et  $Cr$ . cette corrélation a montré effectivement la validité de cette approche théorique obtenue justifiant la fiabilité des mesures expérimentales réalisées au laboratoire. Par conséquent, l'erreur relative de ces mesures déduites des deux expressions obtenues ne dépasse en majorité les 5%.

Pour le troisième chapitre, A travers lequel un travail purement expérimental a été réalisé qui est lié aux études des écoulements brusquement varié, qui passeront du régime torrentiel au régime fluvial. Ce passage qui se forme essentiellement dans les canaux rectangulaires composés rugueux .

En exploitant toutes les mesures réalisées, on est arrivé à produire pour ce dernier chapitre, des rapports adimensionnels qui nous ont permis de développer des approches fonctionnelles à caractères générales qui se résument comme suit :

01/ Des approches adimensionnelles concernant le rapport de longueurs relatives  $L_j/h_1$  varient avec le paramètre  $F_1$  et du facteur rugosité relatif  $\varepsilon/B-b$ . on a noté que l'effet de cette rugosité est perceptible qui se traduit par la réduction remarquable de la longueur du ressaut.

02/ Ensuite des approches fonctionnelles adimensionnelles ont été obtenues liant le rapport  $L_r/h_1$  ;  $\varepsilon/B-b$  et  $F_r$ . cette approche linéaire a exposé clairement que le facteur rugosité joue un effet réducteur perceptible aux caractéristiques d'écoulement.

03/ Egalement les corrélations des mesures obtenues ont produit une approche empirique importante liant le rapport  $Y$ , le paramètre rugosité relative  $\varepsilon/B-b$  et le paramètre  $F_1$ . ce facteur rugosité a joué un effet réducteur signifiant aux rapport des profondeurs d'écoulement 04/ Les analyses des mesures concernant le rapport  $S/h_1$  liés avec le paramètre rugosité relatives  $\varepsilon/B-b$  et le facteur  $F_1$  ont produit une relation importante adimensionnelle permettant de créer et positionner le passage entre le régime torrentiel et celui fluvial.

05/ Enfin de cette analyse expérimentale, on est arrivé à développer l'approche très remarquable du rendement  $\eta$  variant en fonction du facteur  $F_1$ , cette rentabilité a montré que

l'effet du facteur rugosité relative  $\varepsilon/(B-b)$  imposé au lit majeur du canal rectangulaire composé est très remarquable justifiant la dissipation importante de l'énergie cinétique.

En fin de cette recherche scientifique approfondie, on peut juger que ce ressaut gérant l'écoulement brusquement varié qui passe notamment du régime torrentiel au régime fluvial, qui est formé et contrôlé en canal rectangulaire composée rugueux présente un effet de réduction notamment aux caractéristiques hydrauliques .

**Néanmoins, on conseillera vivement les étudiants chercheurs futurs d'entamer ces genres des travaux de recherches théoriques et expérimentales dans ce domaine qui est d'actualités, en but de développer des approches empiriques nouvelles permettant de combler les lacunes en matières d'hydraulique .**

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### A

Ackers , P., (1991) “Hydraulic design of straight compound channels brusquement élargie”. JHR 2000 ; 38(4) : 307-311.

Andersen, J, V. M., (1978). “Undular hydraulic jump”, Proc, ASCE, j, Hydraulics Division, Vol. 104, pp. 1185-1188.

Ali,G , « Ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant en canal profilé en ‘‘U’’ », Mémoire de Magister en Sciences Hydrauliques, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, 2005.

Ali,G., « Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à parois rugueuses », Thèse doctorat en Science Hydraulique, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, 2012.

Ali,G., Mahmoud,D, 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<sup>o</sup> 01, pp.40-57,2009.

Ali,G.,Ferhat,R., “Contribution to the Experimental Study on the Hydraulic Jump Evolving in a U-Shaped Channel with Rough Bed”, Journal of Fundamental and Applied Sciences, University El Oued, No 02, pp.254-271,2010.

### B

Bachir.A., HOUICHI, L, and Benabdesselam, . "Hydraulic jumps in a straight rectangular compound channel: theoretical approach and experimental study”. Larhyss Journal,29 (2017), 323-340.

Bachir,A, B Khattaoui, M., (2012). « Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé ». Revue scientifique et technique LJEE N°20.

Bachir ,A, « Dissipation d'énergie par ressaut », thèse d'état. Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil, 1998.

Bachir,A., (2000). « Ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie », JHR, 38(4), 307-311

Bachir ,A.,Mahmoud, D., « Ressaut contrôlé par seuil dans un canal profile en U ». Journal of Hydraulic Research, Vol. 41 (02), pp. 97-103, 2003.

Bakhmeteff, B. A., Matzke, A E, (1936). “The Hydraulic Jump terms of dynamic similarity”, Transactions, American society of civil engineers, Vol.101, pp, 630-647.

Belanger, J.B., (1828). « Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes », Carilian-Goeury, Paris.

Benabdesselam, A., (2020). « Approches théoriques et expérimentales du ressaut hydraulique dans un profil de canal compose ». Thèses de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra.

Benmalek, A., (2018). « Étude de la compacité du ressaut hydraulique dans quelques profils de canaux à ciel ouvert ». Thèses de doctorate, Université Mohamed Khider Biskra.  
 Bidone, G., (1819).” Observations on the Height of the Hydraulic Jump” a Report Presented in Meeting of Royal Academy of Science of Turin, pp. 21-80, 1819.

Bousmar, D., (2002). Flow modelling in compound channels / Momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains, Ph-D thesis, Université catholique de Louvain, Faculté des Sciences Appliquées.

Bretz, N., V., (1988). « Ressaut Hydraulique Forcé par seuil », Laboratoire de constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, Communication No. 2.

Busman, D., Wilkin, N., Jacquemart., J H, Zech Y., Overbank flow in symmetrically narrowing flood plains. JH Eng 2004; 130(4): 305-312.

## C

Carlier, M., (1980). Hydraulique Générale et Appliquée 1er édition

## 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**

Ferhat,R., « étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal incliné ». Mémoire de magister en hydraulique, Département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

Ferhat,R, Mahmoud, and Ali,G, “Experimental study of the sequent depth ratio of the hydraulic jump in a straight compound rectangular channel”. J. Fundam. Appl. Sci., 2020, 12(1S), 56-65.

Forster, J. W., Skrinde, R. A., Control of hydraulic jump by sills, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 115, pp. 973-987, 1950.

**H**

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°2,165-181,1992.

Hager, W. H., Wanoschek, R (1987).”Hydraulic Jump in Triangular Channel.J.” HydraulicRes. LAHR 25 (5), 549-564.

**M**

Mahmoud,D, « Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques ». Thèse de doctorat d'état, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie, 2003.

Mahmoud,D., Ali.G., 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.

Mahmoud,D., Samir,K.,, Ali,G., « Etude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses « , Larhyss Journal, N005, pp.187-196, Juin 2006.

Mahmoud,D., Moussa,L, M., Mansri, N. and Achour B., (2006). “Ressaut hydraulique forcé par marche positive ». The third international conference on the ‘Water Resources in the Mediterranean Basin’, Watmed 3 – Tripoli – Lebanon.

Mahmoud,D, Bachir,A ,(2007). “Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel”. Journal of Hydraulic Research, Vol. 45(1), pp. 135 – 139.

Mahmoud,D., Moussa,L, Mansri, N. and Achour B., (2008). “Theoretical study of the forced hydraulic jump by positive step in a triangular channel”. Journal of fluid mechanics research, Vol. 35(4), pp. 318 – 326.

Morvan, H., Pender. G., Wright, N, G., Ervine, D, A. (2002) “Three-Dimensional hydrodynamics of meandering compound channels JHE 2002” ; 128(7) : 674-682.

Mansri, N., Debabeche, M., Lakehal, M., « (2008). Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive dans un canal triangulaire ». Séminaire national d’hydraulique, Université de Chlef.

Mc Corcodal, (1994), Journal of Hydraulic Research, VOL. 32, 1994, NO.1; 119-130.

Moore, W. L., (1943), “Energy loss at the base of a free overfall”. Trans. ASCE 108, 1343-1392.

Muto, Y., Shiono, K., Imamoto, H., Ishigati, T., (1998). “Three-dimensional structure flow in meandering channels for overbank flow”, J. Hydroscience and Hydr. Engrg.

Myers W.R.C (1978). Momentum transfer in compound channel, International association for hydraulic research.

Mansri, N., Debabeche, M., Lakehal, M., (2008). « Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive dans un canal triangulaire ». Séminaire national d’hydraulique, Université de Chlef.

Mc Corcodal, (1994), Journal of Hydraulic Research, VOL. 32, 1994, NO.1; 119-130.

Moore, W. L., (1943), Energy loss at the base of a free overfall. Trans. ASCE 108, 1343-1392.

Muto, Y., Shiono, K., Imamoto, H., Ishigati, T., (1998). “Three-dimensional structure flow in meandering channels for overbank flow”, J. Hydroscience and Hydr. Engrg.

Myers W.R.C (1978). Momentum transfer in compound channel, International association for hydraulic research.

## O

Ohashi et al. (1973). "Design of Combined Hydraulic Jump and Ski-Jump Energy Dissipator of Flood Spillway". XIII ICOLD Congress Madrid Q.41, R.19: 311-333.

Ohtsu, I., (1976). "Free hydraulic jump and submerged hydraulic jump in trapezoidal and rectangular channels". Trans. JSCE 8, 122-125.

## **P**

Peterka, A.J. (1983). "Hydraulic design of stilling basins and energy dissipator", US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph, No. 25, Denver, Col.

Proust, S., (2005). "Écoulements non-uniformes en lit composé : effets de variations de largeur du lit majeur », Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, spécialité : mécanique des fluides, INSAde Lyon, Lyon.

## **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.

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.

Rachedi ,H, 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.

## **S**

Samir, K, S., « Ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal triangulaire à parois rugueuses », Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2006.

Samir, K., « Etude théorique et expérimentale de quelques types de ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal », Doctorat en science hydraulique, Université de Biskra, 2014.

Samir, K., Mahmoud, D. 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.

Sena, L., Ali, Samir, K. “Contribution to the study of the semi theoretical approach of the hydraulic jump in a rectangular channel of compound section with rough major bed”. J. Fundam. Appl. Sci., 2021, 13(1), 634-647.

Sena, L., Walid, D., Ali, G., (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.

Sena, L., Walid, D., Ali, G. A., (24. Novembre. 2021). « The Second International Conférence on Civil Engineering ICCE » 2021 Novembre 24-25, 2021, Laghouat, Alegria. Communication poster intitulée « L’étude de l’effet d’une rugosité sur le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée avec lit majeur rugueux »

Subramanya, K., Rajaratnam, N.,, “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.

Sellin, R. H. J., (1964). “A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain”, La Houille Blanche(7), 793-802.

Shiono, K., Knight, D. W., (1990). Two dimensional analytical solution for a compound channel, Proc., 3rd Int. Symp on refined flow modeling and turbulence measurements, Tokyo, Japan, 591-599.

Silvester, R., “Hydraulics jumps in all shapes of Horizontal Channels” Proc. ASCE. J. hydro.Div., N° 90, pp. 23-55, 1964.

Saman, N., Younes., “Numerical Simulation of Hydraulic Jump over Rough Beds”. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2020.

## W

Walid,J., Ali,G., (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.

Walid,J., Ali,G., Salim.K., (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.

Walid,J.,, Sena.L, Ali.G, (2020)., « Séminaire international « Durabilité d’agriculture saharienne et l’utilisation de l’eau ». Communication poster intitulée : 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.

Walid,J., Sena.L., Ali.G ., (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 November 2019.

Walid.D, W., Sena. L, Ali.G, (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

Walid,J., Sena.L., Ali.G., (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.

## 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.

Zahiri, A ,Dehghani, A. A ,Zahiri, A.,., « (2009). » Flow Discharge Determination in Straight Compound"Channels Using ANNs. International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering Vol:3, No:10.