

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université d'El-Oued



Faculté de Technologie Département d'Hydraulique et de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique

Option: Conception et Diagnostic des systèmes d'AEP et d'assainissement

THEME

**Contribution à l'étude des
Caractéristiques du Ressaut Hydraulique
Evoluant en Canal Rectangulaire
Composé avec Lit Majeur Rugueux**

Dirigé par:

Mr. GHOMRI Ali

Présenté par:

Mr. KOUIDRI Belkacem

Mr. HAMAMA Belgacem

Mr. RAHMANI Belgacem

Le jury:

Dr. Riguet ferhat	Université d'El-Oued	Président
Dr. GHOMRI Ali	Université d'El-Oued	Encadreur
Dr. Khater ibtissem	Université d'El-Oued	Examineur

Promotion: Juin 2022

Quoi de plus de pouvoir partager la joie de la réussite avec les êtres qu'on aime.

Arrivés au terme de nos études, nous avons le grand plaisir de dédier ce modeste travail aussi à

:

Nos chers parents, qui nous donnent toujours l'espoir de vivre et qui n'ont jamais cessé durant toutes leurs vies, de prier pour nous.

Enfin, nous dédions ce modeste travail à tous les membres de nos familles, nos amis, tous les professeurs qui nous ont enseigné par le passé et à tous ceux qui nous sont chers !

Remerciements

*Nous tenons à remercier, en premier lieu, **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné la volonté et la patience pour mener à bien ce modeste travail.*

Nous adressons nos vifs remerciements à Mr. Ghomri Ali, notre professeur consultant qui nous a orienté et dirigé avec ses conseils et commentaires très précieux, durant l'élaboration de ce de notre mémoire.

Nous remercions également, tous nos professeurs pour nous avoir guidés et conseiller tout au long de notre cursus universitaire.

Nous témoignons aussi, notre profonde gratitude aux cadres administratifs de la faculté des sciences et de la technologie de l'université d'El. Oued, qui nous a tous facilités avec leurs accueils et disponibilités.

Enfin, merci à tous ce qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet et que les personnes qui n'ont pas été citées, puissent nous en excuser et trouver dans cette note l'expression de toute notre gratitude.



MERCI A TOUS

KOUIDRI BELKACEM - HAMAMA BELGACEM - RAHMANI BELGACEM

TABLE DES MATIERES

DEDICACES.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIERES.....	iii
LISTES DES FIGURES.....	v
LISTES DES TABLEAUX.....	viii
RESUME.....	iii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE	4
1.1 INTRODUCTION	5
1.1.1 GENERALITE SUR LES NOMBRES ADIMENSIONNELS.....	5
a) NOMBRE DE REYNOLDS	5
b) NOMBRE DE FROUDE	6
c) PARAMETRE DE RUGOSITE RELATIVE.....	7
1.1.2 DEFINITION D'UN RESSAUT HYDRAULIQUE.....	8
1.1.3 Determination Des Profondeurs Conjuguees Du Ressaut	9
1.2 RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE.....	11
1.2.1 LES DIFFERENTES CONFIGURATION DU RESSAUT CLASSIQUE ...	12
1.2.2 RAPPORT DES HAUTEURS CONJUGUEES DU RESSAUT	13
1.2.3 LES CARACTERISTIQUES DU RESSAUT.....	14
1.2.4 LE RENDEMENT DU RESSAUT HYDRAULIQUE	17
1.3 RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT EN CANAL RECTANGULAIRE AVEC FOND RUGUEUX.....	18
1.3.1 L'APPROCHE DE RAJARATNAM (1968).....	18
1.3.1.2.1. LA HAUTEUR CARACTERISTIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE : H_2	19
1.3.1.2.2. LA LONGUEUR DU ROULEAU DE SURFACE	21
1.4 LE RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT EN CANAL RECTANGULAIRE AVEC LIT ONDULE.....	22
1.4.1 L'APPROCHE DE RAJARATNAM (2002).....	24
1.5 CONCLUSION	27
CHAPITRE II : LE RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE COMPOSE	28
2.1 INTRODUCTION	30
2.2 CARACTERISTIQUE DE L'ECOULEMENT EN LIT COMPOSE	30
2.3 L'AVANTAGE DES CANAUX DE TYPE COMPOSE	30
2.4 APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR 2012.....	31

Table des matières

2.4.1	LE RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE COMPOSE.....	31
2.4.2	LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUES :	31
2.4.3	LE RENDEMENT DU RESSAUT HYDRAULIQUE :.....	35
2.5	L'ETUDE EXPERIMENTALE DES CARACTRISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIIEQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSEE	36
2.5.1	LA PROBLEMATIQUE	36
2.5.2	ANALYSE DES ESSAIS EXPERIMENTAUX	37
2.5.3	RESULTATS EXPERIMENTAUX(travaux de Riguet et al,2019).....	39
2.5.3.1.	RAPPORT DES HAUTEURS CONJUGUEES	39
2.5.4	LES CARACTERISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE	40
2.5.4.1	LA LONGUEUR RELATIVE L_j/h_1 DU RESSAUT VARIE EN FONCTION DU NOMBRE DE FROUDE F_1	40
2.5.4.2	LA LONGUEUR RELATIVE L_r/h_1 DU ROULEAU DE SURFACE VARIE EN FONCTION DU NOMBRE DE FROUDE F_1	41
2.6	CONCLUSION.....	42
CHAPITRE II : DEROULEMENT DE L'EXPERIENCE.....		44
3.1	INTRODUCTION	45
3.2	POSITION DU PROBLEME.....	45
3.3	DESCRIPTION DES ESSAIS.....	46
3.3.1	PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE DES ESSAIS.....	46
3.4	CONCLUSION	53
CHAPITRE IV : INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX		54
4.1	Longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_r :	55
4.2	Longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface du ressaut en fonction du nombre de Froude F_r :	62
4.3	Le Rendement du Ressaut Hydraulique :	69
CONCLUSION GENERALE		76
5	CONCLUSION GENERALE	77
6	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	81
7	ANNEXES.....	I
A.1.	Rapport (Y) des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude Fr :	I
A.2.	Variation du coefficient C_r de résistance en fonction de la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$:.....	III
A.3.	Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient C_r de résistance et du nombre de Froude incident Fr :	VI

LISTES DES FIGURES

Figure 1-1 Schéma d'un ressaut hydraulique.....	8
Figure 1-2 Représentation des forces agissantes sur le ressaut.....	9
Figure 1-3 Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828).....	11
Figure 1-4 les différentes configurations du ressaut classique selon Peterka et Bradley (1957). a) Pré-ressaut, b) Ressaut de passage, C) Ressaut stable, d) Ressaut clapoteux..	14
Figure 1-5 Hauteur du ressaut	15
Figure 1-6 Configuration du ressaut hydraulique. a) rouleau de surface développé. b) rouleau de surface non développé.....	16
Figure 1-7 Ligne de charge totale le long du ressaut classique	17
Figure 1-8 le Rendement η^* du ressaut classique qui varie en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbe tracée selon la relation (1.12). (---) Courbe tracée selon la relation (1.13).....	18
Figure 1-9 Variation de $y = h_2 / h_1$ en fonction de F_1	20
Figure 1-10 Variation de h_2/h_2^* en fonction de ε / h_1	21
Figure 1-11 la Variation de la longueur relative des caractéristiques du ressaut : (a) L_r/h_2^* en fonction de F_1 ; (b) L_j/h_2^* en fonction de F_1	22
Figure 1-12 Configuration du ressaut hydraulique avec lit ondulé.....	23
Figure 1-13 (a) configuration de surface du ressaut hydraulique ; (b) Profil généralisé de surface du ressaut hydraulique	24
Figure 1-14 Variation de h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	25
Figure 1-15 Configuration de la longueur relative du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude F_1 . (a) du rouleau de surface ; (b) du ressaut.....	26
Figure 2-1 Ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée...31	
Figure 2-2 le rapport de Y, calculé par (3.4), varie en fonction de F_1 .(---) : $\beta = 1$.34	
Figure 2-3 le rapport de Y varie en fonction de F_1 . (o) : expression (2.6), (+):expression (2.4).....	34
Figure 2-4 Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . (---) : $\beta=1$. <u>η est calculé par l'équation (2.7).</u>	35
Figure 2-5 Variation de η en fonction de F_1 . (o) : équation (2.7), avec frottement.....	36
Figure 2-6 Configuration du ressaut contrôlé par un seuil mince en canal rectangulaire de forme composée.	37
Figure 2-7 Photographie du canal ayant servi à l'expérimentation.....	39
Figure 2-8 le rapport des hauteurs conjuguées Y varie en fonction de Froude F_1 pour le canal composé . (o) Les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustements.....	40

Listes des figures

Figure 2-9 la représentation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude F_1 , (o) Les mesures expérimentales pour un lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour un lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.	41
Figure 2-10 représentation de la longueur relative rouleur de surface L_r/h_1 du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude F_1 , (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur.	42
Figure 3-1 Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince en canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux.	46
Figure 3-2 Photographie du canal ayant servi à l'expérimentation.	46
Figure 3-3 Déversoir rectangulaire utilisé aux mesures des lames déversant.	48
Figure 3-4 Photographie d'un tapis rugueux soigneusement collé sur le lit majeur du canal rectangulaire de section composée.	48
Figure 3-5 Photographie des quatre tapis rugueux : $\varepsilon=06$ mm, $\varepsilon=08$ mm, $\varepsilon=10$ mm et $\varepsilon=12$ mm.	49
Figure 4-1 La variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_r	55
Figure 4-2 L'ajustement statistique des couples de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, a)	56
Figure 4-3 Représentation graphique de L_j/h_1 expérimentale en fonction de L_j/h_1 globale d'un lit majeur rugueux.	57
Figure 4-4 la variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleur en fonction du nombre de Froude F_r	62
Figure 4-5 L'ajustement statistique des couples de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, a)	63
Figure 4-6 Représentation graphique de L_r/h_1 expérimentale en fonction de L_r/h_1 globale d'un lit majeur rugueux.	64
Figure 4-7 la variation de η variant en fonction de Fr	70
Figure 4-8 la variation de η théorique variant en fonction de η Globale Fr	71
Figure A-1 la variation de la longueur h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude F_r	I
Figure A-2 L'ajustement statistique des couples de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, a)	II
Figure A-3 représentation graphique de ($Y=h_2/h_1$) expérimentale en fonction de ($Y=h_2/h_1$) globale d'un lit majeur rugueux et celui de lit mineur lisse.	III
Figure A-4 la variation de la longueur $F(Y)$ en fonction du nombre de Froude F_r^2	IV
Figure A-5 L'ajustement statistique des couples de valeurs. ($\varepsilon/(B-b)$, C_r)	V
Figure A-6 Représentation graphique de $F(Y)$ expérimentale en fonction de $F(Y)$ globale d'un lit majeur rugueux.	VI
Figure A-7 la variation de $(1-C_r)$ en fonction du Y Exp.	VII
Figure A-8 Représentation graphique de Y expérimentale en fonction de Y globale d'un lit majeur rugueux.	VII

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 3-1 Récapitulation des mesures expérimentales	39
Tableau 4-1 Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $L_j/h_1 = f(F_r)$	56
Tableau 4-2 récapitulation des résultats obtenus dans le tableau ci-dessous	57
Tableau 4-3 Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $L_r/h_1 = f(F_r)$	63
Tableau 4-4 récapitulation des mesures expérimentales dans le tableau ci-dessous.....	64
Tableau 4-5 rendement η	71
Tableau A-1 Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $h_2/h_1 = f(F_r)$.II	
Tableau A-2 Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $F(Y) = f(F_r)^2$ IV	

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى التحليل التجريبي الهيدروليكي للقفزة المائية المراقبة بعتبة رقيقة الجدران تتطور في قناة مستطيلة من قسم مركب ذات قاع أعلى خشن. تبحث الدراسة عن تأثير هذه الخشونة على خصائص القفزة. من خلال التحليل التجريبي، المدعوم بالبيانات التجريبية، سمح بالحصول على علاقات تجريبية بحتة دون أبعاد التي تمكننا من تحديد أبعاد حوض التبديد لنموذج القفزة الهيدروليكية.

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

Résumé

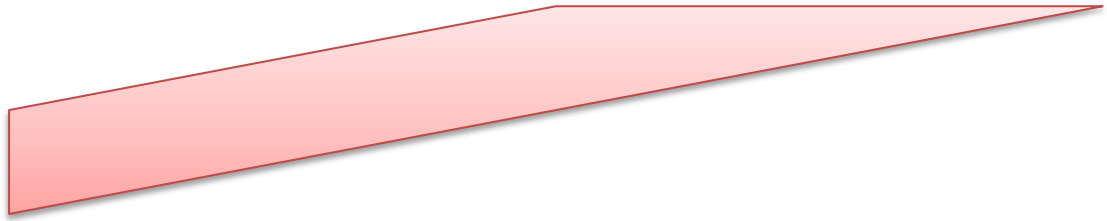
Ce présent mémoire est destiné à l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à parois minces évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux . L'étude a permis de montrer l'effet de cette rugosité sur les caractéristiques du ressaut hydraulique. Il a été permis d'obtenir des relations adimensionnelles purement empiriques qui nous permettent de déterminer les dimensions du bassin de dissipation.

Mots clés: *Ressaut hydraulique, canal rectangulaire composée, rugosité du lit majeur, bassin de dissipation.*

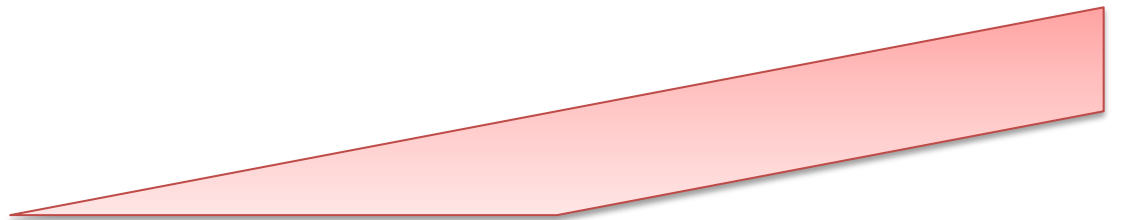
Abstract

This present memory is intended for the experimental analysis of the hydraulic jump controlled by threshold with thin walls evolving in a rectangular channel of compound section with rough major bed. The study made it possible to show the effect of this roughness on the characteristics of the hydraulic jump. It has been possible to obtain purely empirical dimensionless relations that allow us to determine the dimensions of the dissipation basin.

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



Introduction générale



INTRODUCTION GENERALE

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

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

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

Ce présent mémoire a pour but d'étudier, d'un point de vue expérimental, le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince qui se forme en canal rectangulaire

Introduction générale

de section composée avec lit majeur rugueux. Des approches fonctionnelles en terme adimensionnel, liant les différentes caractéristiques du ressaut, apparaissant l'influence de la rugosité imposée au lit majeur du canal sur les caractéristiques du ressaut, seront exposées. Il est très important de noter que ce type ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux n'a pas été entamé antérieurement, et c'est pour combler cette lacune que notre thème de recherche a été présenté.

Pour le premier chapitre d'intitulé le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire, à travers lequel on l'a divisé en trois axes :

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

Introduction générale

- Les travaux du ‘‘Rajaratnam 2002’’ réalisés dans un banc d’expérimentation rectangulaire à fond ondulé. Ils ont noté également de bonnes performances vis-à-vis de la réduction de la profondeur aval du ressaut.

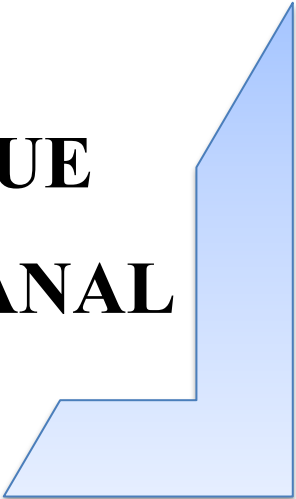
Pour le deuxième chapitre de la partie bibliographique nous avons exposé les travaux suivants :

- En premier lieu les travaux de Khattoui et Achour en 2012 liés avec le ressaut hydraulique formé en canal rectangulaire de forme composée. Une relation fonctionnelle est de forme $\phi (Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$ sans tenir compte des forces de frottements. Une relation deuxième a été exposée y compris les forces de frottements. L’approche globale est déduite par le développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie.
- En second lieu, les travaux de ‘‘F. Riguet et al 2019’’. Qui se basent purement à l’expérimentation faite au niveau du laboratoire (LARHYSS), ils ont constaté que l’effet des ouvertures h_1 sur la variation du rapport Y du ressaut hydraulique qui varie en fonction du nombre de Froude incident F_1 est remarquable.

Pour le troisième chapitre, nous avons exposé le déroulement expérimental.

Et Le dernier chapitre concernera notre propre contribution à l’étude des caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux, d’un point de vue expérimentale.

Chapitre 1



RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

1.1 INTRODUCTION

Le premier chapitre est consacré aux travaux antérieurement réalisés, touchant de près notre thème, ce phénomène de ressaut hydraulique sur lequel nous travaillons, intéresse de nombreux ingénieurs hydrauliciens. Les recherches ont parvenus à des résultats fiables grâce à plusieurs expériences réalisées en laboratoire, d'une part, pour obtenir une structure idéale du bassin d'amortissement, et d'une autre part, pour solutionner les phénomènes de dégradation du lit de la vallée, et de l'aval des Barrages.

Pour cela, nous allons s'intéresser aux activités relatives au ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire, d'où trois aspects du ressaut vont être exposés :

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

1.1.1 GENERALITE SUR LES NOMBRES ADIMENSIONNELS

Diverses forces agissant sur les écoulements à surface libre:

- la gravité
- l'inertie
- la viscosité

En ce qui concerne la classification des écoulements, cela revient à comparer les valeurs relatives de ses forces. Ce faisant, on définit des nombres adimensionnels dont la valeur reflète le résultat de l'équilibre de ces forces. Deux nombres sont très utilisés: Reynolds et Froude.

a) NOMBRE DE REYNOLDS

$$Re = \frac{\text{Force d'inertie}}{\text{Force visqueuse}} = \frac{UD}{\nu}$$

Où

- U est une vitesse caractéristique m/sec
- D est une dimension caractéristique en m; soit la hauteur d'un obstacle ou soit la profondeur "H" d'eau
- ν est la viscosité cinématique. (m²/s)

Par exemple, de l'eau (à 20°C) coulant à une vitesse de 1 m/sec et ayant une profondeur de 1 m sera caractérisée par un nombre de Reynolds de: $Re = 10^6$.

Plus le nombre de Reynolds est grand plus l'influence des forces visqueuses sur l'écoulement devient négligeable. Dans les écoulements naturels, à surface libre les forces d'inertie sont prédominantes par rapport aux forces visqueuses dites "laminaires". Ces écoulements sont dits turbulents.

b) NOMBRE DE FROUDE

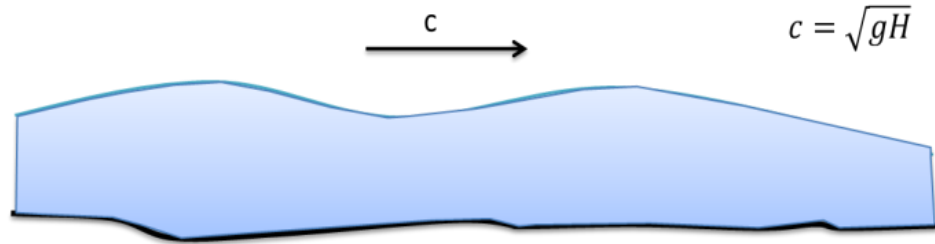
Ce nombre adimensionnel est très important pour les écoulements à surface libre. Il n'est pas utilisé pour les écoulements en charge car la force de gravité n'influence pas ce type d'écoulement.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gH}}$$

Où

- g : accélération de la gravité (m/s²)
- H : dimension caractéristique, la profondeur d'eau par exemple. (m)

Remarquons que ($\sqrt{gH}$) est aussi la célérité (c) d'une onde longue dans les eaux peu profondes:



$$Fr = \frac{\text{vitesse du fluide}}{\text{célérité d'une onde de gravité}}$$

Si Fr est grand (≈ 1 ou plus), une perturbation à l'amont se propage à l'aval rapidement et peut provoquer des chocs, des instabilités; Dans ce cas le régime d'écoulement est dit torrentiel.

Si le fluide a un nombre de Froude inférieur à 1 ($Fr < 1$), l'écoulement est dit fluvial. Toutes les perturbations en aval influencent alors l'écoulement en amont. Si le fluide a $Fr > 1$, l'influence des conditions en aval ne se fera pas sentir.

C'est par l'intermédiaire d'un ressaut, que le régime torrentiel ($Fr > 1$) passe à celui fluvial ($Fr < 1$); par contre, le passage du régime fluvial au régime torrentiel se fait sans discontinuité.

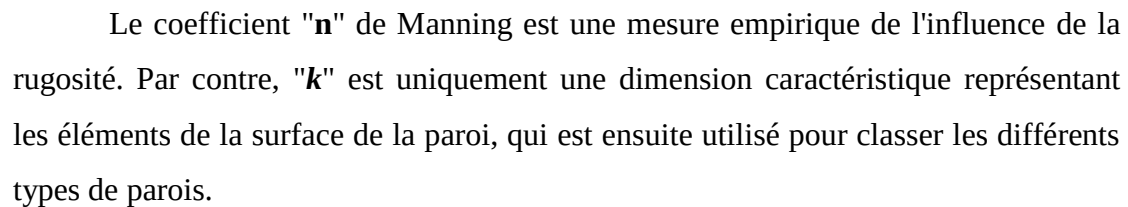
(régime torrentiel)	(régime fluvial)
$c_1 = \sqrt{gH_1}$ est petit	$c_2 = \sqrt{gH_2}$ est grand
U_1 est grand	U_2 est petit

Si le nombre de Froude avoisine de : un ($Fr = 1$) comme c'est le cas lors du passage d'un régime torrentiel au fluvial ou l'inverse, l'écoulement est dit critique. Les perturbations sont alors pratiquement stationnaires.

c) PARAMETRE DE RUGOSITE RELATIVE

$$Fr = \frac{k}{H}$$

La rugosité relative est une mesure de la qualité d'une paroi. Contrairement à R_e et Fr , ce paramètre n'est pas l'expression d'un rapport de forces. La résistance à



On appelle un ressaut hydraulique une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement permanent, se produisant pendant le passage du régime torrentielle à celui fluvial.



8

La perte de charge est représentée par ΔH_{12} . La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ces sections initiales et finales à la charge totale dans sa section initiale.

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un coefficient cinétique (ou nombre de Froude $F_r > 1$) et représente la relation entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation des petites perturbations

1.1.3 DETERMINATION DES PROFONDEURS CONJUGUEES DU RESSAUT :

On ne peut pas appliquer le théorème de Bernoulli entre les sections 1 et 2 pour, qui ΔH_{12} détermine les profondeurs conjuguées du ressaut, étant donné que le terme représentant la perte de charge, n'est pas connu et que les formules du régime uniforme ne sont pas applicables. C'est le théorème d'Euler qui permet de résoudre ce problème. Considérons un ressaut classique évoluant entre la section initiale et finale respectivement 1 et 2 (figure-1.2)

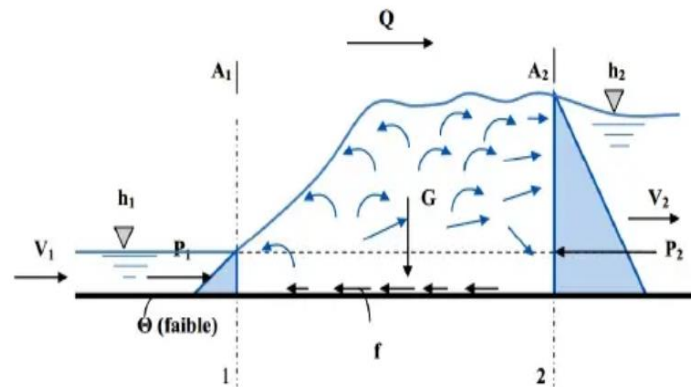


Figure 1-2 Représentation des forces agissantes sur le ressaut

L'équation de continuité permet d'écrire :

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} \quad \text{-----> (1.1)}$$

Où, Q est le débit volumique et A1 l'aire de la section mouillée initiale qui s'exprime par.

$$A_1 = b \cdot h_1 \quad \text{-----> (1.2)}$$

D'après le résultat classique dû à **Belenger** (1828) qui s'obtiendra en appliquant le théorème d'**Euler** qui ne fait intervenir que les forces extérieures et qui

ne met pas en cause les pertes de charges dues à la turbulence et aux remous intérieurs. Donc l'auteur a appliqué ce théorème à la masse liquide contenue entre les sections (A_1) et (A_2) et a supposé :

- la répartition des pressions dans les sections (A_1) et (A_2) est hydrostatique.
- les frottements sur les parois et le fond du canal le long de la faible distance séparant (A_1) et (A_2) sont négligeables par rapport à la perte de charge due à la turbulence créée par le ressaut.
- les vitesses des différents filets liquides dans chacune des sections (A_1) et (A_2) sont parallèles à la vitesse moyenne V , et considérées uniformes.
- la résistance de l'aire est négligeable.

Donc l'application de la deuxième loi de **Newton** nous donne :

$$\beta_2 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_2 - \beta_1 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_1 = P_1 - P_2 + G \cdot \sin \theta - f \quad \text{-----> (1.3)}$$

Où :

β : Facteur de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité

Puisque la répartition des vitesses est supposée uniforme.

ρ : La masse volumique du liquide en mouvement.

Q : débit volumique.

V : vitesse d'écoulement.

g : accélération de la pesanteur.

G : poids de la tranche liquide située entre 1 et 2.

P_1 et P_2 : forces des pressions hydrostatiques.

θ : Angle d'inclinaison du canal (pour un ressaut classique $\theta = 0^\circ$)

f : force de frottement (considérée comme négligeable).

En tenant compte de tous ces paramètres la relation (1.3) s'écrit :

$$\frac{1}{2} \omega b h_1^2 + \rho \cdot Q \cdot V_1 = \frac{1}{2} \omega b h_2^2 + \rho \cdot Q \cdot V_2 \quad \text{-----> (1.4)}$$

Le nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut évoluant dans un canal rectangulaire s'écrit :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{g b^2 h_1^3} \quad \text{-----> (1.5)}$$

Après avoir introduit les relations (1.1), (1.2) et (1.5) dans la relation (1.4) on obtiendra :

$$Y^* = \frac{h_2^*}{h_1} = 0.5 [\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1] \quad \text{-----> (1.6)}$$

Et enfin on a abouti à l'équation de **Belenger** (1828), liant le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut au nombre de Froude F_1 , en réalité c'est une équation d'une droite représentée par la Figure-1.3.

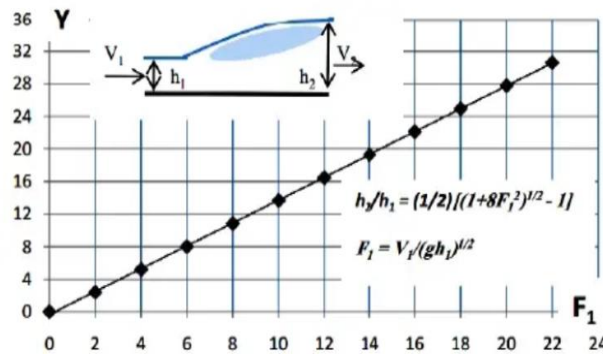


Figure 1-3 Représentation graphique de l'équation de Belenger(1828)

Hager et **Sinniger** (1986), ont donné une relation plus simple que la relation (1.6), et applicable pour un nombre de Froude $F_1 > 3$.

1.2 RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

Le ressaut hydraulique désigne le passage de l'écoulement torrentiel (ou supercritique) à l'écoulement fluvial (subcritique). Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur L_r appelée longueur du rouleau de surface. On nomme un ressaut hydraulique classique lorsqu'il se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible. Le ressaut hydraulique est défini par les caractéristiques suivantes :

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

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

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

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

1.2.1 LES DIFFERENTES CONFIGURATION DU RESSAUT CLASSIQUE

1.2.1.1 TYPOLOGIE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE :

Selon la classification proposée par Bradley et **Peterka** (1957), le ressaut classique peut se présenter sous quatre configurations distinctes. Cette classification se base principalement sur la valeur du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, en excluant les formes obtenues pour $F_1 < 1,7$. Ces dernières sont décrites par plusieurs auteurs tel que Anderson (1978) et ne répondant pas aux exigences d'un bassin de dissipation d'énergie ; les ressauts correspondants sont dits ondulés présentant tantôt une surface libre régulière.

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

- Un PRE-RESSAUT dont le Froude est compris entre 1,7 et 2,5 (**figure -1.4a**) : sa surface du ressaut est composée de petits rouleaux pour le nombre de Froude égale à 1,7 ; leurs rouleaux de surface augmentent à chaque fois que le nombre de Froude F_1 s'accroît.

- LE RESSAUT DE PASSAGE dont des nombre de Froude est compris entre 2,5 et 4,5. (figure-1.4b) : il se forme avec des battements de vagues importantes pour des périodes irrégulières, pouvant créer un effet néfaste sur les parois du canal.
- LE RESSAUT STABLE s'obtient pour une gamme dont le nombre de Froude est compris entre 4,5 et 9 (figure-1.4c) : ce type de ressaut est utilisé pour les bassins de dissipation d'énergie à cause de la bonne rentabilité située entre 45% et 70%.
- LE RESSAUT CLAPOTEUX est obtenu par le nombre de Froude dépassant 9. voir Figure-1.4d.

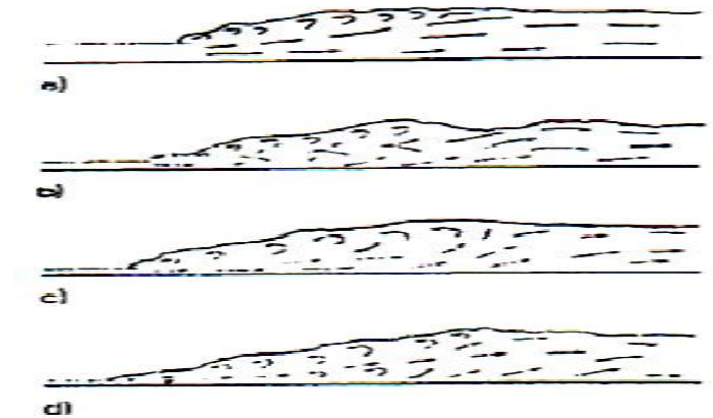


Figure 1-4 les différentes configurations du ressaut classique selon Peterka et Bradley (1957). a) Pré-ressaut, b) Ressaut de passage, C) Ressaut stable, d) Ressaut clapoteux

1.2.2 RAPPORT DES HAUTEURS CONJUGUEES DU RESSAUT

Le canal de section droite rectangulaire constante est un cas particulier du canal trapézoïdal pour lequel l'angle d'inclinaison du talus par rapport à l'horizontal est de 90° ; ceci correspond donc à $m = \cotg 90^\circ = 0$, ou bien à $M = 0$.

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

$$Y^* = \frac{h_2^*}{h_1} = 0.5 \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right]$$

L'équation (1.6) de **Belenger** nous permet d'estimer le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut qui varie en fonction du nombre de Froude F_1 . **Sinniger et Hager en 1985** présentent une relation applicable pour le nombre de Froude dépasse la valeur 2 :

$$Y^* = \frac{h_2^*}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2} \quad \text{-----> (1.7)}$$

1.2.3 LES CARACTERISTIQUES DU RESSAUT

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

1.2.3.1 LONGUEURS DU RESSAUT

Il résulte de ce qu'on a dit précédemment que le ressaut se produit toujours au cours du passage d'un régime torrentiel à un régime fluvial. La longueur L_j est la caractéristique du ressaut la plus difficile à déterminer, mais on estime que cela n'est possible que si :

- La surface libre est pratiquement horizontale.
- La surface de turbulence du rouleau est faible.
- Les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.
- L'écoulement variant graduellement apparaît à l'extrémité aval du rouleau.

Pratiquement, pour calculer les dimensions du bassin d'amortissement, on considère comme limite d'aval du ressaut le point à partir duquel le revêtement du béton n'est plus nécessaire.

Les essais de **Bradley et Peterka** (1957) ont permis à Hager et al. (1990) de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur L_j du ressaut. Celle-ci rapportée à la hauteur initiale h_1 du ressaut, peut s'écrire comme suit:

$$\frac{L_j^*}{h_1} = 220 \cdot \tanh\left(\frac{(F_1-1)}{22}\right) \quad \text{-----> (1.8)}$$

D'après **Hager** et **al.** (1990), la variation de la longueur relative L_j^*/h_2^* en fonction du nombre de Froude Fr_1 montre que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à 6 pour une gamme pratique $4 < F_1 < 12$

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

D'autres formules ont été proposées, pour un canal de section droite rectangulaire, selon **Carlier** (1980) on a :

■ formule de **Smetana** (1933)

$$L_j^* = 6(h_2^* - h_1^*)$$

Pour un nombre de Froude au-delà de $Fr_1 = 3$ selon **Sinniger** et **Hager** (1985), une formule empirique peut également s'appliquer comme suit :

$$\frac{L_j^*}{h_2^*} = \frac{35\sqrt{F_1}}{(8 + F_1)}$$

et qui conduit aux mêmes résultats.

1.2.3.2 HAUTEUR DU RESSAUT :

La hauteur du ressaut a été définie comme étant égale à :

$$h = h_2^* - h_1^*$$

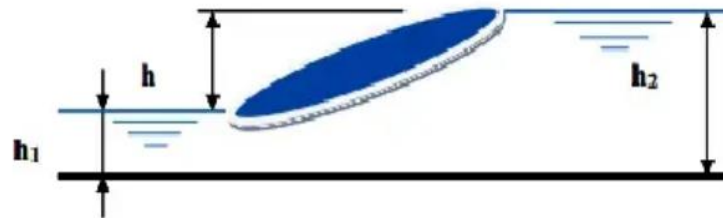
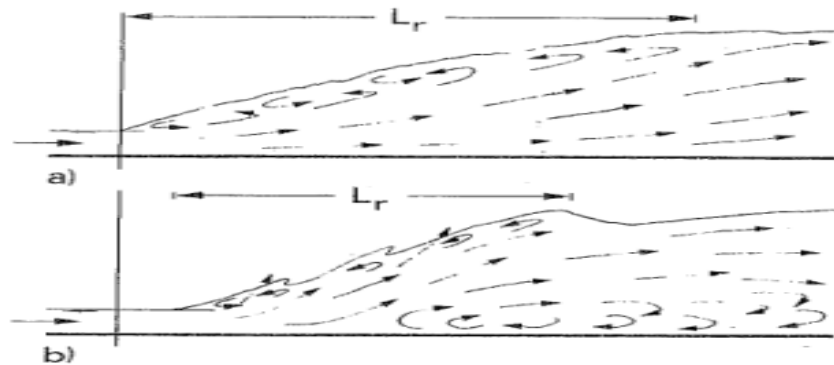


Figure 1-4 Hauteur du ressaut

1.2.3.3 LONGUEUR DU ROULEAU DE SURFACE :

En 1990 Hager et al définissent deux types de longueur du rouleau tous dépendant de la forme du ressaut étudié. En effet, ils ont introduit la notion de

longueur du rouleau développé et non développé. La figure-1.6 illustre ces deux types du ressaut et les longueurs L_r qui correspondent.



*Figure 1-5 Configuration du ressaut hydraulique. a) rouleau de surface développé.
b) rouleau de surface non développé*

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

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

Les essais effectués par Hager et al. (1990) indique que, pour le cas du ressaut classique, le rapport $\lambda_r^* = L_r^* / h_1$ dépend du nombre de Froude Fr_1 et du rapport d'aspect $w = h_1/b$.

Les auteurs proposent les relations suivantes:

$$\lambda_r^* = -12 + 160 \tanh\left(\frac{F_1}{20}\right) \quad \text{Avec} \quad w = \frac{h_1}{b} < 0.1 \quad \text{-----} > (1.9)$$

$$\lambda_r^* = -12 + 100 \tanh\left(\frac{F_1}{12.5}\right) \quad \text{Avec} \quad 0.1 < w < 0.7 \quad \text{-----} > (1.10)$$

Les auteurs montrent que pour le nombre de Froude inférieur à 8, les relations (1.9) et (1.10) pourront être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

$$\lambda_r^* = \frac{L_j^*}{h_1} = 8(F_1 - 1.5) \quad 2.5 < F_1 < 8 \quad \text{-----> (1.11)}$$

1.2.4 LE RENDEMENT DU RESSAUT HYDRAULIQUE

Une importante dissipation d'énergie mécanique est provoquée par le ressaut ; ce phénomène est irréversible. Les caractéristiques de la turbulence sont très complexes et dépendent fortement des conditions à l'amont.

La figure-1.7 montre la ligne de charge totale le long de la longueur L_j sur laquelle s'étend le ressaut classique.

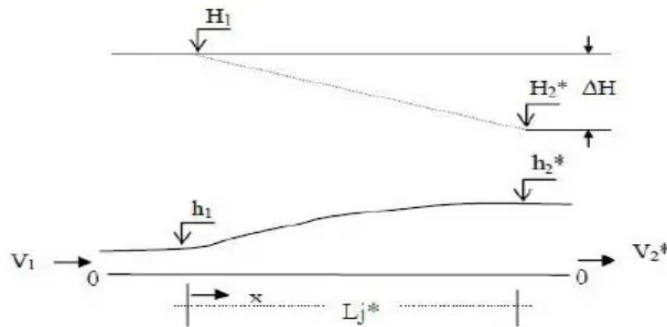


Figure 1-6 Ligne de charge totale le long du ressaut classique

Le cas du canal de forme rectangulaire :

$$\eta^* = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad \text{-----> (1.12)}$$

La relation (1.12) permet le calcul du rendement η^* , **Sinniger et Hager (1986)** présentent une expression approximative, qui s'applique pour $F_1 > 2$:

$$\eta^* = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2 \quad \text{-----> (1.13)}$$

Les deux relations (2.9) et (2.10) sont montrées dans la figure -1.8.

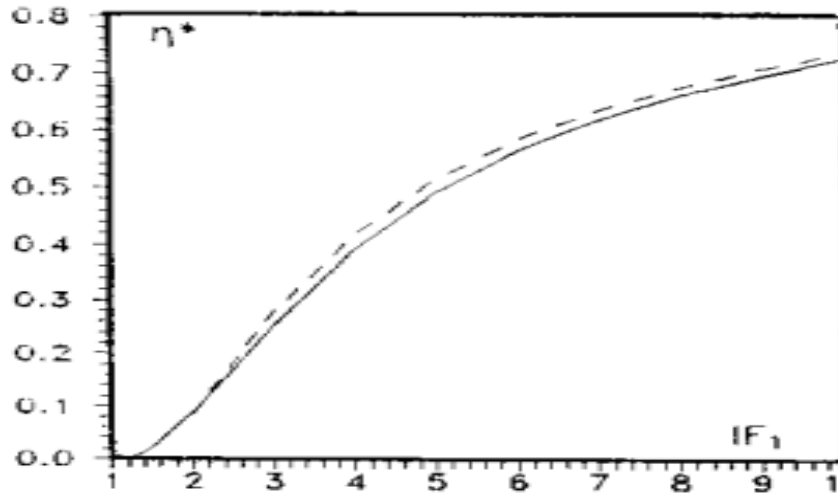


Figure 1- 7 le Rendement η^ du ressaut classique qui varie en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbe tracée selon la relation (1.12). (---) Courbe tracée selon la relation (1.13)*

La figure ci-dessus indique que le rendement η^* du ressaut classique dépasse à 50% pour $F_1 \geq 5,1$ et que les rendements calculés à partir de la relation (1.13) dépassent légèrement à ceux obtenus par la relation (1.12) d'autre part, l'écart maximum remarqué peut aboutir à 2%.

1.3 RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT EN CANAL RECTANGULAIRE AVEC FOND RUGUEUX

1.3.1 L'APPROCHE DE RAJARATNAM (1968)

1.3.1.1 LE PROTOCOL D'EXPERIMENTATION

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

Trente-trois expériences ont été effectuées. Les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique ont été mesurées. D'après l'auteur **Rajaratnam** (1968), les

mesures de rouleau de surface sont très crédibles, alors que les mesures de la longueur du ressaut hydraulique sont moins fiables.

1.3.1.2 DISCUSSION DES RESULTATS

1.3.1.2.1. LA HAUTEUR CARACTERISTIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE : H_2

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

$$h_2 = f_1(h_1, U_1, g, \rho, \nu, \varepsilon) \quad \text{-----> (1.14)}$$

Avec ρ qui désigne la masse volumique et ν la viscosité cinématique du liquide. En s'inspirant sur le principe d'analyse adimensionnelle, l'équation (1.14) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_1 \left[F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, R = \frac{U_1 h_1}{\nu}, \frac{\varepsilon}{h_1} \right] \quad \text{-----> (1.15)}$$

Avec Re qui représente le nombre de Reynolds. Lorsque le nombre de Reynolds Re est très élevé, l'effet de la viscosité du liquide est négligé et l'équation (1.15) se réécrit sous la forme suivante :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_3 \left[F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, \frac{\varepsilon}{h_1} \right] \quad \text{-----> (1.16)}$$

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

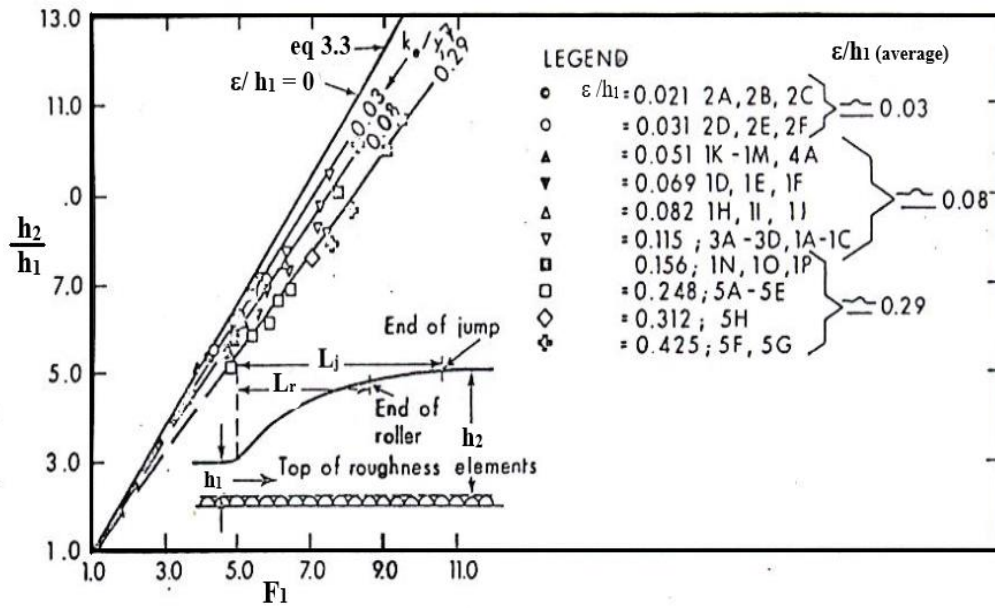


Figure 1-8 Variation de $y = h_2 / h_1$ en fonction de F_1

L'allure de l'équation indiquée dans la Figure-9, peut être considérée comme limite de la rugosité nulle. Trois allures pour trois rugosités relatives sont dessinées, pour $\epsilon/h_1 = 0,03$; 0,08 et 0,29 ; ainsi les équations obtenues par **Rajaratnam** sont les suivantes :

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

$$\frac{h_2}{h_1} = 1.22 F_1 - 0.24 \quad \text{pour} \quad \frac{\epsilon}{h_1} = 0.08 \quad \text{-----> (1.17)}$$

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

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

$$\frac{h_2}{h_1} = 1.41 F_1 - 0.5 \quad \text{-----> (1.18)}$$

Selon **Rajaratnam**, en éliminant les constantes des équations (1.17) et (1.18), l'erreur n'étant pas considérable pour les nombres de Froude important, l'équation pourrait être réécrite comme suit :

$$\frac{h_2}{h_2^*} = \lambda \left[\frac{\varepsilon}{h_1} \right] \quad \text{-----} > (1.19)$$

Avec λ qui varie en fonction de la rugosité relative. Pour les différentes valeurs de ε/h_1 dans l'équation (2.14), λ devient égal respectivement à 0,92 ; 0,864 et 0,78. Les résultats obtenus sont injectés dans la Figure-1.10 montrent la variation de h_2/h_2^* en fonction de ε/h_1 et une courbe moyenne peut être tracée comme le premier résultat. Les différentes valeurs indiquées auparavant sont montrées également sur la Figure-1.10.

La croissance de la rugosité relative, donne lieu à une réduction de h_2/h_1^* . la rugosité varie de $\varepsilon/h_1 = 0$ jusqu' à environ 0,783. En conséquence, la réduction de la hauteur h_2 est remarquable comparée à celle classique.

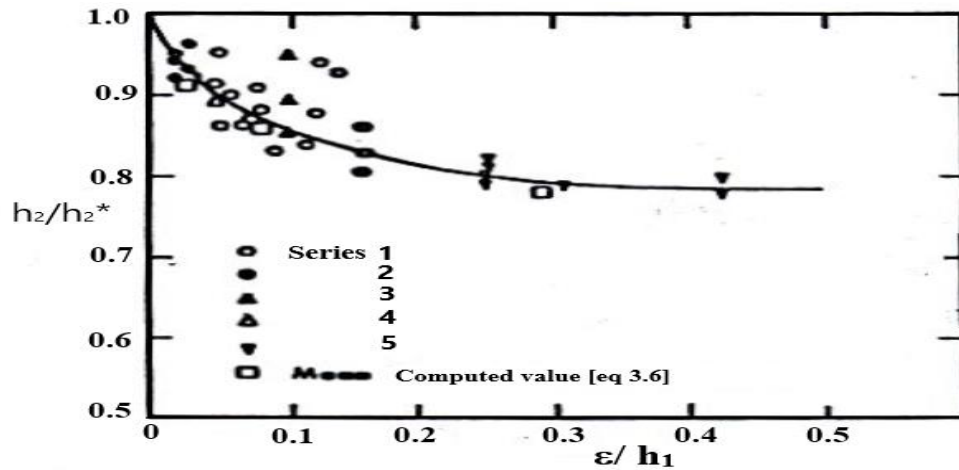


Figure 1-9 Variation de h_2/h_2^ en fonction de ε/h_1*

1.3.1.2.2. LA LONGUEUR DU ROULEAU DE SURFACE

Les mesures expérimentales de la longueur du rouleau de surface sont indiquées dans la Figure-1.11, a) comparées avec la courbe du ressaut classique. On constate que la rugosité relative ε/h_1 dépasse 0,05, la longueur du rouleau du surface avec le lit rugueux est moindre comparée avec son homologue lisse.

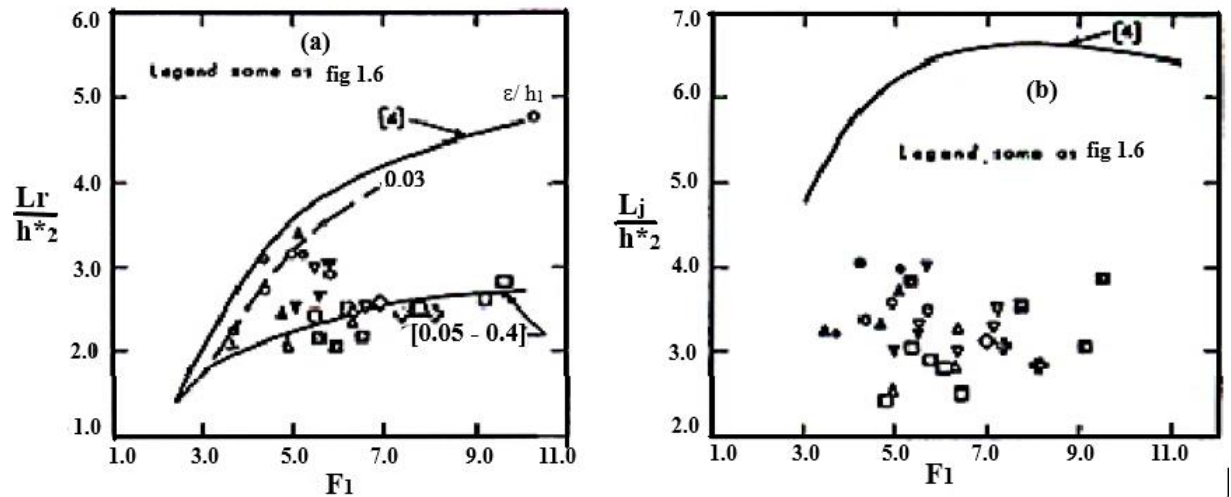


Figure 1-10 la Variation de la longueur relative des caractéristiques du ressaut : (a) L_r/h_2^* en fonction de F_1 ; (b) L_j/h_2^* en fonction de F_1

1.4 LE RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT EN CANAL RECTANGULAIRE AVEC LIT ONDULE

1.4.1 L'APPROCHE DE RAJARATNAM (2002)

1.4.1.1 LE PROTOCOL EXPERIMENTAL

L'expérimentation a été réalisée dans un canal de 0.446 m de largeur, 0.60m de profondeur et de longueur de 7.6 m avec les côtés du canal en plexiglas. La rugosité sous forme ondulation imposée au fond du canal est sous la forme du métal en aluminium (Figure-12). Le fond rugueux provoque des turbulences. La distance "s" séparant deux rugosités d'ondulation métalliques sinusoïdales est égale à 68 mm, et l'épaisseur "t" est de 13 à 22mm. L'écoulement de l'eau dans le canal s'effectue par le moyen des trois pompes, et les débits sont mesurés par un débitmètre. Un écoulement torrentiel est produit avec une profondeur h_1 . Afin de contrôler la profondeur dans la partie amont de l'écoulement dans le canal, on utilise l'obstacle.

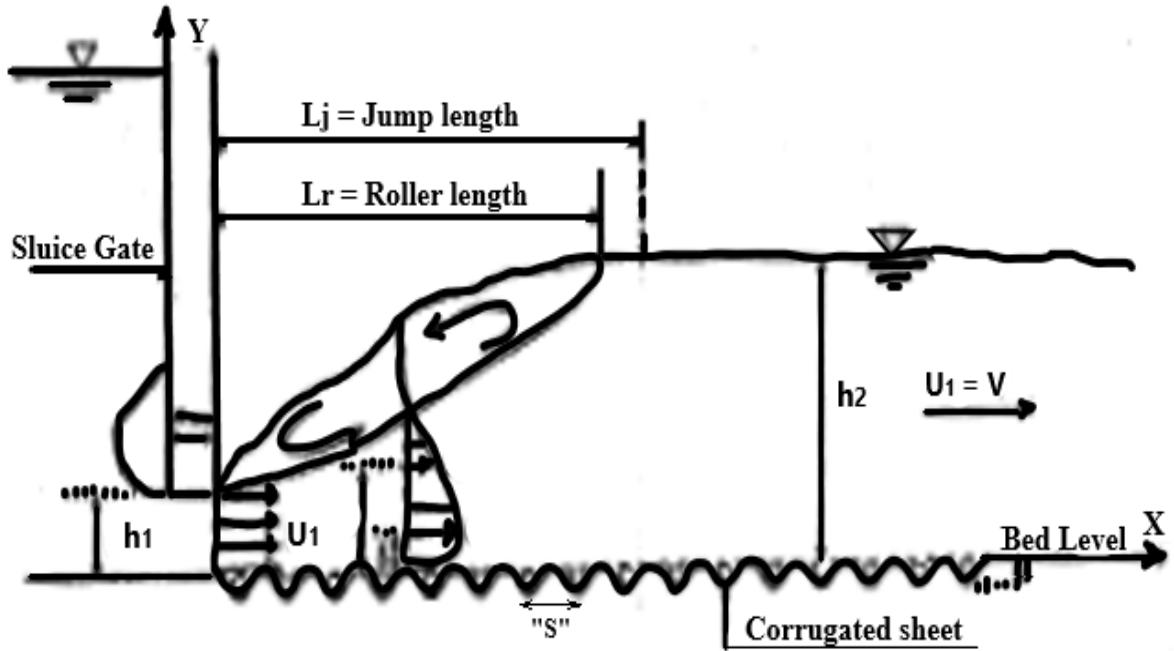


Figure 1-11 Configuration du ressaut hydraulique avec lit ondulé

Pour la mesure du temps des vitesses longitudinales. Un tube de Prandtl de diamètre de 3.0 mm, a été connecté au manomètre vertical. Les différentes configurations de vitesse sont réalisées pour plusieurs sections verticales à l'intérieur du ressaut, exactement 1 au-dessus des crêtes de l'ondulation des rugosités. Le nombre de Reynolds $Re = \frac{U_1 \times h_1}{\nu}$ est situé entre 50800 et 206756. Différentes valeurs de l'ondulation sous forme des rugosités relatives, qui sont définies comme le rapport entre l'épaisseur de l'ondulation "t" et de la profondeur h1 de valeurs 0,50 ; 0,43 et 0,25 sont testées expérimentalement.

La profondeur relative aval est définie comme suit

$$y_2^* = \frac{h_2^*}{h_1}$$

Elle est formulée par l'équation de Belanger pour un canal rectangulaire avec lit lisse :

$$\frac{h_2^*}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \text{ -----> (1.20)}$$

1.4.1.2 DISCUSSION DES RESULTATS

Les différentes configurations du ressaut hydraulique avec lit ondulé pour différentes expérimentations sont réalisées et indiquées dans la Figure (13.a), avec précision des mesures de 0,01mm. Ces configurations de surfaces nous permettent la détermination de la profondeur h_2 à l'aval de la surface du ressaut hydraulique avec le rapport $\frac{[h(x)-h_1]}{(h_2-h_1)}$ varie en fonction de $\frac{x}{L_j}$, telle que : $h(x)$ est la profondeur de l'écoulement pour la section x .

La Figure ci-dessous (13.b) illustre également les différentes configurations de surface du ressaut hydraulique qui sont presque identiques et peuvent être représentés par une seule courbe moyenne.

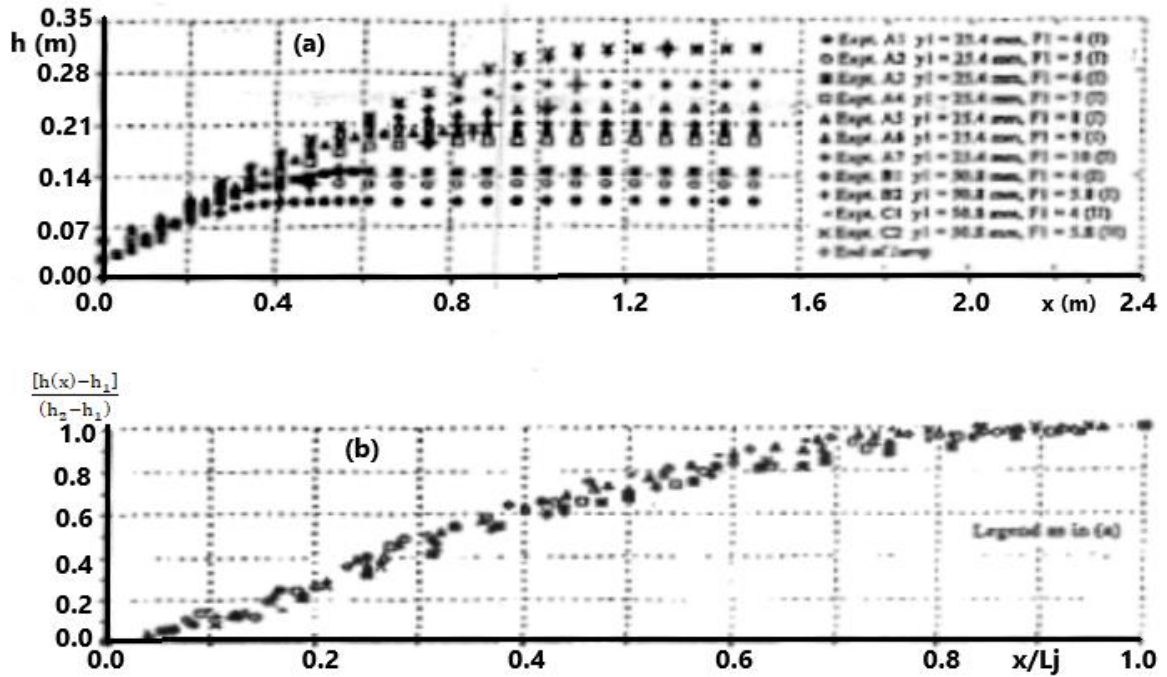


Figure 1-12 (a) configuration de surface du ressaut hydraulique ; (b) Profil généralisé de surface du ressaut hydraulique

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

$$h_2 = f_1(h_1, U_1, g, \rho, \nu, t) \quad \text{-----> (1.21)}$$

Avec : ρ (kg.m^{-3}) : Masse volumique du liquide et ν ($\text{m}^2. \text{S}^{-1}$) : viscosité cinématique du liquide. La relation (2.18) peut être aussi réécrite comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_1 \left[F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, R = \frac{U_1 h_1}{\nu}, \frac{t}{h_1} \right] \quad \text{-----> (1.22)}$$

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

$$\frac{h_2}{h_1} = f_3 \left[F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, \frac{t}{h_1} \right] \quad \text{-----> (1.23)}$$

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

L'approche (1.20) est aussi indiquée dans la même configuration. La Figure-14 illustre clairement que la rugosité relative $\frac{t}{h_1}$ n'a pas un effet important sur le rapport $\frac{h_2}{h_1}$.

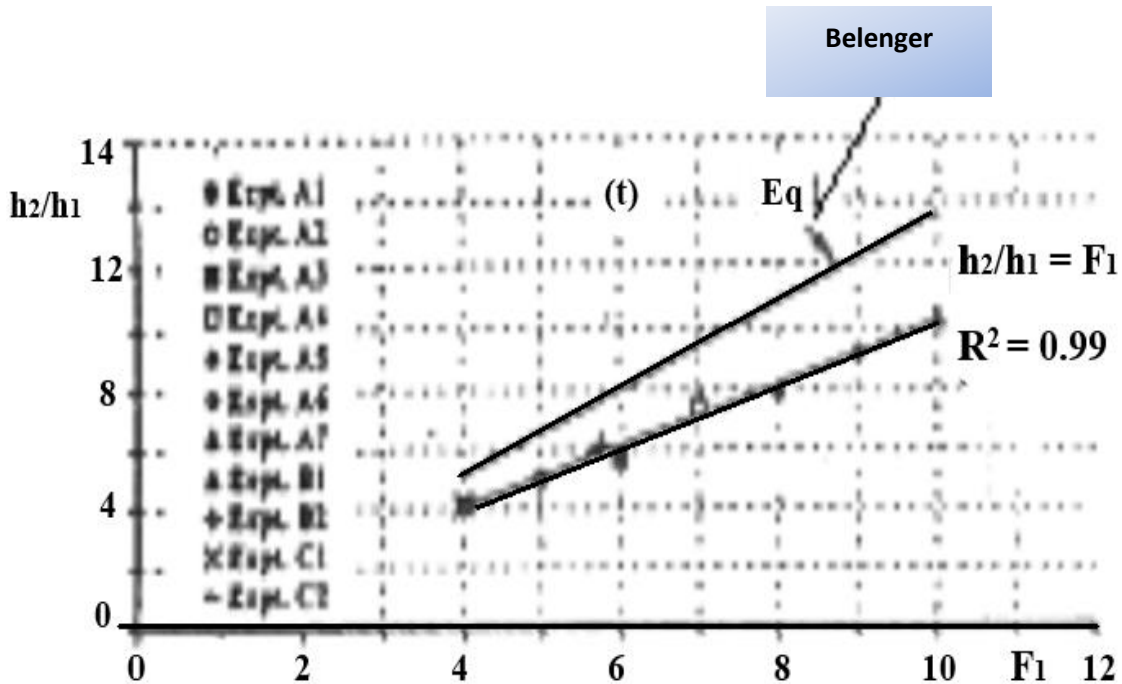


Figure 1-13 Variation de h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

L'auteur a constaté que le rapport des caractéristiques conjuguées $\frac{h_2}{h_1}$ est approximativement égal au nombre de Froude incident F_1 . D'après Hence la relation (2.20) peut être reformulée comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} \cong F_1 (R^2 = 0.99) \quad \text{-----> (1.24)}$$

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

$$\frac{h_2^*}{h_1} = \sqrt{2}F_1 - 1 \cong \sqrt{2}F_1 \quad \text{-----> (1.25)}$$

Les différentes caractéristiques du ressaut hydrauliques classiques mesurées expérimentalement sont indiquées dans la Figure-15.a. le rapport L_r/h_2^* est au voisinage de 2,6.

La variation de la longueur relative du rouleau de surface du ressaut hydraulique est montrée dans la Figure-15.b en fonction du nombre de Froude incident F_1 . Il a été constaté que L_r/h_2^* , est égal 3,0. Il a été constaté également que la longueur du ressaut avec un fond ondulé est égal la moitié de son homologue classique.

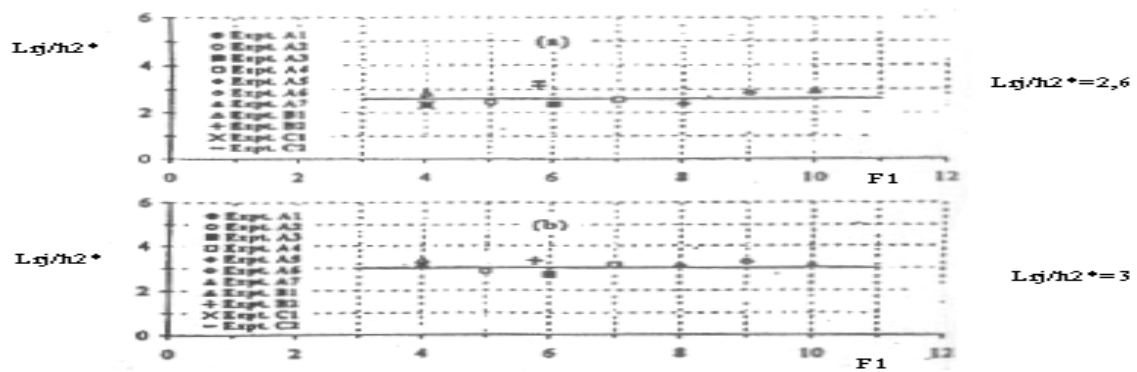


Figure 1-14 Configuration de la longueur relative du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude F_1 . (a) du rouleau de surface ; (b) du ressaut

1.5 CONCLUSION

Les résultats obtenus, qui se rapproches de notre thème, des écoulements brusquement variés (ressaut hydraulique), nous ont aidé à obtenir des idées sur notre sujet de recherche.

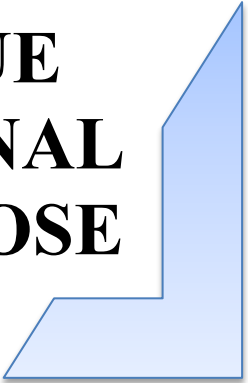
Pour le premier chapitre d'intitulé le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire, à travers lequel on l'a divisé en trois axes :

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

Chapitre 2



RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE COMPOSE



2.1 INTRODUCTION

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

Ce deuxième chapitre de cette mémoire est subdivisé en deux parties

- les travaux de **Khattoui** et , en 2012 liés avec le ressaut hydraulique formé en canal rectangulaire de forme composée..
- les travaux de ‘F. Riguet et al 2019‘. Qui se basent purement à l'expérimentation faite au niveau du laboratoire (LARHYSS), ils ont constaté que l'effet des ouvertures h_1 sur la variation du rapport Y du ressaut hydraulique qui varie en fonction du nombre de Froude incident F_1 est remarquable.

2.2 CARACTERISTIQUE DE L'ÉCOULEMENT EN LIT COMPOSE

Les écoulements en lit composé sont caractérisés par une forte interaction entre, d'une part, l'écoulement rapide et profond du lit mineur et, d'autre part, l'écoulement relativement lent et peu profond du lit majeur. Il en résulte un transfert de quantité de mouvement entre les deux lits, associé à la formation de structures turbulentes à l'interface les séparant. Dissipant une partie de l'énergie de l'écoulement, cette interaction modifie la capacité d'écoulement des deux lits et celle du lit composé **Proust (2005)**.

La complexité des processus physiques en jeu est renforcée par le fait que l'interaction turbulente entre lits dépend à la fois de la géométrie composée et des paramètres hydrauliques (débit total, hauteur relative de débordement – i.e. rapport entre la hauteur d'eau dans le lit majeur et celle dans le lit mineur) Proust, (2005)

2.3 L'AVANTAGE DES CANAUX DE TYPE COMPOSE

Remarques sur quelques avantages de ce type de canaux :

- Augmentation de la capacité pour absorber le débit de la crue, résultant de l'écoulement sur les talus ou lits majeurs.
- Bon transfert des sédiments dans le cas des écoulements faibles, et aussi la capacité d'absorber des débits importants en cas des crues
- Augmentation de la dissipation d'énergie suite à l'interaction entre les eaux d'eaux de différentes profondeurs .
- Facilité de maintenance lorsque l'écoulement dans le canal principal

2.4 APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR 2012

2.4.1 LE RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE COMPOSE

Selon les notes étudiées, nous pouvons obtenir de très bons résultats en utilisant un lit composé par le phénomène du ressaut hydraulique et ceci en observant l'évolution du phénomène (D'après les travaux de **Khattaoui** et **Achour**, 2012).

2.4.2 LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE :

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

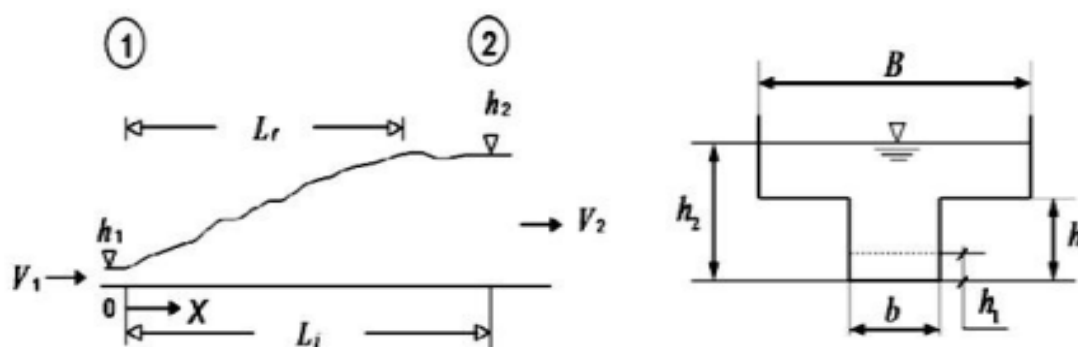


Figure 2-1 Ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée

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

Tenant compte des travaux de *Achour (2000)*, et en utilisant la relation de *Borda-Carnot* et compte tenue l'expression (3.1). Il est logique d'ajouter une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement et qui aura une forme de relation suivante :

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

Une telle expression représente la perte de charge engendré par le transfert quantité de mouvement et de la masse entre le lit mineur et celui majeur. les exposants x, y et z sont exprimées par la relation $x + y + z = 3$, le facteur k s'écrit comme suit : $k = \varphi(L, h_1, h_2, h)$. Tenant compte de l'expression de f_x , l'équation de la quantité de mouvement d'Euler se transforme comme suit :

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

Étudions l'équation en prenant compte de cette relation suivante : $f_x = (1/2)\bar{\omega}(h_2 - h)h_1(B - b)$:

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

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

Tenant en considération de ces hypothèses et de la relation de continuité $V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q$, l'expression (2.3) se transforme après réarrangement de la manière suivante :

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

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

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

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

Les deux expressions (3.4) et (3.6) sont deux expressions fonctionnelles de forme

$$\Phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0.$$

Sachant que les deux expressions 3.4 et 3.6 peuvent être formulée sous la forme

$$Y^3 + aY^2 + bY + C = 0.$$

Le changement de variable $Y = x - a/3$, la relation de troisième degré devient alors : $Y^3 + pY + q = 0$ dont la solution se fait facilement par l'utilisation le procédé trigonométrique.

La variation de Y, calculé par l'équation (3.6), en fonction de F_1 est montrée par la figure (3.2). En faisant changer l'une des deux variables, β ou τ , est fixée, la deuxième variable change de pas de 0.2. Les valeurs de F_1 à prendre en considération doivent être strictement supérieure

v à la valeur minimale $F_{1min} = [1/(2\sqrt{2})]\sqrt{(2/\tau + 1)^2 - 1}$ qui correspond à $h_2 = h$, dans le but que le ressaut se produise nécessairement dans le canal de forme composée ($h_2 > h$) On constate qu'à partir de ces deux figures montrées ci-dessous, que pour un β et τ fixées, Y s'accroît avec l'augmentation de F_1 . Lorsque les valeurs de β seront importantes, l'augmentation du rapport Y en fonction de F_1 sera aussi plus rapide. Le rapport Y croît avec l'accroissement de β et diminue avec l'augmentation de τ , Pour un nombre de Froude F_1 fixé,

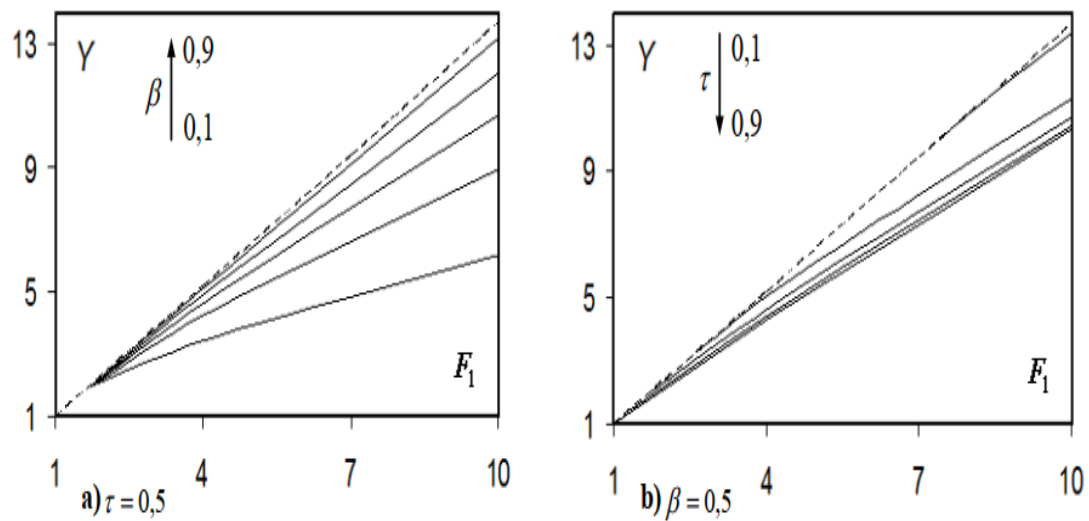


Figure 2-2 le rapport de Y , calculé par (3.4), varie en fonction de F_1 . (— — —) :
 $\beta = 1$

La figure ci-dessus montre la variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude incident F_1 avec $\beta = \tau = 0,5$. on note que les rapports Y calculées selon la relation (2.4) qui tient compte des forces de frottements sont inférieures à celles calculées de la relation (2.6). Cette baisse se constate par l'élévation du nombre de Froude F_1 . La force f_x explique les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

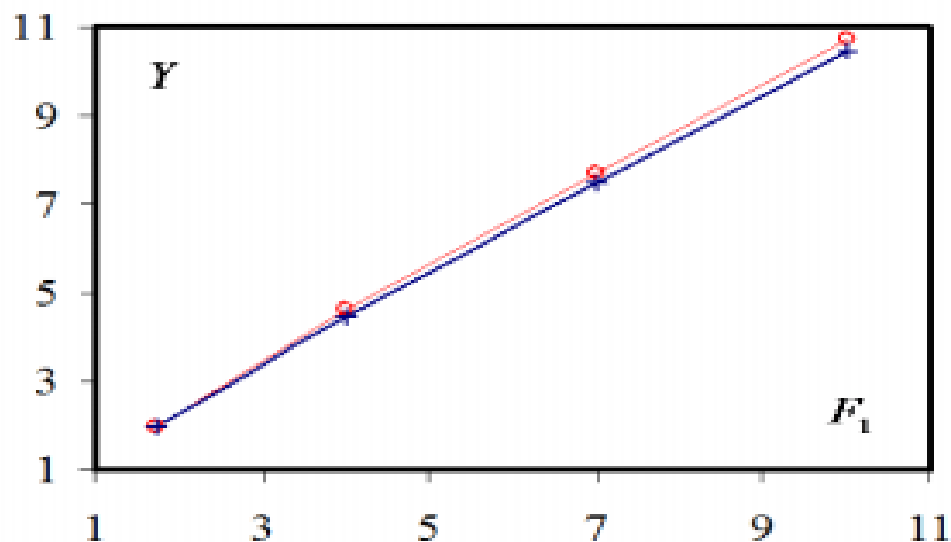


Figure 2-3 le rapport de Y varie en fonction de F_1 . (o) : expression (2.6),
(+):expression (2.4).

2.4.3 LE RENDEMENT DU RESSAUT HYDRAULIQUE :

Expression du rendement $\eta = \Delta H/H_1$, (en tenant compte des mêmes suppositions que pour le rapport des Y).

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

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

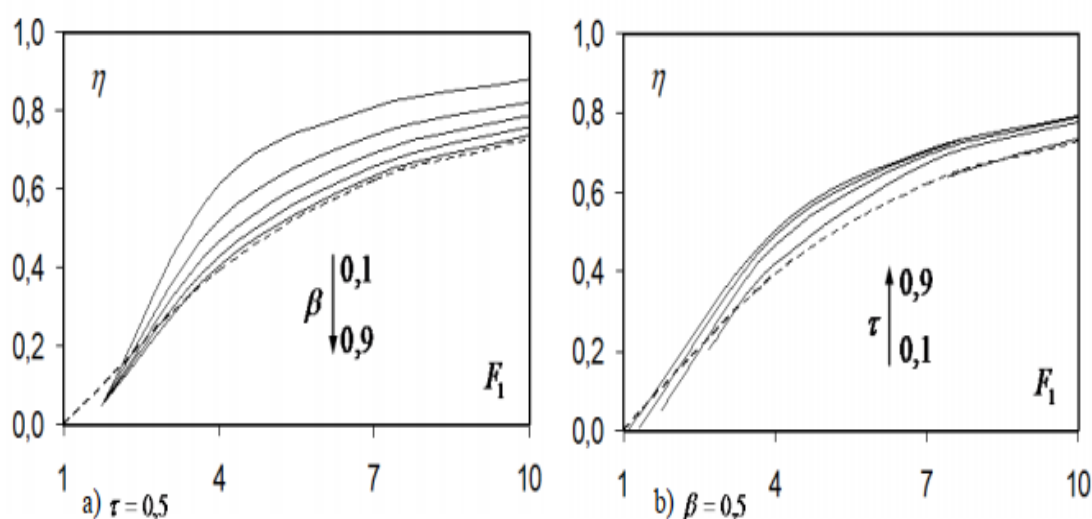


Figure 2-4 Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 .

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

La présentation du rendement η qui varie en fonction du nombre de Froude F_1 pour $\beta = \tau = 0.5$ est mentionnée dans la figure-2.5. Il est remarqué que les rendements η calculées en tenant compte de la force de frottement dépassent à ceux calculées sans frottements.

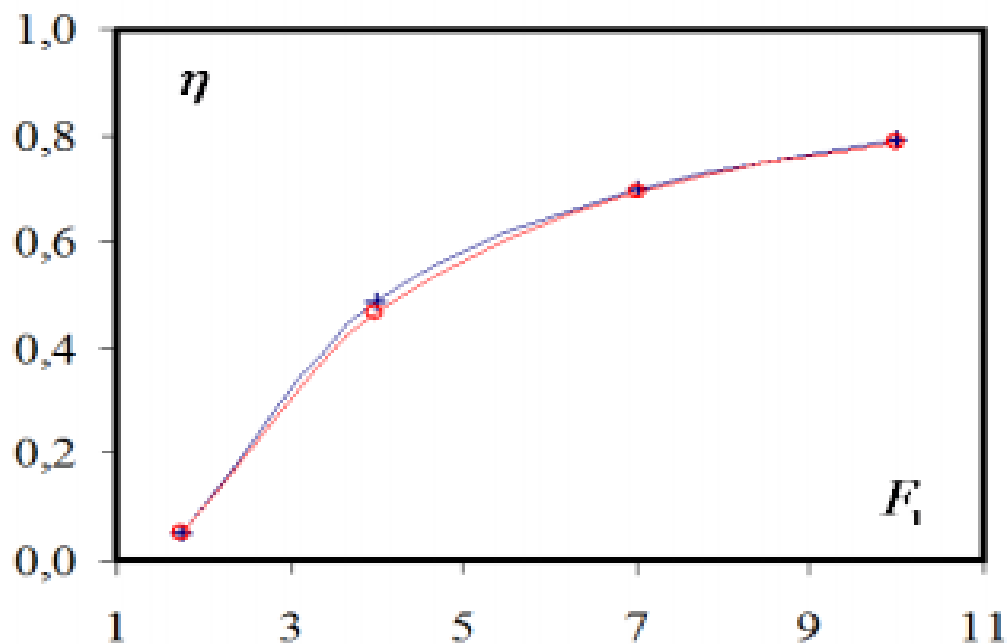


Figure 2-5 Variation de η en fonction de F_1 . (o) : équation (2.7), avec frottement.

2.5 L'ETUDE EXPERIMENTALE DES CARACTRISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSEE

2.5.1 LA PROBLEMATIQUE

Les différents modes de configurations du ressaut hydrauliques peuvent être présentées, soit par la variation des conditions à l'amont à savoir les débits, les hauteurs etc. ; Quant à l'aval comme le type d'obstacle, sa position, etc. Le ressaut s'appelle classique quand il se forme dans un canal rectangulaire de pente nulle ou faible, sans obstacle à l'aval. On le nomme contrôlé quand sa création est conditionnée par un obstacle mis à l'aval de l'écoulement. Il s'appelle t forcé quand il se crée de part et d'autre de

RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE COMPOSE

l'obstacle. L'évolution du ressaut hydraulique peut être formée dans des canaux non prismatiques ou prismatiques, avec lit rugueux ou lisse. il s'agit pour notre cas le ressaut hydraulique formé par seuil mince évoluant dans un canal de forme composée avec des différentes ouvertures h_1 (Figure-2.7). Pour une ouverture initiale h_1 donné, l'évolution du débit engendre le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation aussi de la longueur de rouleau de surface L_r . La distance Δx sur laquelle le ressaut se forme augmente aussi et pour rendre celui-ci dans sa position initiale, environ à 5 cm de la sortie du convergent, le premier seuil de hauteur s doit être augmenté. Par conséquent pour chaque nombre de Froude incident F_1 , correspond la longueur du ressaut L_j et une longueur du rouleau de surface L_r , ainsi pour une hauteur h_2 à l'aval du ressaut hydraulique et une hauteur du seuil s (Figure-2.6).

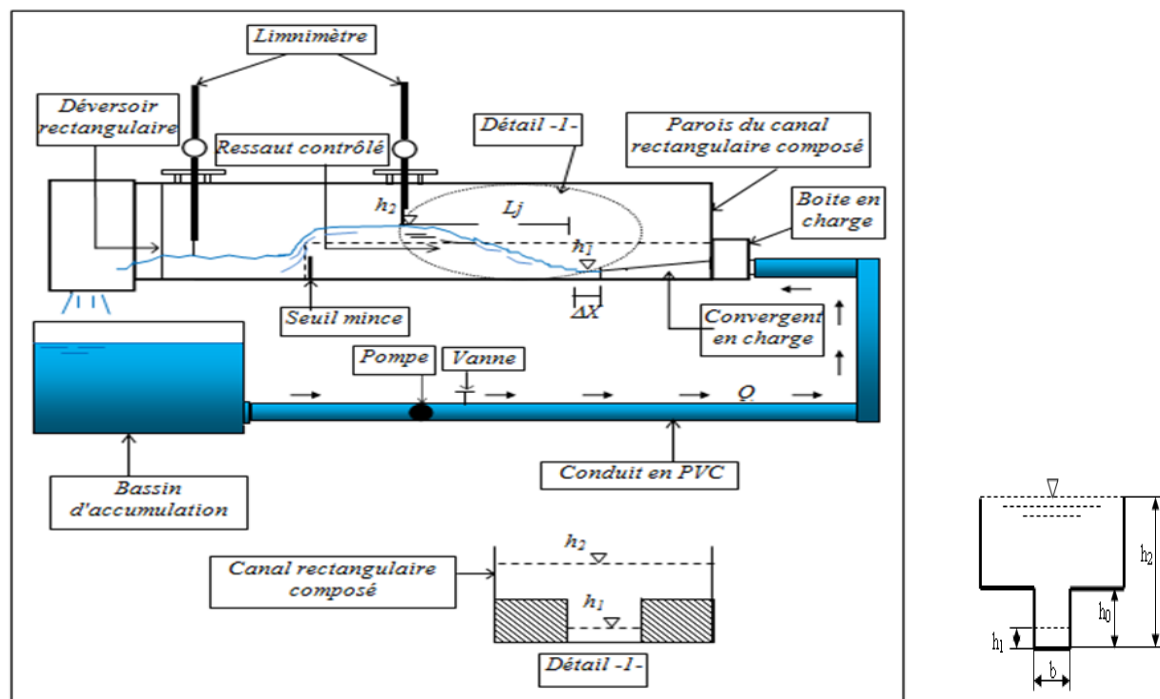


Figure 2-6 Configuration du ressaut contrôlé par un seuil mince en canal rectangulaire de forme composée.

2.5.2 ANALYSE DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

Dans chacune des mesures expérimentales faites au laboratoire intervient le phénomène de ressaut hydraulique formé (résultats fiables) et ce sont les caractéristiques obtenues dont : la hauteur amont h_1 , le débit d'écoulement Q , la hauteur du seuil mince s , la

RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE COMPOSE

hauteur aval h_2 . Ces mesures permettent de composer les produits adimensionnels tel que : le rapport des profondeurs $Y = h_2/h_1$ et le nombre de Froude F_1 :

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

Une fois le profil du ressaut se forme, nous réalisons, pour une hauteur amont h_1 et une position x de seuil données, les étapes suivantes sont :

- la mesure de la hauteur déversant H_{dev} se détermine par le déversoir rectangulaire.
- la détermination du débit spécifique en appliquant la relation du débitmètre rectangulaire (**Hachemi Rachedi** L.2006) :

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

OU :

Q : le débit volumique en (m^3/s).

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

b : l'échancrure du canal (m).

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

g : l'accélération gravitationnelle (m/s^2).

H_{dev} : La lame déversant en (m).

- le nombre de Froude se Calcule, par application de l'expression (2.8).
- la lecture de la hauteur aval h_2 du ressaut hydraulique.



Figure 2-7 Photographie du canal ayant servi à l'expérimentation.

2.5.3 RESULTATS EXPERIMENTAUX(travaux de Riguet et al,2019)

2.5.3.1 RAPPORT DES HAUTEURS CONJUGUEES

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

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

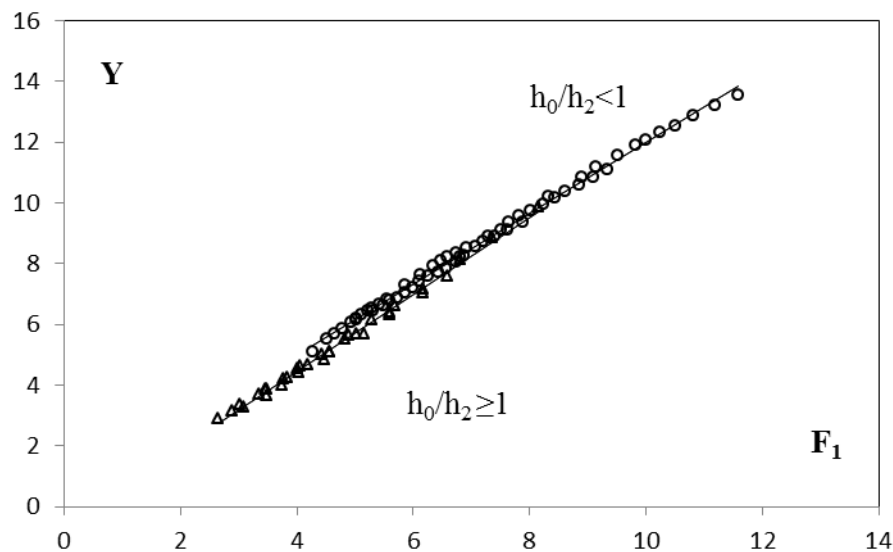


Figure 2-8 le rapport des hauteurs conjuguées Y varie en fonction de Froude F_1 pour le canal composée. (o) Les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustements.

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

$$\text{Pour } h_0/h_2 \geq 1 \text{ et } 2.64 < F_1 < 8.14 \quad Y = 1,258 F_1 - 0,573 \quad \text{-----}>$$

(2.10)

$$\text{Pour } h_0/h_2 < 1 \text{ et } 4.27 < F_1 < 11.58 \quad Y = 1,165 F_1 + 0,328 \quad \text{-----}>$$

(2.11)

2.5.4 LES CARACTERISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE

2.5.4.1 LA LONGUEUR RELATIVE L_j/h_1 DU RESSAUT VARIE EN FONCTION DU NOMBRE DE FROUDE F_1

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

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

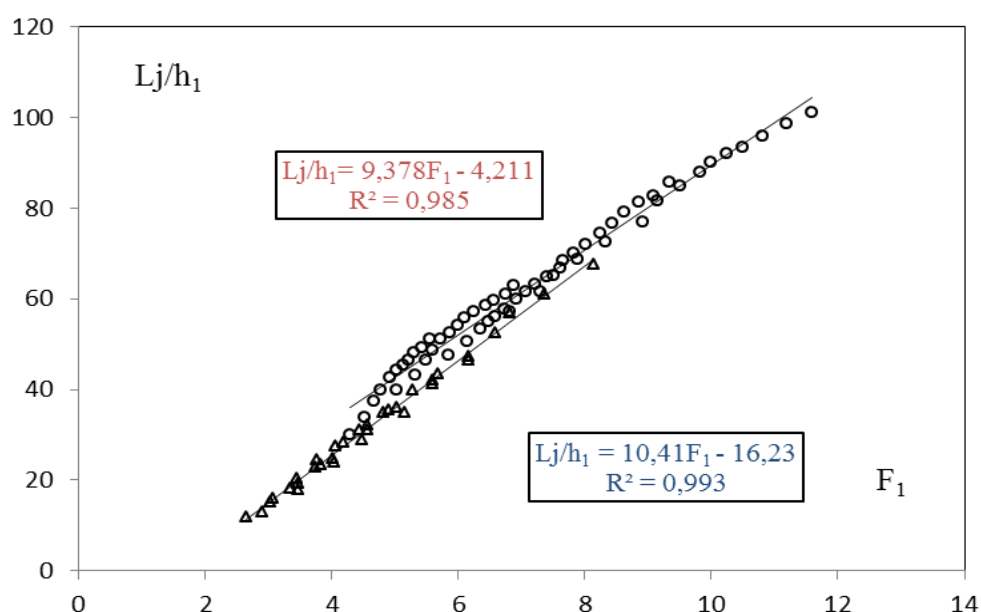


Figure 2-9 la représentation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude F_1 , (o) Les mesures expérimentales pour un lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour un lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.

Pour le lit mineur $h_0/h_2 \geq 1$: $L_j/h_1 = 10,41F_1 - 16,23$

$$R^2 = 0,993$$

Pour le lit majeur $h_0/h_2 < 1$: $L_j/h_1 = 9,378F_1 - 4,211$,

$$R^2 = 0,985$$

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

2.5.4.2 LA LONGUEUR RELATIVE L_r/h_1 DU ROULEAU DE SURFACE VARIE EN FONCTION DU NOMBRE DE FROUDE F_1 .

La caractéristique L_r est la distance séparant la section en amont du ressaut à celle de l'aval du rouleau de surface.

La variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 est montrée par la figure-2.10.

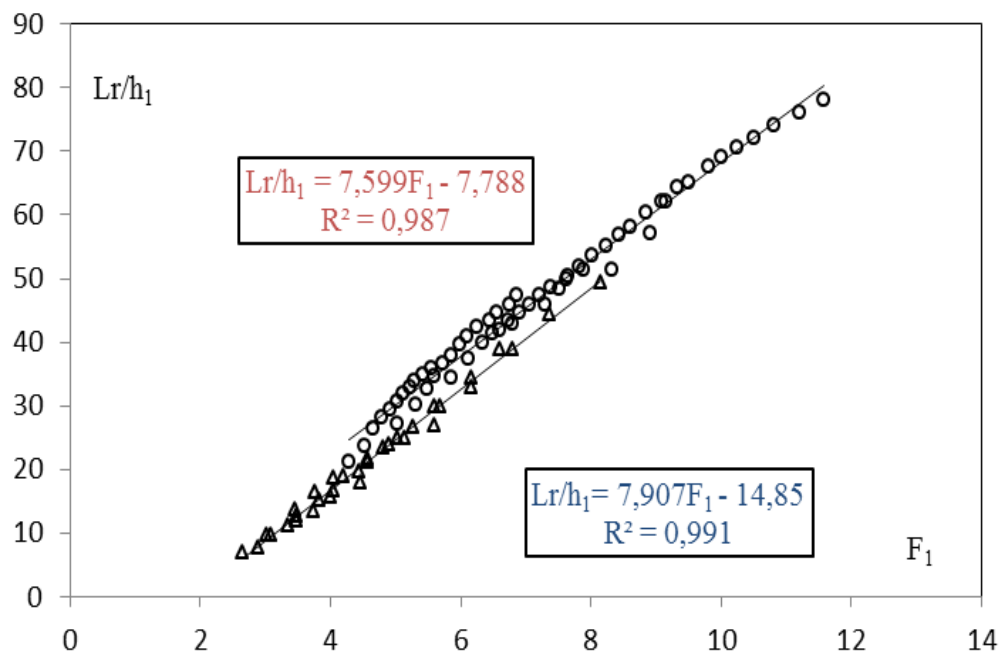


Figure 2-10 représentation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude F_1 , (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur.

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

2.6 CONCLUSION

A travers ce deuxième chapitre de la première partie bibliographique nous avons cité les travaux en premier lieu les travaux de Khattoui et Achour en 2012 liée avec le ressaut hydraulique formé en canal rectangulaire de forme composée. Cette relation fonctionnelle est de forme $\phi(Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$ sans tenir compte des forces de frottements. Une 2eme relation a été exposée y compris les forces de frottements. L'approche globale est déduite par le développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie.

En second lieu, et à partir des mesures expérimentales obtenues au niveau du laboratoire (LARHYSS), on constate que l'effet des ouvertures h_1 sur la variation du rapport Y du ressaut hydraulique qui varie en fonction du nombre de Froude incident F_1 est remarquable.

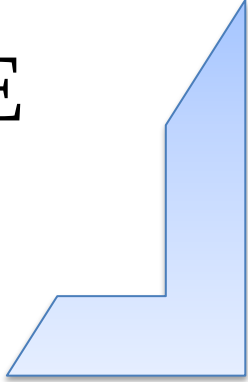
L'étude s'est intéressée, ensuite à la variation de rapport Y qui varie en fonction du nombre de Froude F_1 pour différentes ouvertures des deux lits du canal rectangulaire de forme composée. On constate que ce rapport Y s'accroît avec l'augmentation du nombre de Froude F_1 , et que pour un nombre de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

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

Chapitre 3



DEROULEMENT DE L'EXPERIENCE



3.1 INTRODUCTION

L'étude de ce chapitre sera consacrée principalement sur les résultats du modèle d'expérimentation dépendant du bon fonctionnement des appareils de mesure tel que (la pompe, limnimétrie,.....).

3.2 POSITION DU PROBLEME

Pour créer différentes configurations de ressaut il faut modifier les conditions de l'amont (débit, hauteurs,...etc.) et de l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur, ...etc.),

Le ressaut classique se forme dans un canal rectangulaire de pente faible ou nulle, sans obstacle à l'aval. Il est dit contrôlé lorsque sa formation est conditionnée par la mise en place d'un obstacle à l'aval de l'écoulement. Il est dit forcé lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle. Le ressaut hydraulique peut évoluer dans des canaux prismatiques ou non prismatiques, à fond lisse ou rugueux.

Dans notre cas il s'agit d'un ressaut contrôlé par seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux pour différentes ouvertures h_1 (**photographie 1**) et différentes rugosités testées.

En effet, Pour une hauteur initiale h_1 fixe, plusieurs mesures expérimentales par les différentes hauteurs de seuil et la variation de la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$ ont été obtenues.

Les caractéristiques hydrauliques et géométriques s'intéressant à la présente étude expérimentale sont : le débit volume Q , la hauteur h_1 de l'écoulement incident, la hauteur finale h_2 du ressaut et la rugosité absolue ε **imposée** au lit majeur du canal. En outre, l'attention est portée sur l'évolution des paramètres adimensionnels suivants :

- Le nombre de Froude F_1 tel que : $F_1^2 = Q^2 / (gb^2 h_1^3)$ (3.1)
- le rapport L_j/h_1 de la longueur de ressaut et la hauteur h_1 .
- le rapport L_r/h_1 de la longueur de rouleau et la hauteur h_1 .
- le rendement du ressaut hydraulique.
- le rapport S/h_1 de la hauteur de seuil et la hauteur h_1 .

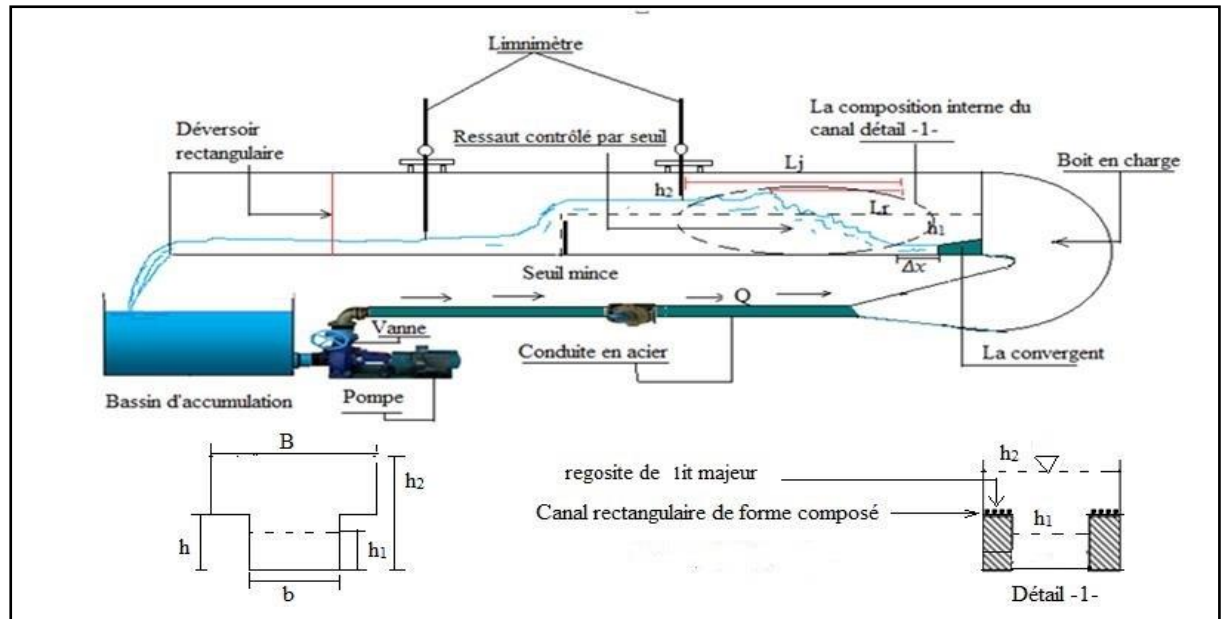


Figure 3-1 Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince en canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux.



Figure 3-2 Photographie du canal ayant servi à l'expérimentation

3.3 DESCRIPTION DES ESSAIS

3.3.1 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE DES ESSAIS

La mise en expérience s'intéresse au ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince dans un canal rectangulaire de forme composée avec lit majeur rugueux.

L'étude expérimentale a été menée sous cinq hauteurs initiales de l'écoulement : $h_1(\text{cm}) = 2; 2.5; 3; 3.5 \text{ et } 4$ ont été expérimentées. Quatre rugosités testées de valeurs absolues : $\varepsilon(\text{mm}) = 06; 08; 10 \text{ et } 12\text{mm}$.

La formation du ressaut contrôlé est conditionnée par la mise en place d'un seuil à l'aval de l'écoulement. Des différents seuils avec différentes hauteurs ont été testés (8 cm au 21cm) pour la formation et le contrôle du ressaut.

Ainsi après l'obtention d'une configuration du ressaut contrôlé, nous effectuons, pour une hauteur initiale h_1 et une position x de seuil fixées, les opérations suivantes :

1. Lecture de la hauteur déversant h_{dev} du déversoir rectangulaire. (Photographie2)
2. Calcul du débit volume correspondant, par application de la relation du débitmètre rectangulaire (*Hachemi, Rachedi L.2006*):

$$Q = 0.3794B\sqrt{2g\beta}(1 + 0.16496\beta^{2.0716})^{3/2}h_{\text{dev}}^{3/2}$$

Avec :

Q : le débit en (m^3/s).

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

b : largeur de l'échancrure(m).

B : la largeur du canal (m).

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

h_{dev} : La hauteur de la lame déversant en (m).

3. Calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par application de la relation (3.1).

4. Mesure de la hauteur finale h_2 du ressaut.



Figure 3-3 Déversoir rectangulaire utilisé aux mesures des lames déversant



Figure 3-4 Photographie d'un tapis rugueux soigneusement collé sur le lit majeur du canal rectangulaire de section composée

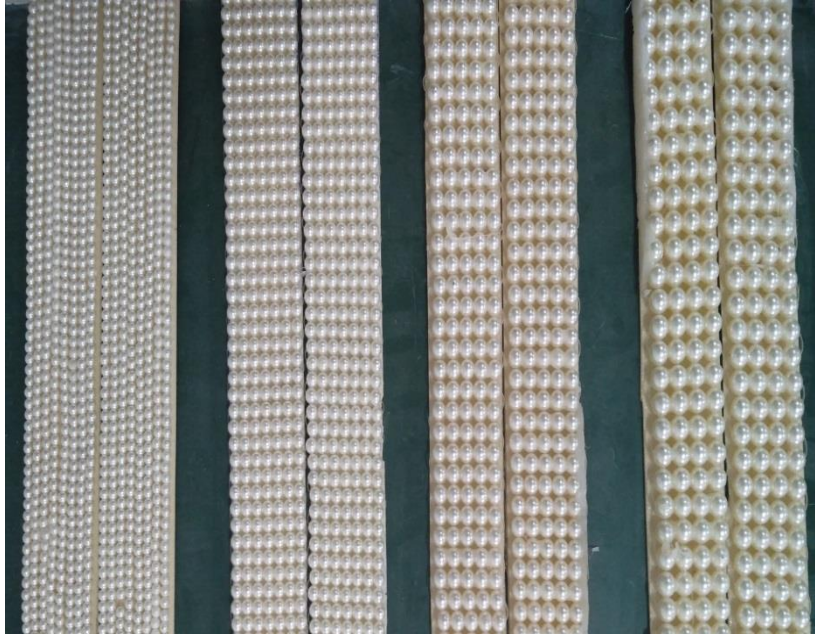


Figure 3-5 Photographie des quatre tapis rugueux : $\varepsilon=06$ mm, $\varepsilon=08$ mm, $\varepsilon=10$ mm

et $\varepsilon=12$ mm

Tableau 3-1 Récapitulation des mesures expérimentales

Paramètres d'entrées (données)						Paramètres de sorties (mesurées)				Paramètres de sorties (Calculées)						
b(m)	B(m)	h_1 (m)	h(m)	ε (mm)	S(m)	h_2 (m)	Lj(m)	Lr(m)	H_dev(cm)	$\beta = 11 / B$	$\varepsilon/(B-b)$	Qd(m ³ /s)	Qc(m ³ /s)	Qd-Qc (m ³ /s)	Fr ²	Fr
0.15	0.25	0.04	0.2	12	0.08	0.205	1.7	1.1	0.187	0.44	0.12	0.01563	0.01689	-0.00126	17.291775	4.158337954
0.15	0.25	0.04	0.2	12	0.085	0.214	1.79	1.15	0.196	0.44	0.12	0.01677	0.01709	-0.00032	19.910536	4.462122402
0.15	0.25	0.04	0.2	12	0.09	0.225	1.89	1.22	0.202	0.44	0.12	0.01755	0.01842	-0.00087	21.795601	4.668575929
0.15	0.25	0.04	0.2	12	0.095	0.231	1.98	1.3	0.207	0.44	0.12	0.01820	0.01869	-0.00049	23.454478	4.842982397
0.15	0.25	0.04	0.2	12	0.19	0.318	2.9	2.05	0.267	0.44	0.12	0.02666	0.02695	-0.00029	50.332503	7.094540371
0.15	0.25	0.04	0.2	12	0.21	0.333	3.02	2.17	0.276	0.44	0.12	0.02802	0.02941	-0.00139	55.595801	7.456259175
0.15	0.25	0.035	0.2	12	0.1	0.221	1.84	1.25	0.186	0.44	0.12	0.01550	0.01616	-0.00065	25.399749	5.039816327
0.15	0.25	0.035	0.2	12	0.11	0.235	1.92	1.29	0.19	0.44	0.12	0.01601	0.01818	-0.00218	27.073935	5.203261997
0.15	0.25	0.035	0.2	12	0.12	0.245	2	1.36	0.196	0.44	0.12	0.01677	0.01845	-0.00168	29.720684	5.451667998
0.15	0.25	0.035	0.2	12	0.13	0.256	2.1	1.41	0.203	0.44	0.12	0.01768	0.01859	-0.00091	33.020124	5.746313945
0.15	0.25	0.03	0.2	12	0.12	0.231	1.79	1.25	0.179	0.44	0.12	0.01464	0.01529	-0.00065	35.949268	5.995770813
0.15	0.25	0.03	0.2	12	0.13	0.243	1.88	1.3	0.181	0.44	0.12	0.01488	0.01580	-0.00091	37.167785	6.096538764
0.15	0.25	0.03	0.2	12	0.14	0.248	1.97	1.36	0.185	0.44	0.12	0.01538	0.01650	-0.00112	39.686805	6.299746441
0.15	0.25	0.03	0.2	12	0.18	0.273	2.33	1.56	0.208	0.44	0.12	0.01833	0.01848	-0.00015	56.405436	7.510355241
0.15	0.25	0.03	0.2	12	0.19	0.279	2.4	1.61	0.212	0.44	0.12	0.01887	0.01887	0.00000	59.722577	7.728038351

DEROULEMENT DE L'EXPERIENCE

0.15	0.25	0.03	0.2	12	0.2	0.285	2.46	1.67	0.216	0.44	0.12	0.01940	0.01942	-0.00002	63.167285	7.947784885
0.15	0.25	0.03	0.2	12	0.21	0.29	2.52	1.73	0.22	0.44	0.12	0.01994	0.02000	-0.00006	66.741966	8.169575646
0.15	0.25	0.025	0.2	12	0.1	0.203	1.69	1.2	0.16	0.44	0.12	0.01237	0.01276	-0.00039	44.364403	6.660660844
0.15	0.25	0.025	0.2	12	0.11	0.208	1.8	1.27	0.168	0.44	0.12	0.01331	0.01370	-0.00039	51.357342	7.166403693
0.15	0.25	0.025	0.2	12	0.12	0.222	1.89	1.37	0.171	0.44	0.12	0.01367	0.01486	-0.00119	54.158051	7.359215353
0.15	0.25	0.025	0.2	12	0.15	0.256	2.14	1.56	0.187	0.44	0.12	0.01563	0.01637	-0.00074	70.827109	8.415884297
0.15	0.25	0.025	0.2	12	0.16	0.261	2.22	1.61	0.191	0.44	0.12	0.01613	0.01686	-0.00073	75.470077	8.687351565
0.15	0.25	0.025	0.2	12	0.17	0.272	2.29	1.66	0.197	0.44	0.12	0.01690	0.01754	-0.00064	82.808205	9.099901377
0.15	0.25	0.025	0.2	12	0.18	0.281	2.36	1.71	0.203	0.44	0.12	0.01768	0.01818	-0.00050	90.60722	9.518782493
0.15	0.25	0.02	0.2	12	0.11	0.214	1.91	1.27	0.16	0.44	0.12	0.01237	0.01316	-0.00079	86.649224	9.308556514
0.15	0.25	0.02	0.2	12	0.12	0.228	2.03	1.36	0.167	0.44	0.12	0.01319	0.01385	-0.00066	98.526747	9.926064034
0.15	0.25	0.02	0.2	12	0.13	0.235	2.14	1.42	0.171	0.44	0.12	0.01367	0.01471	-0.00104	105.77744	10.28481612
0.15	0.25	0.02	0.2	12	0.14	0.245	2.22	1.5	0.176	0.44	0.12	0.01427	0.01502	-0.00074	115.33012	10.73918608
0.15	0.25	0.02	0.2	12	0.15	0.257	2.3	1.57	0.18	0.44	0.12	0.01476	0.01543	-0.00067	123.3736	11.10736705
0.15	0.25	0.02	0.2	12	0.16	0.268	2.38	1.63	0.186	0.44	0.12	0.01550	0.01563	-0.00012	136.12678	11.66733807
0.15	0.25	0.02	0.2	12	0.17	0.276	2.46	1.69	0.189	0.44	0.12	0.01588	0.01592	-0.00004	142.82037	11.95074754
0.15	0.25	0.02	0.2	12	0.18	0.283	2.53	1.75	0.193	0.44	0.12	0.01639	0.01639	-0.00001	152.08159	12.33213668
0.15	0.25	0.02	0.2	12	0.19	0.292	2.6	1.81	0.198	0.44	0.12	0.01703	0.01724	-0.00021	164.21027	12.81445532
0.15	0.25	0.02	0.2	12	0.2	0.298	2.65	1.87	0.201	0.44	0.12	0.01742	0.01818	-0.00077	171.78803	13.10679334
0.15	0.25	0.04	0.2	10	0.095	0.236	1.94	1.3	0.203	0.44	0.1	0.01768	0.01689	0.00079	22.120903	4.703286442
0.15	0.25	0.04	0.2	10	0.1	0.239	2.01	1.35	0.205	0.44	0.1	0.01794	0.01709	0.00085	22.781186	4.772964057
0.15	0.25	0.04	0.2	10	0.12	0.254	2.11	1.49	0.211	0.44	0.1	0.01873	0.01842	0.00032	24.840602	4.984034676
0.15	0.25	0.04	0.2	10	0.13	0.262	2.18	1.55	0.216	0.44	0.1	0.01940	0.01869	0.00071	26.648698	5.16223771
0.15	0.25	0.04	0.2	10	0.14	0.27	2.27	1.62	0.22	0.44	0.1	0.01994	0.02695	-0.00701	28.156767	5.306295036
0.15	0.25	0.04	0.2	10	0.15	0.277	2.33	1.7	0.225	0.44	0.1	0.02063	0.02941	-0.00878	30.120508	5.488215417
0.15	0.25	0.04	0.2	10	0.16	0.282	2.42	1.78	0.23	0.44	0.1	0.02132	0.01616	0.00516	32.173496	5.672168534
0.15	0.25	0.04	0.2	10	0.17	0.29	2.54	1.84	0.235	0.44	0.1	0.02202	0.01818	0.00384	34.317712	5.858132167
0.15	0.25	0.035	0.2	10	0.15	0.27	2.16	1.53	0.211	0.44	0.1	0.01873	0.01845	0.00028	37.079849	6.089322502
0.15	0.25	0.035	0.2	10	0.16	0.278	2.3	1.58	0.22	0.44	0.1	0.01994	0.01859	0.00136	42.029926	6.483049148
0.15	0.25	0.035	0.2	10	0.2	0.302	2.56	1.72	0.238	0.44	0.1	0.02244	0.01529	0.00715	53.213455	7.294755302
0.15	0.25	0.035	0.2	10	0.21	0.31	2.63	1.77	0.24	0.44	0.1	0.02272	0.01580	0.00693	54.566275	7.386898904
0.15	0.25	0.03	0.2	10	0.18	0.286	2.4	1.7	0.215	0.44	0.1	0.01927	0.01650	0.00277	62.294017	7.892655864
0.15	0.25	0.03	0.2	10	0.2	0.298	2.51	1.79	0.221	0.44	0.1	0.02008	0.01848	0.00160	67.656227	8.225340547
0.15	0.25	0.03	0.2	10	0.21	0.302	2.59	1.82	0.226	0.44	0.1	0.02077	0.01887	0.00190	72.352955	8.506054009
0.15	0.25	0.025	0.2	10	0.1	0.207	1.73	1.25	0.16	0.44	0.1	0.01237	0.01942	-0.00705	44.364403	6.660660844
0.15	0.25	0.025	0.2	10	0.11	0.214	1.82	1.34	0.163	0.44	0.1	0.01272	0.02000	-0.00728	46.906984	6.84886732
0.15	0.25	0.025	0.2	10	0.12	0.229	1.9	1.4	0.167	0.44	0.1	0.01319	0.01276	0.00043	50.445695	7.102513257
0.15	0.25	0.025	0.2	10	0.13	0.24	2.05	1.5	0.175	0.44	0.1	0.01415	0.01370	0.00045	58.048211	7.618937647
0.15	0.25	0.025	0.2	10	0.14	0.249	2.15	1.56	0.181	0.44	0.1	0.01488	0.01486	0.00002	64.225932	8.014108329
0.15	0.25	0.025	0.2	10	0.17	0.276	2.45	1.72	0.199	0.44	0.1	0.01716	0.01637	0.00079	85.355974	9.238829681
0.15	0.25	0.025	0.2	10	0.18	0.285	2.53	1.79	0.205	0.44	0.1	0.01794	0.01686	0.00108	93.311737	9.65980007
0.15	0.25	0.025	0.2	10	0.19	0.295	2.6	1.87	0.211	0.44	0.1	0.01873	0.01754	0.00119	101.7471	10.08697697
0.15	0.25	0.025	0.2	10	0.2	0.307	2.67	1.92	0.216	0.44	0.1	0.01940	0.01818	0.00122	109.15307	10.44763455

DEROULEMENT DE L'EXPERIENCE

0.15	0.25	0.025	0.2	10	0.21	0.318	2.76	2	0.22	0.44	0.1	0.01994	0.01316	0.00679	115.33012	10.73918608
0.15	0.25	0.02	0.2	10	0.11	0.212	1.9	1.36	0.155	0.44	0.1	0.01179	0.01385	-0.00206	78.77707	8.875644789
0.15	0.25	0.02	0.2	10	0.13	0.235	2.14	1.53	0.168	0.44	0.1	0.01331	0.01471	-0.00140	100.30731	10.01535363
0.15	0.25	0.02	0.2	10	0.14	0.247	2.22	1.63	0.175	0.44	0.1	0.01415	0.01502	-0.00087	113.37541	10.64778906
0.15	0.25	0.02	0.2	10	0.15	0.258	2.31	1.71	0.18	0.44	0.1	0.01476	0.01543	-0.00067	123.3736	11.10736705
0.15	0.25	0.02	0.2	10	0.16	0.27	2.41	1.78	0.185	0.44	0.1	0.01538	0.01563	-0.00025	133.94297	11.57337322
0.15	0.25	0.02	0.2	10	0.17	0.279	2.49	1.84	0.188	0.44	0.1	0.01575	0.01592	-0.00017	140.56535	11.85602591
0.15	0.25	0.02	0.2	10	0.18	0.29	2.54	1.9	0.192	0.44	0.1	0.01626	0.01639	-0.00013	149.72986	12.23641531
0.15	0.25	0.02	0.2	10	0.19	0.299	2.65	1.96	0.196	0.44	0.1	0.01677	0.01724	-0.00047	159.28429	12.62078803
0.15	0.25	0.04	0.2	8	0.08	0.202	1.79	1.13	0.185	0.44	0.08	0.01538	0.01689	-0.00151	16.742871	4.091805341
0.15	0.25	0.04	0.2	8	0.085	0.213	1.84	1.15	0.191	0.44	0.08	0.01613	0.01709	-0.00096	18.425312	4.292471528
0.15	0.25	0.04	0.2	8	0.09	0.225	1.9	1.2	0.196	0.44	0.08	0.01677	0.01842	-0.00165	19.910536	4.462122402
0.15	0.25	0.04	0.2	8	0.095	0.232	1.98	1.27	0.201	0.44	0.08	0.01742	0.01869	-0.00127	21.473504	4.633951227
0.15	0.25	0.04	0.2	8	0.1	0.24	2.08	1.32	0.206	0.44	0.08	0.01807	0.02695	-0.00888	23.116198	4.80793074
0.15	0.25	0.04	0.2	8	0.11	0.249	2.17	1.39	0.211	0.44	0.08	0.01873	0.02941	-0.01068	24.840602	4.984034676
0.15	0.25	0.035	0.2	8	0.11	0.234	2.01	1.4	0.192	0.44	0.08	0.01626	0.01616	0.00011	27.937933	5.285634589
0.15	0.25	0.035	0.2	8	0.12	0.245	2.13	1.45	0.196	0.44	0.08	0.01677	0.01818	-0.00141	29.720684	5.451667998
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.095	0.212	1.77	1.07	0.173	0.44	0.08	0.01391	0.01845	-0.00454	32.454077	5.696847999
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.1	0.22	1.86	1.16	0.177	0.44	0.08	0.01439	0.01859	-0.00419	34.757678	5.895564251
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.11	0.232	1.93	1.22	0.181	0.44	0.08	0.01488	0.01529	-0.00041	37.167785	6.096538764
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.12	0.241	2	1.3	0.187	0.44	0.08	0.01563	0.01580	-0.00017	40.98791	6.402180098
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.13	0.25	2.1	1.4	0.191	0.44	0.08	0.01613	0.01650	-0.00037	43.674813	6.608692246
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.14	0.259	2.2	1.49	0.198	0.44	0.08	0.01703	0.01848	-0.00146	48.654893	6.975305971
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.15	0.268	2.27	1.58	0.202	0.44	0.08	0.01755	0.01887	-0.00132	51.663647	7.187742851
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.16	0.277	2.36	1.67	0.207	0.44	0.08	0.01820	0.01942	-0.00122	55.595801	7.456259175
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.17	0.286	2.45	1.76	0.212	0.44	0.08	0.01887	0.02000	-0.00113	59.722577	7.728038351
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.18	0.295	2.56	1.85	0.216	0.44	0.08	0.01940	0.01276	0.00665	63.167285	7.947784885
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.19	0.303	2.64	1.92	0.22	0.44	0.08	0.01994	0.01370	0.00625	66.741966	8.169575646
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.2	0.307	2.75	2.02	0.225	0.44	0.08	0.02063	0.01486	0.00577	71.396761	8.449660396
0.15	0.25	0.03	0.2	8	0.21	0.312	2.84	2.11	0.23	0.44	0.08	0.02132	0.01637	0.00495	76.263101	8.732874747
0.15	0.25	0.025	0.2	8	0.16	0.272	2.33	1.7	0.194	0.44	0.08	0.01651	0.01686	-0.00035	79.082408	8.892828997
0.15	0.25	0.025	0.2	8	0.17	0.28	2.42	1.78	0.198	0.44	0.08	0.01703	0.01754	-0.00052	84.075656	9.169277821
0.15	0.25	0.025	0.2	8	0.18	0.286	2.51	1.87	0.202	0.44	0.08	0.01755	0.01818	-0.00063	89.274783	9.448533353
0.15	0.25	0.025	0.2	8	0.19	0.29	2.6	1.96	0.206	0.44	0.08	0.01807	0.01316	0.00491	94.683947	9.730567661
0.15	0.25	0.025	0.2	8	0.2	0.296	2.71	2.05	0.21	0.44	0.08	0.01860	0.01385	0.00475	100.30731	10.01535363
0.15	0.25	0.02	0.2	8	0.13	0.245	2.15	1.44	0.17	0.44	0.08	0.01355	0.01471	-0.00116	103.93253	10.19473046
0.15	0.25	0.02	0.2	8	0.14	0.256	2.23	1.55	0.174	0.44	0.08	0.01403	0.01502	-0.00099	111.44292	10.5566528
0.15	0.25	0.02	0.2	8	0.15	0.263	2.31	1.63	0.177	0.44	0.08	0.01439	0.01543	-0.00104	117.30716	10.83084312
0.15	0.25	0.02	0.2	8	0.16	0.273	2.39	1.69	0.182	0.44	0.08	0.01501	0.01563	-0.00062	127.53192	11.29300311
0.15	0.25	0.02	0.2	8	0.17	0.286	2.48	1.75	0.187	0.44	0.08	0.01563	0.01592	-0.00029	138.3342	11.76155586
0.15	0.25	0.02	0.2	8	0.18	0.295	2.57	1.82	0.191	0.44	0.08	0.01613	0.01639	-0.00026	147.40249	12.1409429
0.15	0.25	0.02	0.2	8	0.19	0.303	2.68	1.91	0.198	0.44	0.08	0.01703	0.01724	-0.00021	164.21027	12.81445532
0.15	0.25	0.02	0.2	8	0.2	0.31	2.77	2.01	0.2	0.44	0.08	0.01729	0.01724	0.00005	169.23677	13.00910321

DEROULEMENT DE L'EXPERIENCE

0.15	0.25	0.02	0.2	8	0.21	0.315	2.84	2.11	0.204	0.44	0.08	0.01781	0.01724	0.00057	179.59541	13.40132122
0.15	0.25	0.04	0.2	6	0.12	0.25	2.23	1.52	0.221	0.44	0.06	0.02008	0.01689	0.00319	28.542471	5.342515402
0.15	0.25	0.04	0.2	6	0.13	0.261	2.34	1.61	0.227	0.44	0.06	0.02090	0.01709	0.00381	30.930883	5.561553997
0.15	0.25	0.04	0.2	6	0.14	0.269	2.42	1.7	0.23	0.44	0.06	0.02132	0.01842	0.00290	32.173496	5.672168534
0.15	0.25	0.04	0.2	6	0.15	0.281	2.52	1.79	0.236	0.44	0.06	0.02216	0.01869	0.00347	34.757678	5.895564251
0.15	0.25	0.04	0.2	6	0.2	0.302	2.94	2.14	0.254	0.44	0.06	0.02474	0.02695	-0.00221	43.332714	6.582758875
0.15	0.25	0.035	0.2	6	0.15	0.273	2.39	1.63	0.214	0.44	0.06	0.01913	0.02941	-0.01028	38.684047	6.219650094
0.15	0.25	0.035	0.2	6	0.16	0.279	2.47	1.7	0.22	0.44	0.06	0.01994	0.01616	0.00379	42.029926	6.483049148
0.15	0.25	0.035	0.2	6	0.17	0.283	2.55	1.77	0.226	0.44	0.06	0.02077	0.01818	0.00258	45.563377	6.750064947
0.15	0.25	0.035	0.2	6	0.18	0.29	2.63	1.84	0.23	0.44	0.06	0.02132	0.01845	0.00287	48.025743	6.930060831
0.15	0.25	0.035	0.2	6	0.19	0.297	2.72	1.91	0.233	0.44	0.06	0.02174	0.01859	0.00315	49.92963	7.066090157
0.15	0.25	0.035	0.2	6	0.2	0.304	2.8	1.98	0.236	0.44	0.06	0.02216	0.01529	0.00687	51.883181	7.202998051
0.15	0.25	0.03	0.2	6	0.17	0.282	2.45	1.84	0.208	0.44	0.06	0.01833	0.01580	0.00254	56.405436	7.510355241
0.15	0.25	0.03	0.2	6	0.18	0.289	2.54	1.92	0.212	0.44	0.06	0.01887	0.01650	0.00236	59.722577	7.728038351
0.15	0.25	0.03	0.2	6	0.19	0.297	2.63	2	0.216	0.44	0.06	0.01940	0.01848	0.00092	63.167285	7.947784885
0.15	0.25	0.03	0.2	6	0.2	0.305	2.72	2.05	0.22	0.44	0.06	0.01994	0.01887	0.00108	66.741966	8.169575646
0.15	0.25	0.03	0.2	6	0.21	0.315	2.81	2.11	0.225	0.44	0.06	0.02063	0.01942	0.00121	71.396761	8.449660396
0.15	0.25	0.025	0.2	6	0.17	0.281	2.44	1.74	0.197	0.44	0.06	0.01690	0.02000	-0.00310	82.808205	9.099901377
0.15	0.25	0.025	0.2	6	0.18	0.29	2.53	1.81	0.201	0.44	0.06	0.01742	0.01276	0.00466	87.955472	9.378457883
0.15	0.25	0.025	0.2	6	0.19	0.299	2.62	1.88	0.205	0.44	0.06	0.01794	0.01370	0.00424	93.311737	9.65980007
0.15	0.25	0.025	0.2	6	0.2	0.306	2.71	1.95	0.21	0.44	0.06	0.01860	0.01486	0.00374	100.30731	10.01535363
0.15	0.25	0.025	0.2	6	0.21	0.314	2.8	2.02	0.214	0.44	0.06	0.01913	0.01637	0.00277	106.14903	10.30286493
0.15	0.25	0.025	0.2	6	0.22	0.319	2.86	2.09	0.217	0.44	0.06	0.01954	0.01686	0.00267	110.67611	10.52027148
0.15	0.25	0.02	0.2	6	0.15	0.269	2.35	1.61	0.178	0.44	0.06	0.01451	0.01754	-0.00303	119.30667	10.92275945
0.15	0.25	0.02	0.2	6	0.16	0.279	2.44	1.68	0.183	0.44	0.06	0.01513	0.01818	-0.00305	129.64567	11.38620504
0.15	0.25	0.02	0.2	6	0.17	0.289	2.52	1.76	0.187	0.44	0.06	0.01563	0.01316	0.00247	138.3342	11.76155586
0.15	0.25	0.02	0.2	6	0.18	0.296	2.57	1.84	0.189	0.44	0.06	0.01588	0.01385	0.00203	142.82037	11.95074754
0.15	0.25	0.02	0.2	6	0.19	0.304	2.66	1.9	0.194	0.44	0.06	0.01651	0.01471	0.00181	154.45783	12.42810634
0.15	0.25	0.02	0.2	6	0.2	0.311	2.74	1.98	0.198	0.44	0.06	0.01703	0.01502	0.00201	164.21027	12.81445532
0.15	0.25	0.02	0.2	6	0.21	0.317	2.82	2.07	0.201	0.44	0.06	0.01742	0.01543	0.00198	171.78803	13.10679334
0.15	0.25	0.02	0.2	0	0.11	0.21	1.93	1.27	0.144	0.44	0	0.01056	0.01689	-0.00633	63.167285	7.947784885
0.15	0.25	0.02	0.2	0	0.12	0.219	2.05	1.33	0.148	0.44	0	0.01100	0.01709	-0.00609	68.578799	8.281231757
0.15	0.25	0.02	0.2	0	0.13	0.23	2.17	1.39	0.151	0.44	0	0.01134	0.01842	-0.00708	72.834237	8.534297672
0.15	0.25	0.02	0.2	0	0.14	0.238	2.23	1.42	0.155	0.44	0	0.01179	0.01869	-0.00690	78.77707	8.875644789
0.15	0.25	0.02	0.2	0	0.15	0.246	2.31	1.46	0.159	0.44	0	0.01225	0.02695	-0.01470	85.034684	9.221425295
0.15	0.25	0.02	0.2	0	0.16	0.255	2.38	1.52	0.163	0.44	0	0.01272	0.02941	-0.01669	91.615202	9.57158306
0.15	0.25	0.02	0.2	0	0.17	0.262	2.43	1.59	0.167	0.44	0	0.01319	0.01616	-0.00296	98.526747	9.926064034
0.15	0.25	0.02	0.2	0	0.18	0.271	2.5	1.65	0.17	0.44	0	0.01355	0.01818	-0.00463	103.93253	10.19473046
0.15	0.25	0.02	0.2	0	0.19	0.28	2.56	1.74	0.174	0.44	0	0.01403	0.01845	-0.00442	111.44292	10.5566528
0.15	0.25	0.02	0.2	0	0.2	0.288	2.62	1.81	0.178	0.44	0	0.01451	0.01859	-0.00407	119.30667	10.92275945
0.15	0.25	0.02	0.2	0	0.21	0.297	2.68	1.9	0.182	0.44	0	0.01501	0.01529	-0.00028	127.53192	11.29300311
0.15	0.25	0.02	0.2	0	0.22	0.309	2.76	1.98	0.186	0.44	0	0.01550	0.01580	-0.00029	136.12678	11.66733807
0.15	0.25	0.025	0.2	0	0.12	0.229	2.04	1.34	0.165	0.44	0	0.01295	0.01650	-0.00355	48.654893	6.975305971

0.15	0.25	0.025	0.2	0	0.13	0.236	2.12	1.43	0.168	0.44	0	0.01331	0.01848	-0.00518	51.357342	7.166403693
0.15	0.25	0.025	0.2	0	0.14	0.242	2.18	1.47	0.17	0.44	0	0.01355	0.01887	-0.00532	53.213455	7.294755302
0.15	0.25	0.025	0.2	0	0.15	0.249	2.21	1.49	0.174	0.44	0	0.01403	0.01942	-0.00539	57.058774	7.553725849
0.15	0.25	0.025	0.2	0	0.16	0.256	2.29	1.53	0.177	0.44	0	0.01439	0.02000	-0.00561	60.061267	7.749920471
0.15	0.25	0.025	0.2	0	0.175	0.268	2.42	1.62	0.183	0.44	0	0.01513	0.01276	0.00238	66.378581	8.147305116
0.15	0.25	0.035	0.2	0	0.12	0.24	2.12	1.41	0.188	0.44	0	0.01575	0.01370	0.00206	26.227937	5.121321811
0.15	0.25	0.035	0.2	0	0.13	0.249	2.2	1.45	0.194	0.44	0	0.01651	0.01486	0.00166	28.820119	5.368437331
0.15	0.25	0.035	0.2	0	0.14	0.256	2.27	1.49	0.197	0.44	0	0.01690	0.01637	0.00053	30.177917	5.493443119
0.15	0.25	0.035	0.2	0	0.15	0.263	2.35	1.54	0.199	0.44	0	0.01716	0.01686	0.00029	31.106404	5.577311581
0.15	0.25	0.035	0.2	0	0.19	0.295	2.75	1.84	0.216	0.44	0	0.01940	0.01754	0.00186	39.778815	6.307044853
0.15	0.25	0.035	0.2	0	0.2	0.305	2.87	1.94	0.22	0.44	0	0.01994	0.01818	0.00176	42.029926	6.483049148
0.15	0.25	0.035	0.2	0	0.21	0.316	2.98	2.02	0.227	0.44	0	0.02090	0.01316	0.00775	46.170881	6.794915786
0.15	0.25	0.04	0.2	0	0.1	0.229	2.09	1.32	0.194	0.44	0	0.01651	0.01385	0.00266	19.307228	4.393999136
0.15	0.25	0.04	0.2	0	0.11	0.238	2.2	1.37	0.197	0.44	0	0.01690	0.01471	0.00219	20.216847	4.496314818
0.15	0.25	0.04	0.2	0	0.12	0.248	2.29	1.44	0.2	0.44	0	0.01729	0.01502	0.00227	21.154596	4.599412549
0.15	0.25	0.04	0.2	0	0.13	0.255	2.42	1.52	0.205	0.44	0	0.01794	0.01543	0.00251	22.781186	4.772964057
0.15	0.25	0.04	1.2	0	0.18	0.296	2.95	1.91	0.23	0.44	0	0.02132	0.01543	0.00589	32.173496	5.672168534
0.15	0.25	0.04	2.2	0	0.19	0.307	3.03	2	0.236	0.44	0	0.02216	0.01543	0.00673	34.757678	5.895564251
0.15	0.25	0.04	3.2	0	0.2	0.314	3.11	2.07	0.241	0.44	0	0.02287	0.01543	0.00743	37.013987	6.083912176

3.4 CONCLUSION

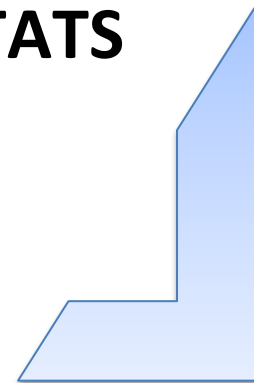
Dans Ce Chapitre nous avons obtenu ce qui suit :

- Préparation des tapis rugueux de rugosité diverses : 00 mm; 06 mm; 08 mm; 10 mm et 12 mm. Au niveau du laboratoire de l'université d'Ouargla.
- Préparation des seuils de contrôle et de formation du ressaut hydraulique.
- Préparation des instrumentations et appareillages de mesure expérimentales.
- Préparation des diverses ouvertures de création du régime torentiel tel que $h_1(\text{cm})$: 2 ;2,5; 3 ;3,5 et 4.
- Récapitulation de toutes les mesures expérimentales obtenues durant l'expérimentation dans un tableau indiqué ci-dessus.

Chapitre 4



INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX



A travers ce dernier chapitre , nous allons analyser expérimentalement le ressaut hydraulique formé dans le canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux. Cette étude va permettre d'obtenir des approches empiriques adimensionnelles régissant les caractéristiques du ressaut hydraulique.

4.1 Longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_r :

La Figure-4.1 montre la représentation graphique de la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_r de l'écoulement incident, pour Cinq rugosités absolues : ϵ (mm)= 0, 6, 8, 10,12. Cinq nuages de points distincts sont perceptibles, correspondant chacun à une rugosité absolue ϵ . On constate que pour une rugosité absolue fixe, l'augmentation du nombre de Froude engendre celle ϵ la longueur relative du ressaut.

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

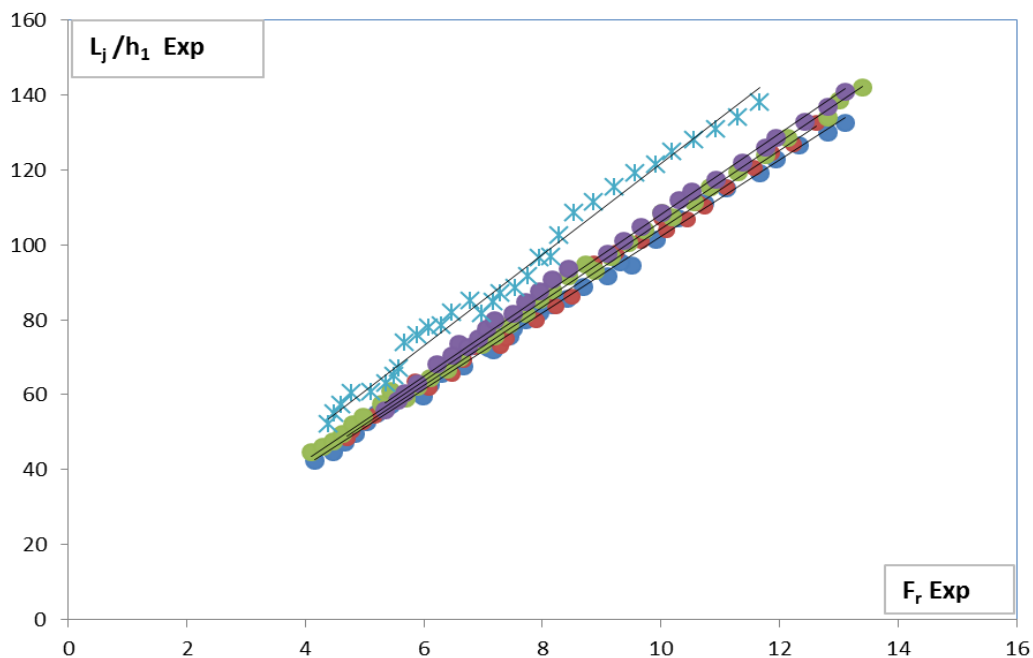


Figure 4-1 La variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_r .

Par ailleurs, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés non linéaire, montre que pour chaque rugosité absolue, un ajustement

linéaire de la forme $L_j/h_1 = a.F_r$ est possible. La figure-4.2 le montre bien. Le tableau : regroupe les valeurs du coefficient (a).

Tableau 4-1 Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $L_j/h_1 = f(F_r)$

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

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

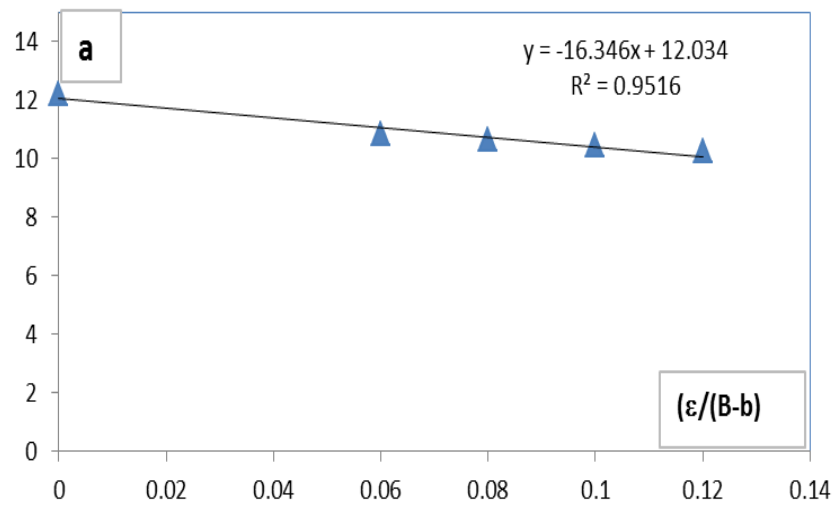


Figure 4-2 L'ajustement statistique des couples de valeurs ($\epsilon/(B-b)$, a)

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

Celle-ci est représentée dans la figure 4.2

La relation globale adimensionnelle obtenue est mentionnée dans la figure 4.3

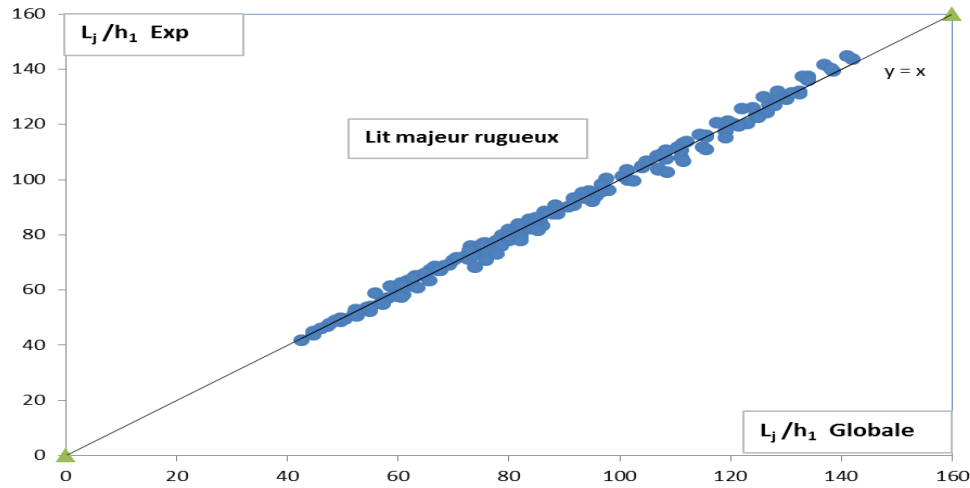


Figure 4-3 Représentation graphique de L_j/h_1 expérimentale en fonction de L_j/h_1 globale d'un lit majeur rugueux

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

Ce qui justifié la fiabilité de mesures obtenues

Tableau 4-2 récapitulation des résultats obtenus dans le tableau ci-dessous

$L_j/h_1 = (-16.346(\epsilon/(B-b)) + 12.034) * Fr$				
Fr	L_j/h_1 Exp	$\epsilon/(B-b)$	L_j/h_1 Globale	err relative
4.158338	42.5000	0.12	41.88477587	-1.468849041
4.462122	44.7500	0.12	44.94463865	0.433063104
4.668576	47.2500	0.12	47.02413767	-0.480311473
4.842982	49.5000	0.12	48.78084333	-1.47426042
7.09454	72.5000	0.12	71.45961599	-1.455904837
7.456259	75.5000	0.12	75.10302141	-0.528578716
5.039816	52.5714	0.12	50.76344915	-3.561577174
5.203262	54.8571	0.12	52.4097524	-4.66972338
5.451668	57.1429	0.12	54.91181688	-4.062951093
5.746314	60.0000	0.12	57.87963229	-3.66340909
5.995771	59.6667	0.12	60.3922816	1.201502765
6.096539	62.6667	0.12	61.40726477	-2.050900499

INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

6.299746	65.6667	0.12	63.45407003	-3.486926271
7.510355	77.6667	0.12	75.64790295	-2.668631427
7.728038	80.0000	0.12	77.84051173	-2.774247272
7.947785	82.0000	0.12	80.0539043	-2.430981626
8.169576	84.0000	0.12	82.2878873	-2.08063757
6.660661	67.6000	0.12	67.08937314	-0.761114369
7.166404	72.0000	0.12	72.18345787	0.254155
7.359215	75.6000	0.12	74.12554946	-1.989125952
8.415884	85.6000	0.12	84.76882626	-0.980518159
8.687352	88.8000	0.12	87.50317489	-1.482032062
9.099901	91.6000	0.12	91.65857462	0.063905228
9.518782	94.4000	0.12	95.87774628	1.541281831
9.308557	95.5000	0.12	93.76024932	-1.855531201
9.926064	101.5000	0.12	99.98008146	-1.520221348
10.28482	107.0000	0.12	103.5936047	-3.288229374
10.73919	111.0000	0.12	108.170237	-2.616027362
11.10737	115.0000	0.12	111.8787324	-2.789866773
11.66734	119.0000	0.12	117.5190294	-1.260196433
11.95075	123.0000	0.12	120.3736656	-2.181818081
12.33214	126.5000	0.12	124.2152	-1.839388396
12.81446	130.0000	0.12	129.0733449	-0.717929074
13.10679	132.5000	0.12	132.0179138	-0.365167241
4.703286	48.5000	0.1	48.91135703	0.841025582
4.772964	50.2500	0.1	49.63596241	-1.237082061
4.984035	52.7500	0.1	51.83097021	-1.773128658
5.162238	54.5000	0.1	53.68417485	-1.519675316
5.306295	56.7500	0.1	55.18228459	-2.840975901
5.488215	58.2500	0.1	57.07414741	-2.060219279
5.672169	60.5000	0.1	58.98714946	-2.564712075
5.858132	63.5000	0.1	60.92105966	-4.233249313
6.089323	61.7143	0.1	63.32530043	2.544030117
6.483049	65.7143	0.1	67.41982131	2.529724292
7.294755	73.1429	0.1	75.86107829	3.583156489
7.386899	75.1429	0.1	76.81931646	2.182340839
7.892656	80.0000	0.1	82.07888539	2.532789504
8.225341	83.6667	0.1	85.53860649	2.188415149
8.506054	86.3333	0.1	88.45785806	2.401736576
6.660661	69.2000	0.1	69.26687638	0.096548867
6.848867	72.8000	0.1	71.22411081	-2.212578261
7.102513	76.0000	0.1	73.86187637	-2.894759435
7.618938	82.0000	0.1	79.23238016	-3.493041394

INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

8.014108	86.0000	0.1	83.34191815	-3.189369654
9.23883	98.0000	0.1	96.07828539	-2.000154985
9.6598	101.2000	0.1	100.4561249	-0.740497555
10.08698	104.0000	0.1	104.8985083	0.856550116
10.44763	106.8000	0.1	108.6491308	1.701928725
10.73919	110.4000	0.1	111.6810917	1.147098131
8.875645	95.0000	0.1	92.30138042	-2.923704466
10.01535	107.0000	0.1	104.1536686	-2.732819188
10.64779	111.0000	0.1	110.7306175	-0.243277303
11.10737	115.5000	0.1	115.5099529	0.008616446
11.57337	120.5000	0.1	120.3561374	-0.119530733
11.85603	124.5000	0.1	123.2955558	-0.976875567
12.23642	127.0000	0.1	127.2513774	0.197543963
12.62079	132.5000	0.1	131.2486231	-0.953440032
4.091805	44.7500	0.08	43.89001347	-1.959412777
4.292472	46.0000	0.08	46.0424232	0.092139378
4.462122	47.5000	0.08	47.86215276	0.756657897
4.633951	49.5000	0.08	49.70524372	0.41292167
4.807931	52.0000	0.08	51.57140365	-0.831073647
4.984035	54.2500	0.08	53.46035083	-1.477074426
5.285635	57.4286	0.08	56.69540801	-1.293161911
5.451668	60.8571	0.08	58.47633548	-4.071403167
5.696848	59.0000	0.08	61.10621463	3.446809197
5.895564	62.0000	0.08	63.23770874	1.957232107
6.096539	64.3333	0.08	65.39342567	1.621099259
6.40218	66.6667	0.08	68.67183243	2.919924656
6.608692	70.0000	0.08	70.88694781	1.251214562
6.975306	73.3333	0.08	74.81936394	1.986157764
7.187743	75.6667	0.08	77.0980299	1.856549689
7.456259	78.6667	0.08	79.97822191	1.639890479
7.728038	81.6667	0.08	82.89341232	1.479907295
7.947785	85.3333	0.08	85.25048396	-0.097183459
8.169576	88.0000	0.08	87.62948264	-0.422822716
8.44966	91.6667	0.08	90.6337613	-1.139647467
8.732875	94.6667	0.08	93.67160906	-1.062283033
8.892829	93.2000	0.08	95.38732952	2.293102799
9.169278	96.8000	0.08	98.35260808	1.578614042
9.448533	100.4000	0.08	101.3479923	0.935383383
9.730568	104.0000	0.08	104.3731825	0.357546361
10.01535	108.4000	0.08	107.427888	-0.904897274
10.19473	107.5000	0.08	109.3519412	1.693560447

INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

10.55665	111.5000	0.08	113.2340361	1.531373547
10.83084	115.5000	0.08	116.1750892	0.581096335
11.293	119.5000	0.08	121.1323651	1.34758793
11.76156	124.0000	0.08	126.1582119	1.710718503
12.14094	128.5000	0.08	130.2276387	1.32662981
12.81446	134.0000	0.08	137.4519484	2.51138557
13.0091	138.5000	0.08	139.539804	0.745166562
13.40132	142.0000	0.08	143.7468598	1.215233362
5.342515	55.7500	0.06	59.05210494	5.591849675
5.561554	58.5000	0.06	61.4731911	4.836565411
5.672169	60.5000	0.06	62.69584013	3.502369735
5.895564	63.0000	0.06	65.1650866	3.322464094
6.582759	73.5000	0.06	72.7608137	-1.015912632
6.21965	68.2857	0.06	68.74728521	0.671402402
6.483049	70.5714	0.06	71.65869817	1.51728907
6.750065	72.8571	0.06	74.61008788	2.34947454
6.930061	75.1429	0.06	76.59962558	1.901795769
7.06609	77.7143	0.06	78.10319036	0.497936956
7.202998	80.0000	0.06	79.61646617	-0.481726766
7.510355	81.6667	0.06	83.01375896	1.622733762
7.728038	84.6667	0.06	85.41986262	0.881757393
7.947785	87.6667	0.06	87.8487738	0.207296157
8.169576	90.6667	0.06	90.30028031	-0.405742212
8.44966	93.6667	0.06	93.39612428	-0.289671965
9.099901	97.6000	0.06	100.5833939	2.966089908
9.378458	101.2000	0.06	103.6623458	2.375352202
9.6598	104.8000	0.06	106.7720885	1.847007544
10.01535	108.4000	0.06	110.7021074	2.07955154
10.30286	112.0000	0.06	113.8800388	1.650894036
10.52027	114.4000	0.06	116.2830855	1.619397622
10.92276	117.5000	0.06	120.7318816	2.676908198
11.38621	122.0000	0.06	125.8544571	3.062630551
11.76156	126.0000	0.06	130.0032997	3.079383157
11.95075	128.5000	0.06	132.0944808	2.721143788
12.42811	133.0000	0.06	137.3708422	3.181783038
12.81446	137.0000	0.06	141.6412501	3.27676445
13.10679	141.0000	0.06	144.8725325	2.673061899
7.947785	96.5000	0	95.6436433	-0.895361853
8.281232	102.5000	0	99.65634297	-2.853463162
8.534298	108.5000	0	102.7017382	-5.645729002
8.875645	111.5000	0	106.8095094	-4.391454128

INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

9.221425	115.5000	0	110.970632	-4.081591603
9.571583	119.0000	0	115.1844305	-3.31257396
9.926064	121.5000	0	119.4502546	-1.715982462
10.19473	125.0000	0	122.6833864	-1.888286358
10.55665	128.0000	0	127.0387598	-0.756651114
10.92276	131.0000	0	131.4444872	0.338155827
11.293	134.0000	0	135.8999994	1.398086422
11.66734	138.0000	0	140.4047464	1.712724406
6.975306	81.6000	0	83.94083205	2.788669106
7.166404	84.8000	0	86.24050204	1.67033123
7.294755	87.2000	0	87.78508531	0.666497399
7.553726	88.4000	0	90.90153687	2.751919223
7.74992	91.6000	0	93.26254295	1.782648099
8.147305	96.8000	0	98.04466976	1.269492533
5.121322	60.5714	0	61.62998667	1.717602357
5.368437	62.8571	0	64.60377484	2.703606694
5.493443	64.8571	0	66.10809449	1.892282093
5.577312	67.1429	0	67.11736757	-0.037977614
6.307045	78.5714	0	75.89897776	-3.521062986
6.483049	82.0000	0	78.01701345	-5.105279445
6.794916	85.1429	0	81.77001656	-4.124788915
4.393999	52.2500	0	52.87738561	1.186491348
4.496315	55.0000	0	54.10865252	-1.647328923
4.599413	57.2500	0	55.34933061	-3.433951891
4.772964	60.5000	0	57.43784946	-5.331241625
5.672169	73.7500	0	68.25887614	-8.044556501
5.895564	75.7500	0	70.9472202	-6.769510895
6.083912	77.7500	0	73.21379912	-6.195827741

4.2 Longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_r :

La Figure-4.4: montre la représentation graphique de la variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_r de l'écoulement incident, pour Cinq rugosités absolues : ε (mm)= 0, 6, 8, 10,12. Cinq nuages de points distincts sont perceptibles, correspondant chacun à une rugosité absolue ε . On constate que pour une rugosité absolue fixe, l'augmentation du nombre de Froude engendre celle ε la longueur relative du rouleau.

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

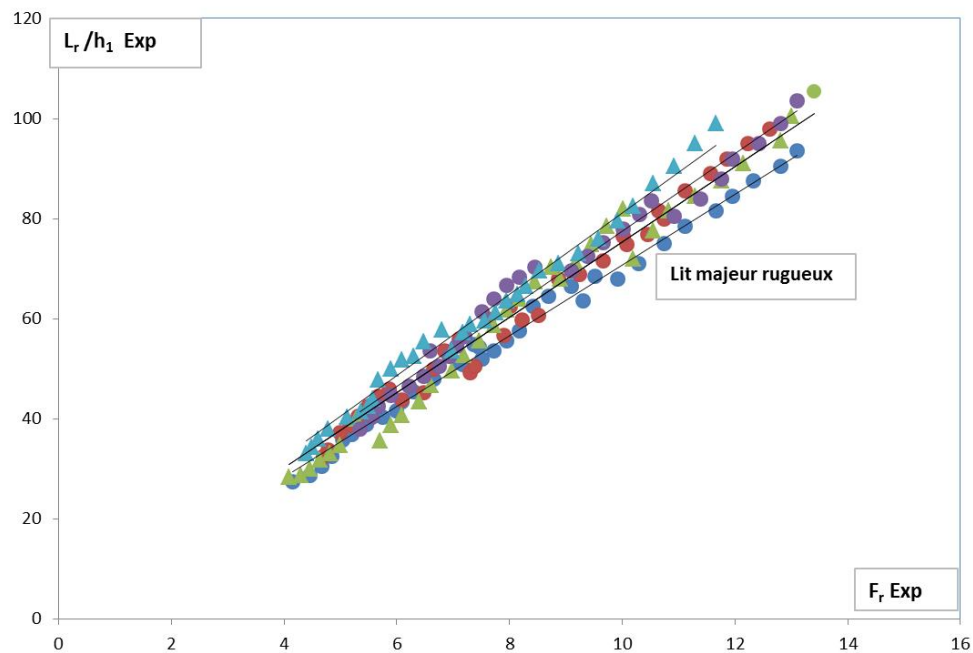


Figure 4-4 la variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_r .

Par ailleurs, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés non linéaire, montre que pour chaque rugosité absolue, un ajustement linéaire de la forme $L_r/h_1 = a F_r$ est possible. La figure-4.4 le montre bien. Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs du coefficient a .

Tableau 4-3 Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $L_r/h_1 = f(F_r)$

Rugosité	$\varepsilon/(B-b)$	Equation linéaire pour chaque allure= (a)	R ²
12	0.12	7.0694	0.9934
10	0.1	7.534	0.9836
8	0.08	7.5307	0.9767
6	0.06	7.7516	0.9797
0	0	8.1166	0.9884

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

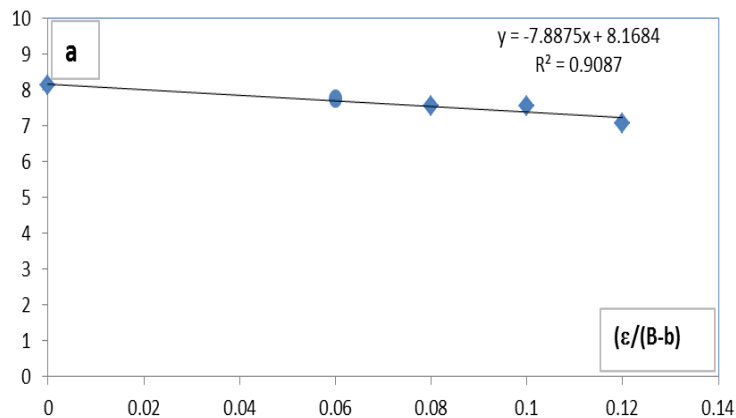


Figure 4-5 L'ajustement statistique des couples de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, a)

$$a = - 7.8875 (\varepsilon/(B-b)) + 8.1684$$

Celle-ci est représentée dans la figure-4.5.

$$L_r/h_1 = (-7.8875 (\varepsilon/(B-b)) + 8.1684) * F_r$$

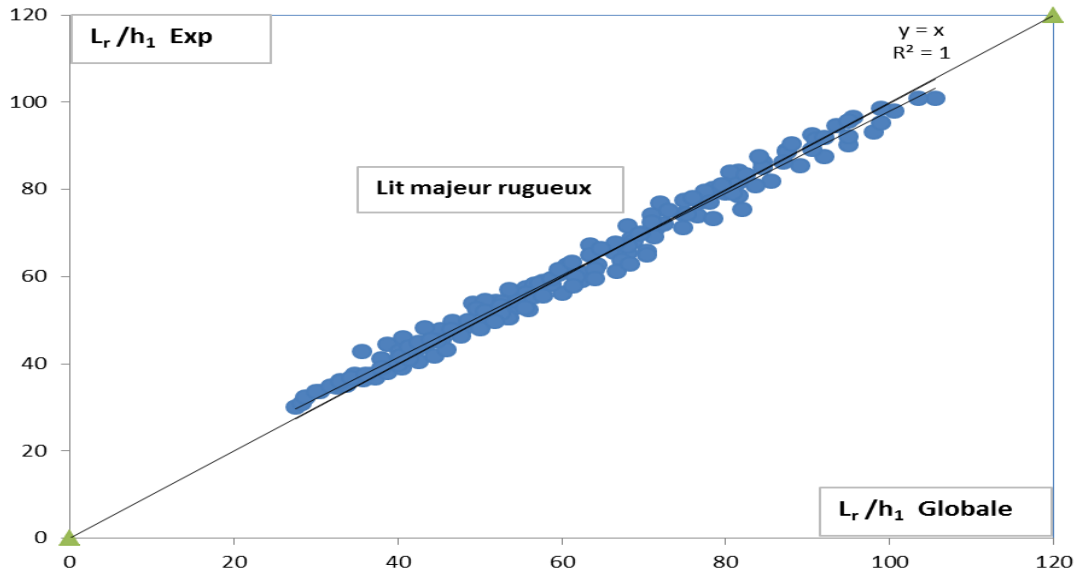


Figure 4-6 Représentation graphique de L_r/h_1 expérimentale en fonction de L_r/h_1 globale d'un lit majeur rugueux

On a constaté que l'effet réducteur de la rugosité imposée au lit majeur, à la longueur du rouleau est remarquable. Et que la plus part des mesures expérimentales tournent au tour de la première bissectrice

Tableau 4-4 récapitulation des mesures expérimentales

dans le tableau ci-dessous

$L_r/h_1 = (-7.8875(\epsilon / (B-b)) + 8.1684) * F_r$				
F_r	L_r/h_1 Exp	$\epsilon / (B-b)$	L_r/h_1 Globale	err relative
4.158337954	27.5000	0.12	30.03110087	8.428265346
4.462122402	28.7500	0.12	32.22500177	10.78355805
4.668575929	30.5000	0.12	33.7159885	9.538467189
4.842982397	32.5000	0.12	34.97553457	7.077903463
7.094540371	51.2500	0.12	51.2360611	-0.027205245
7.456259175	54.2500	0.12	53.84835814	-0.745875787
5.039816327	35.7143	0.12	36.39704953	1.875876819
5.203261997	36.8571	0.12	37.57743781	1.916828284
5.451667998	38.8571	0.12	39.37140112	1.306172106

INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

5.746313945	40.2857	0.12	41.49930468	2.924363206
5.995770813	41.6667	0.12	43.30085724	3.774037452
6.096538764	43.3333	0.12	44.0285933	1.579110102
6.299746441	45.3333	0.12	45.49613882	0.357844624
7.510355241	52.0000	0.12	54.23903451	4.128086963
7.728038351	53.6667	0.12	55.81112017	3.842340903
7.947784885	55.6667	0.12	57.39810766	3.01654717
8.169575646	57.6667	0.12	58.99985836	2.259652357
6.660660844	48.0000	0.12	48.10262655	0.213349164
7.166403693	50.8000	0.12	51.75505083	1.845328743
7.359215353	54.8000	0.12	53.14751736	-3.109237693
8.415884297	62.4000	0.12	60.77867481	-2.66758892
8.687351565	64.4000	0.12	62.73918427	-2.64717457
9.099901377	66.4000	0.12	65.71857775	-1.036879174
9.518782493	68.4000	0.12	68.74369528	0.499966264
9.308556514	63.5000	0.12	67.22546429	5.541745721
9.926064034	68.0000	0.12	71.68504184	5.140600814
10.28481612	71.0000	0.12	74.27591353	4.410465484
10.73918608	75.0000	0.12	77.55732795	3.297338905
11.10736705	78.5000	0.12	80.21629407	2.139582844
11.66733807	81.5000	0.12	84.26034882	3.27597602
11.95074754	84.5000	0.12	86.30710367	2.093806413
12.33213668	87.5000	0.12	89.06145786	1.753236357
12.81445532	90.5000	0.12	92.54471488	2.209434525
13.10679334	93.5000	0.12	94.65595085	1.221213082
4.703286442	32.5000	0.1	34.70860779	6.363285457
4.772964057	33.7500	0.1	35.2228042	4.181393946
4.984034676	37.2500	0.1	36.7804315	-1.276680238
5.16223771	38.7500	0.1	38.09550752	-1.718030609
5.306295036	40.5000	0.1	39.15860016	-3.425556162
5.488215417	42.5000	0.1	40.5011089	-4.935398435
5.672168534	44.5000	0.1	41.85861852	-6.310245223
5.858132167	46.0000	0.1	43.23096505	-6.405211978

INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

6.089322502	43.7143	0.1	44.9370688	2.721101133
6.483049148	45.1429	0.1	47.84263365	5.643034879
7.294755302	49.1429	0.1	53.83274097	8.711954362
7.386898904	50.5714	0.1	54.51272849	7.230054395
7.892655864	56.6667	0.1	58.24503785	2.709880945
8.225340547	59.6667	0.1	60.70013437	1.70257894
8.506054009	60.6667	0.1	62.77170147	3.35347737
6.660660844	50.0000	0.1	49.1533458	-1.722475218
6.84886732	53.6000	0.1	50.54224372	-6.049902135
7.102513257	56.0000	0.1	52.41406196	-6.841557225
7.618937647	60.0000	0.1	56.2250932	-6.713918253
8.014108329	62.4000	0.1	59.14131453	-5.50999838
9.238829681	68.8000	0.1	68.17932946	-0.910350027
9.65980007	71.6000	0.1	71.28594359	-0.440558678
10.08697697	74.8000	0.1	74.43835959	-0.485825333
10.44763455	76.8000	0.1	77.09988633	0.388958194
10.73918608	80.0000	0.1	79.25143455	-0.944544982
8.875644789	68.0000	0.1	65.49915207	-3.818137875
10.01535363	76.5000	0.1	73.90980443	-3.504535819
10.64778906	81.5000	0.1	78.57695653	-3.719975423
11.10736705	85.5000	0.1	81.96848122	-4.308386261
11.57337322	89.0000	0.1	85.40744366	-4.206373812
11.85602591	92.0000	0.1	87.4933216	-5.150882739
12.23641531	95.0000	0.1	90.30046227	-5.204334077
12.62078803	98.0000	0.1	93.13699842	-5.221342392
4.091805341	28.2500	0.08	30.84157358	8.402857827
4.292471528	28.7500	0.08	32.3540749	11.13947751
4.462122402	30.0000	0.08	33.63280139	10.80136426
4.633951227	31.7500	0.08	34.92794398	9.098571559
4.80793074	33.0000	0.08	36.23929716	8.938631302
4.984034676	34.7500	0.08	37.56666297	7.497772618
5.285634589	40.0000	0.08	39.83994215	-0.401752208
5.451667998	41.4286	0.08	41.09140237	-0.82053432

INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

5.696847999	35.6667	0.08	42.93942211	16.93724573
5.895564251	38.6667	0.08	44.43722599	12.98586757
6.096538764	40.6667	0.08	45.95205128	11.50195577
6.402180098	43.3333	0.08	48.25579227	10.20076287
6.608692246	46.6667	0.08	49.81235694	6.315080159
6.975305971	49.6667	0.08	52.57567122	5.532986054
7.187742851	52.6667	0.08	54.17689297	2.787583817
7.456259175	55.6667	0.08	56.2008079	0.950415587
7.728038351	58.6667	0.08	58.24931626	-0.716489786
7.947784885	61.6667	0.08	59.90563379	-2.939678233
8.169575646	64.0000	0.08	61.57735947	-3.934304017
8.449660396	67.3333	0.08	63.68847027	-5.722955893
8.732874747	70.3333	0.08	65.82317012	-6.85193862
8.892828997	68.0000	0.08	67.02880928	-1.448915371
9.169277821	71.2000	0.08	69.11251465	-3.020415852
9.448533353	74.8000	0.08	71.2173753	-5.030548637
9.730567661	78.4000	0.08	73.34318069	-6.894736856
10.01535363	82.0000	0.08	75.48972647	-8.624052357
10.19473046	72.0000	0.08	76.84176137	6.300950526
10.5566528	77.5000	0.08	79.56971482	2.601133896
10.83084312	81.5000	0.08	81.63639694	0.167078589
11.29300311	84.5000	0.08	85.11988165	0.728245433
11.76155586	87.5000	0.08	88.65155115	1.298963345
12.1409429	91.0000	0.08	91.51114303	0.558558245
12.81445532	95.5000	0.08	96.58767554	1.126101782
13.00910321	100.5000	0.08	98.05481455	-2.493692395
13.40132122	105.5000	0.08	101.0111185	-4.443947877
5.342515402	38.0000	0.06	41.11145739	7.568346126
5.561553997	40.2500	0.06	42.79699224	5.951334671
5.672168534	42.5000	0.06	43.6481877	2.630550676
5.895564251	44.7500	0.06	45.36725125	1.360565674
6.582758875	53.5000	0.06	50.65531695	-5.615763986
6.219650094	46.5714	0.06	47.86114042	2.694695198

INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

6.483049148	48.5714	0.06	49.88803565	2.639123918
6.750064947	50.5714	0.06	51.94276228	2.640086214
6.930060831	52.5714	0.06	53.3278576	1.41845007
7.066090157	54.5714	0.06	54.37462367	-0.361942556
7.202998051	56.5714	0.06	55.42815045	-2.062630836
7.510355241	61.3333	0.06	57.79331013	-6.125316572
7.728038351	64.0000	0.06	59.46841431	-7.620155569
7.947784885	66.6667	0.06	61.15939686	-9.004781104
8.169575646	68.3333	0.06	62.86611003	-8.696614598
8.449660396	70.3333	0.06	65.0214042	-8.169508488
9.099901377	69.6000	0.06	70.02510608	0.607076667
9.378457883	72.4000	0.06	72.16864018	-0.320582206
9.65980007	75.2000	0.06	74.33361051	-1.165542051
10.01535363	78.0000	0.06	77.0696485	-1.207156795
10.30286493	80.8000	0.06	79.28209107	-1.914567221
10.52027148	83.6000	0.06	80.95506707	-3.267161679
10.92275945	80.5000	0.06	84.05227236	4.226265707
11.38620504	84.0000	0.06	87.61855575	4.129896597
11.76155586	88.0000	0.06	90.50693659	2.769883376
11.95074754	92.0000	0.06	91.96279495	-0.040456637
12.42810634	95.0000	0.06	95.63614253	0.665169577
12.81445532	99.0000	0.06	98.60915586	-0.396356843
13.10679334	103.5000	0.06	100.8587408	-2.618770742
7.947784885	63.5000	0	64.92068605	2.188341095
8.281231757	66.5000	0	67.64441348	1.691807831
8.534297672	69.5000	0	69.7115571	0.303474935
8.875644789	71.0000	0	72.49981689	2.068718182
9.221425295	73.0000	0	75.32429038	3.085711621
9.57158306	76.0000	0	78.18451907	2.794055774
9.926064034	79.5000	0	81.08006145	1.948766965
10.19473046	82.5000	0	83.27463629	0.930218758
10.5566528	87.0000	0	86.23096274	-0.891834249
10.92275945	90.5000	0	89.22146827	-1.432986649

11.29300311	95.0000	0	92.24576661	-2.985755865
11.66733807	99.0000	0	95.30348431	-3.878678434
6.975305971	53.6000	0	56.97708929	5.927100406
7.166403693	57.2000	0	58.53805192	2.285781436
7.294755302	58.8000	0	59.58647921	1.319895424
7.553725849	59.6000	0	61.70185423	3.406468495
7.749920471	61.2000	0	63.30445038	3.324332434
8.147305116	64.8000	0	66.55044711	2.630255968
5.121321811	40.2857	0	41.83300508	3.698732121
5.368437331	41.4286	0	43.85154349	5.525397446
5.493443119	42.5714	0	44.87264077	5.128319084
5.577311581	44.0000	0	45.55771192	3.419205781
6.307044853	52.5714	0	51.51846518	-2.043856299
6.483049148	55.4286	0	52.95613866	-4.66883128
6.794915786	57.7143	0	55.5035901	-3.98297769
4.393999136	33.0000	0	35.89194254	8.057358669
4.496314818	34.2500	0	36.72769796	6.746129203
4.599412549	36.0000	0	37.56984147	4.178461777
4.772964057	38.0000	0	38.9874796	2.532812104
5.672168534	47.7500	0	46.33254146	-3.059315332
5.895564251	50.0000	0	48.15732703	-3.826360565
6.083912176	51.7500	0	49.69582822	-4.133489383

4.3 Le Rendement du Ressaut Hydraulique :

Expression du rendement $\eta = \Delta H / H_1$ (en tenant compte des mêmes suppositions que pour le rapport des Y).

Cette relation permet de calculer explicitement, le rendement du ressaut hydraulique se produit en canal rectangulaire de forme composée, en connaissant F_r, Y, β et τ .

En supposant les valeurs de (Y) qui se calculent par la relation

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

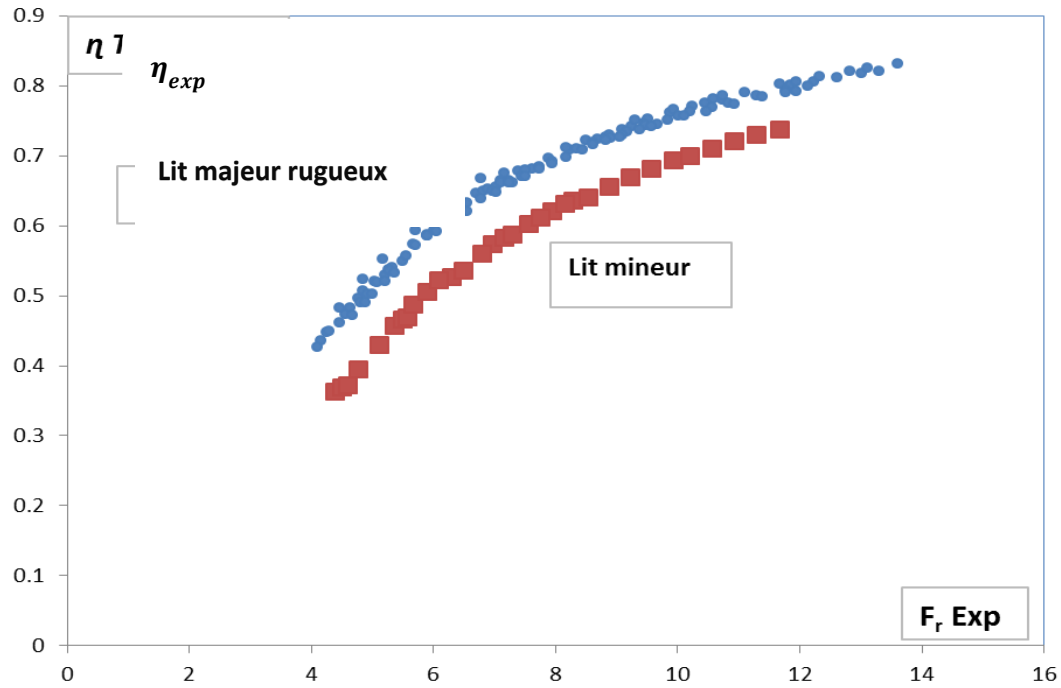


Figure 4-7 la variation de η en fonction de F_r

La figure-4.7 : présente la variation de η variant en fonction de F_r . Pour un τ et un β donnés, il est montré clairement montré sur cette figure que le rendement η d'un ressaut hydraulique évoluant en canal composé, augmente proportionnellement avec l'augmentation de F_r .

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

$$\eta_{the}^* = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2$$

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

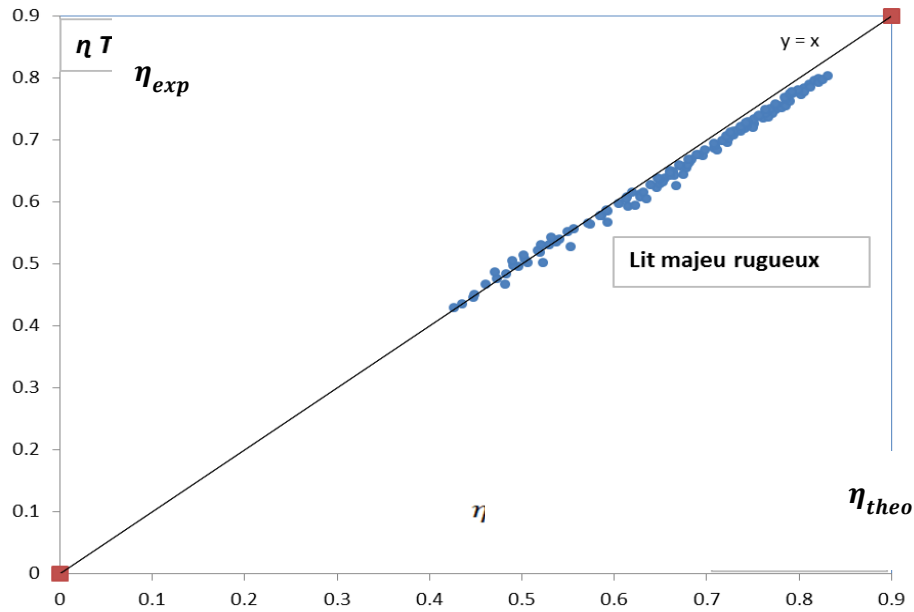


Figure 4-8 la variation de η_{exp} variant en fonction de η_{theo} .

On a déduit, que le rendement de la dissipation d'énergie dans le ressaut hydraulique est important en fonction de l'importante de la rugosité.

Tableau 4-5 rendement η

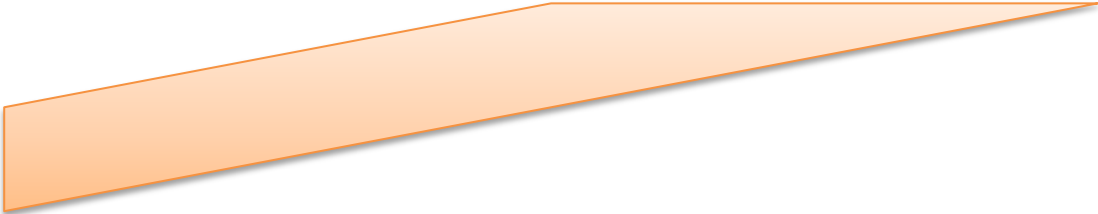
$F_r(\text{exp})$	η (théorique)	η (exp)	Err. relative
4.25880518	0.44788488	0.44613295	0.391156192
4.56496011	0.47311405	0.47637939	-0.690180047
4.77296406	0.49683423	0.49519832	0.329267735
4.8429824	0.5061305	0.50124567	0.96513341
5.30629504	0.53744178	0.53799849	-0.103584721
5.67216853	0.57410943	0.56351292	1.845730904
5.03981633	0.52032688	0.51752463	0.53855631
5.203262	0.52969881	0.53028449	-0.110567626
5.32698233	0.54078512	0.53951789	0.23433003
5.49344312	0.54972747	0.55140034	-0.304309288
6.48304915	0.62846854	0.61130477	2.731047855
6.70531323	0.64651229	0.62266398	3.688763458
7.3868989	0.67879843	0.6537549	3.689390262
6.14713229	0.6156729	0.59280652	3.714046061
6.4021801	0.62821095	0.60700363	3.375827801

6.55685951	0.63229078	0.61515066	2.710797364
6.81737831	0.64917936	0.62814749	3.239762102
7.02821586	0.65551437	0.63805041	2.664162261
7.24118318	0.66407797	0.64753976	2.49040245
7.61893765	0.68130845	0.6632177	2.655295479
7.89265586	0.69604818	0.67374392	3.204414298
8.22534055	0.70816794	0.68569373	3.17357042
8.50605401	0.72282215	0.69512297	3.832088145
8.82415869	0.72627813	0.70515301	2.908682169
9.23882968	0.74151826	0.71728568	3.267968296
10.4476346	0.77475553	0.74759873	3.505208837
10.7391861	0.77927141	0.75396708	3.247177345
8.87564479	0.72948944	0.70671524	3.121938019
9.48363624	0.74757726	0.72399431	3.154583363
11.8560259	0.80071501	0.77566374	3.128613278
12.2364153	0.80564858	0.78220905	2.909399168
12.620788	0.81164786	0.78844757	2.85841843
13.0091032	0.81739436	0.79439869	2.813288783
13.3029029	0.82087479	0.79868424	2.703280375
4.15833795	0.43564321	0.43547981	0.037507653
4.4621224	0.48250019	0.46657449	3.300661971
4.8429824	0.52297164	0.50124567	4.154330453
5.16223771	0.55272637	0.52714339	4.628508161
5.70920112	0.5934484	0.56594358	4.634745442
6.15980243	0.62344252	0.59353544	4.797087275
6.35089443	0.63541241	0.60422727	4.90785925
6.77808512	0.66721298	0.62624274	6.140503681
6.88491394	0.65283148	0.6313771	3.286357799
7.11162878	0.66517187	0.64182641	3.509688364
5.89556425	0.58694718	0.57778613	1.56079681
7.51035524	0.67998481	0.65885394	3.107550425
8.16957565	0.71162183	0.68375146	3.916457842
7.16640369	0.67492223	0.64426409	4.542469437
8.68735157	0.72378596	0.70092066	3.159125088
9.09990138	0.73746147	0.71333266	3.271874493

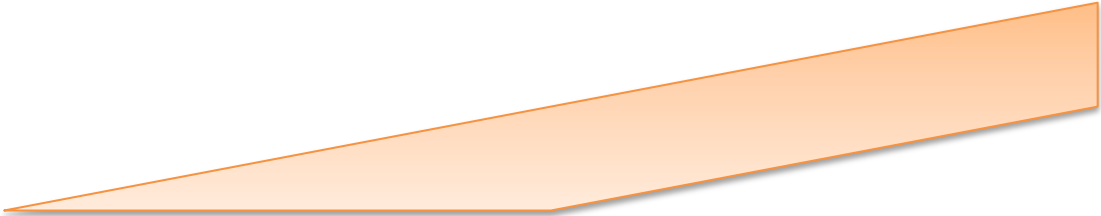
9.51878249	0.75180545	0.72493161	3.574574902
9.87261835	0.7610041	0.73402733	3.544890557
10.230733	0.77114924	0.74264428	3.69642627
10.593076	0.78133605	0.75081605	3.906130642
9.30855651	0.75076045	0.71922918	4.19991137
9.92606403	0.76675134	0.73534954	4.095434708
10.7391861	0.78598836	0.75396708	4.07401446
11.107367	0.79048961	0.76156668	3.658863706
11.6673381	0.8019601	0.77226953	3.702250515
11.9507475	0.8057224	0.77732995	3.523850388
12.3321367	0.81288206	0.78379665	3.578059467
12.8144553	0.82115348	0.7914579	3.616324735
13.1067933	0.82553156	0.79584369	3.596212548
13.5988817	0.83146916	0.80282524	3.444976448
4.09180534	0.42655866	0.42821197	-0.387591421
4.29247153	0.44921398	0.44961893	-0.090145851
4.4621224	0.46165315	0.46657449	-1.066024875
4.63395123	0.48301921	0.48276754	0.052105095
5.2701569	0.53777888	0.5353209	0.457062276
5.89556425	0.58568909	0.57778613	1.34934392
6.00833617	0.59260176	0.58465103	1.34166624
4.79793158	0.490597	0.49737073	-1.380711543
4.91837827	0.50297451	0.50760416	-0.920452398
5.08051459	0.51823955	0.52076386	-0.487091954
5.28563459	0.53600886	0.53647135	-0.086284402
7.11162878	0.6611346	0.64182641	2.920462813
5.696848	0.57227651	0.5651357	1.247788856
5.89556425	0.58535922	0.57778613	1.293751016
6.4021801	0.61433352	0.60700363	1.193145652
6.97530597	0.64941853	0.63561436	2.125620136
7.45625917	0.6713161	0.65663799	2.186466748
7.72803835	0.68370325	0.66749269	2.370994091
7.94778488	0.6914185	0.6757858	2.260959959
6.7859377	0.63906351	0.62662493	1.94637627
8.34846753	0.7093604	0.68989971	2.743413033

8.61921567	0.71864746	0.69876755	2.76629511
8.892829	0.72567809	0.70723301	2.541772554
9.16927782	0.73426952	0.71532028	2.580692281
9.44853335	0.74414243	0.72305183	2.834216138
9.48363624	0.74357432	0.72399431	2.633228323
9.83704137	0.7514937	0.73313989	2.442311297
10.1947305	0.76353132	0.74180314	2.845747182
10.5566528	0.76976905	0.750018	2.565839828
10.8308431	0.77533276	0.75590365	2.505905819
11.2930031	0.78543495	0.76522398	2.573220182
11.7615559	0.79285579	0.77397705	2.381107329
12.1409429	0.79947331	0.78060227	2.360433488
4.67848447	0.4717219	0.48681282	-3.199114012
4.87811882	0.48998322	0.50422835	-2.907268682
4.99922732	0.50240046	0.51425187	-2.358957288
5.203262	0.52103019	0.53028449	-1.776154346
5.36843733	0.53227287	0.54253369	-1.92773594
6.21965009	0.60530009	0.59694427	1.380442749
5.54930838	0.5568536	0.55525596	0.286905156
6.04608481	0.59173494	0.58690051	0.816992874
6.35089443	0.61283598	0.60422727	1.404734309
6.55685951	0.62020898	0.61515066	0.815583456
7.02821586	0.64716419	0.63805041	1.40826447
7.2947553	0.66086582	0.64985014	1.666856308
7.51035524	0.67044366	0.65885394	1.728665164
7.72803835	0.68067351	0.66749269	1.936438102
7.94778488	0.68949714	0.6757858	1.988599742
8.16957565	0.69799406	0.68375146	2.040504854
8.4496604	0.70817679	0.69327392	2.104400051
7.23048456	0.66073569	0.64707476	2.067533778
8.61921567	0.71669324	0.69876755	2.501165931
8.82415869	0.7215922	0.70515301	2.278183081
9.09990138	0.72949347	0.71333266	2.215347373
9.37845788	0.73710602	0.72115112	2.164531759
9.65980007	0.74444119	0.72862963	2.123949591

10.0153536	0.75640182	0.73752961	2.49499779
9.04798443	0.72612849	0.71182715	1.969532518
9.57158306	0.74211345	0.7263279	2.127107561
10.1049094	0.75678454	0.73968064	2.260075196
10.4657781	0.76336706	0.74800458	2.012462835
10.9227594	0.7742832	0.75781548	2.126833889
11.386205	0.78448643	0.76701843	2.226680634
11.7615559	0.79081338	0.77397705	2.128989323
11.9507475	0.79256506	0.77732995	1.922254232



Conclusion générale



CONCLUSION GENERALE

Notre étude concerne la contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée avec lit majeur rugueux. Cette étude a été divisée en quatre chapitres fondamentaux :

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

A cet effet notre partie bibliographique est subdivisée en deux chapitres fondamentaux :

Pour le premier chapitre d'intitulé le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire, à travers lequel on l'a divisé en trois axes :

- Le ressaut hydraulique classique, concernant les travaux de Hager (1990), En premier lieu, une classification de Peterka et Bradley a été présentée **(1957)** .L'auteur a noté que l'utilisation de la théorie d'Euler entre les deux sections du ressaut formé, sans frottement, conduit à l'approche de Bélanger qui une relation entre le rapport Y^* des hauteurs conjuguées et le facteur du nombre de Froude F_1 .
- Les travaux de l'auteur « *Rajaratnam en 1968* », effectué dans un canal rectangulaire avec lit rugueux, dans lequel la rugosité imposée relative ε / h_1 a été conçue entre de 0,02 à 0,43 et le nombre de Froude incident varie entre 3 à 10. Aussi un résultat obtenu qui montre que le rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 varie fonction du nombre de Froude incident F_1 et de la rugosité relative testées ε / h_1 . Il a été déduit également que la longueur du ressaut hydraulique avec lit rugueux est égale approximativement à la moitié que son homologue à fond lisse, pour des diverses

rugosités relatives dépassant 0.10, cela apparaît un avantage très significatif du ressaut hydraulique avec lit rugueux.

- Les travaux du ‘*Rajaratnam 2002*’ effectué dans un canal rectangulaire ondulé. Il a remarqué la réduction de la profondeur aval du ressaut.

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

- En premier lieu les travaux de Khattoui et Achour en 2012 concernant le ressaut hydraulique formé en canal rectangulaire de forme composée. Une relation fonctionnelle est de forme $\phi (Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$ sans tenir compte des forces de frottements. Une relation deuxième a été exposée y compris les forces de frottements. L’approche globale est fonction du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie.
- En second lieu, les travaux de ‘*F. Riguet et al 2019*’, apropos l’expérimentation faite au niveau du laboratoire (LARHYSS), ils ont constaté que l’effet des ouvertures h_1 sur la variation du rapport Y du ressaut hydraulique qui varie en fonction du nombre de Froude incident F_1 est perceptible.

L’étude s’est intéressée, ensuite à la variation du rapport Y qui varie en fonction du nombre de Froude F_1 pour différentes ouvertures pour les deux lits du canal rectangulaire de forme composée. Il a été remarqué que pour un nombre de Froude fixé F_1 , Y est plus important en lit majeur. Ils ont aussi noté aussi que des approches globales adimensionnelles ont obtenues qui montre la variation du rapport des hauteurs conjuguées variant en fonction du nombre de Froude

Pour le troisième chapitre intitulé protocole expérimentale qui se traduit comme suit :

Le protocole expérimental s’intéresse au ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince dans un canal rectangulaire de forme composée avec lit majeur rugueux. L’étude expérimentale a été menée sous cinq hauteurs initiales de l’écoulement : $h_1(\text{cm}) = 2; 2.5; 3; 3.5$ et 4 ont été testées. Quatre rugosités imposées au lit majeur du canal de valeurs absolues : $\varepsilon (\text{mm}) = 06 ; 08 ; 10$ et 12mm .

La formation du ressaut contrôlé est conditionnée par la mise en place d'un seuil à l'aval de l'écoulement. Des différents seuils avec différentes hauteurs ont été testés (8 cm au 21cm) pour la formation et le contrôle du ressaut.

Ainsi après l'obtention d'une configuration du ressaut contrôlé, nous effectuons, pour une hauteur initiale h_1 et une position x de seuil fixées, les opérations suivantes :

1. Lecture de la hauteur déversant h_{dev} du déversoir rectangulaire. (Photographie2)
2. Calcul du débit volume correspondant, par application de la relation du débitmètre rectangulaire (Hachemi, Rachedi L.2006) :

$$Q = 0.3794B\sqrt{2g\beta}(1 + 0.16496\beta^{2.0716})^{3/2}h_{dev}^{3/2}$$

Finalement le dernier chapitre de notre sujet de recherche , nous avons expérimenté le ressaut hydraulique évoluant dans canal rectangulaire de forme composée avec lit majeur rugueux. Cinq tapis rugueux ont été établies de rugosité suivante : $\varepsilon = 0\text{mm}$; $\varepsilon = 6\text{mm}$; $\varepsilon = 8\text{mm}$; $\varepsilon = 10\text{mm}$ et $\varepsilon = 12\text{mm}$.

L'analyse de toutes les mesures expérimentales obtenues pour le ressaut hydraulique évolué en canal rectangulaire composée avec lit majeur rugueux nous a donné les résultats suivants :

- ✓ des relations expérimentales explicites, sur la variation de la longueur relative de ressaut L_j/h_1 et celui du rouleau de surface L_r/h_1 dans le lit mineur et celle du lit majeur variant avec le nombre de Froude F_1 pour cinq valeurs de rugosité testées ont été obtenues.
- ✓ On a constaté que l'effet réducteur de la rugosité imposée au lit majeur, aux caractéristiques du ressaut hydraulique est perceptible au lit majeur que celui au lit mineur lisse.

Enfin, L'étude expérimentale a été portée sur la dissipation de l'énergie cinétique. Ceci est montré par le rendement hydraulique. Par conséquent, la variation du rendement η avec le nombre de Froude F_1 montre que la dissipation d'énergie cinétique est importante par la création du ressaut hydraulique évoluant dans ce type de banc d'expérimentation, engendrée primordialement par l'importance de la rugosité imposée au lit majeur du canal.

Finalelement, on recommanderait la continuité de ce genre de recherche future dans les canaux prismatiques ou non prismatiques à parois rugueuses, dans le but d'avoir d'autres approches empiriques permettant le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Achour, B., Dissipation D'énergie Par Ressaut, Thèse D'état. Université De Tizi-Ouzou, Institut De Génie-Civil, 1998.
- [2] Achour, B., (2000). Ressaut Hydraulique Dans Une Galerie Circulaire Brusquement Elargie. JHR 2000; 38(4): 307-311.
- [3] Achour, B., Debabeche, M., Ressaut Contrôlé Par Seuil Dans Un Canal Profile En U. Journal Of Hydraulicresearch, Vol. 41 (02), Pp. 97-103, 2003.
- [4] Debabeche, M., Ressaut Hydraulique Dans Les Canaux Prismatiques. Thèse De Doctorat D'état, Département d'Hydraulique, Université De Biskra, Algérie, 2003.
- [5] Debabeche, M., Kateb, S., Ghomri, A., "Etude Expérimentale Du Ressaut Hydraulique Dans Un Canal Triangulaire A Parois Rugueuses ", Larhyss Journal, N°05, Pp.187-196, Juin 2006.
- [6] Debabeche, M., Ghomri, A., Sahnoune, C., Ismail, K., "Effet De La Rugosité Sur Le Ressaut Hydraulique Dans Un Canal Profilé En U (Partie1) " Larhyss Journal, N° 04, Pp.107-118, Juin 2005.
- [7] Ghomri, A., Ressaut Hydraulique Contrôlé Par Seuil Evoluant En Canal Profilé En "U", Mémoire De Magister En Sciences Hydrauliques, Département d'Hydraulique, Université De Biskra, 2005.
- [8] Ghomri, A., Debabeche, M., Riguet, F., L'étude Semi Théorique Du Ressaut Hydraulique Evoluant En Canal Profilé En U A Fond Rugueux, Revues Des Sciences Fondamentales Et Appliquées, Centre Universitaire d'Oued Souf, N°01, Pp.40-57, 2009.
- [9] Ghomri, A., Debabeche, M., Riguet, F., Etude Expérimentale Du Ressaut Hydraulique Evoluant Dans Un Canal Profilé En U A Fond Rugueux , Revues Des Sciences Fondamentales Et Appliquées, Centre Universitaire d'Oued Souf, N°01, Pp.82-105, 2009.

- [10] Ghomri, A., Riguet, F., Contribution To The Experimental Study On The Hydraulic Jump Evolving In An U Shaped Channel With Rough Bed , Journal Of Fundamental And Applied Sciences, , Université El Oued, N°02, Pp.254-271,2010.
- [11] Khattaoui, M., Achour, B., (2012). Ressaut Hydraulique Dans Un Canal Rectangulairecomposé. Revue Scientifiqueet Technique LJEE N°20.
- [12] Kateb.S, Debabeche M, Zegait.Retbaouia K. (2018) ; Approcheexpérimentale De La Longueur Du Ressauthydrauliquedans Un Canal Triangulaire A Paroisrugueux ; Journal Of Advanced Research In Science And Technology JARST.
- [13] Rajaratnam, N., Hydraulic Jumps On Rough Beds, Transaction Of The Engineering Institute Of Canada, Vol. 11, N° A-2 May 1968.

A



N



N



E



X



E



A.1 Rapport (Y) des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude Fr :

La figure-A.1 représente la variation du rapport ($Y=h_2/h_1$) des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident Fr de l'écoulement incident, pour Cinq rugosités absolues :

ε (mm)= 0, 6, 8, 10,12. Cinq nuages de points distincts sont perceptibles, correspondant chacun à une rugosité absolue e . On constate que pour une rugosité absolue fixe, l'augmentation du nombre de Froude engendre celle e le rapport des hauteurs conjuguées.

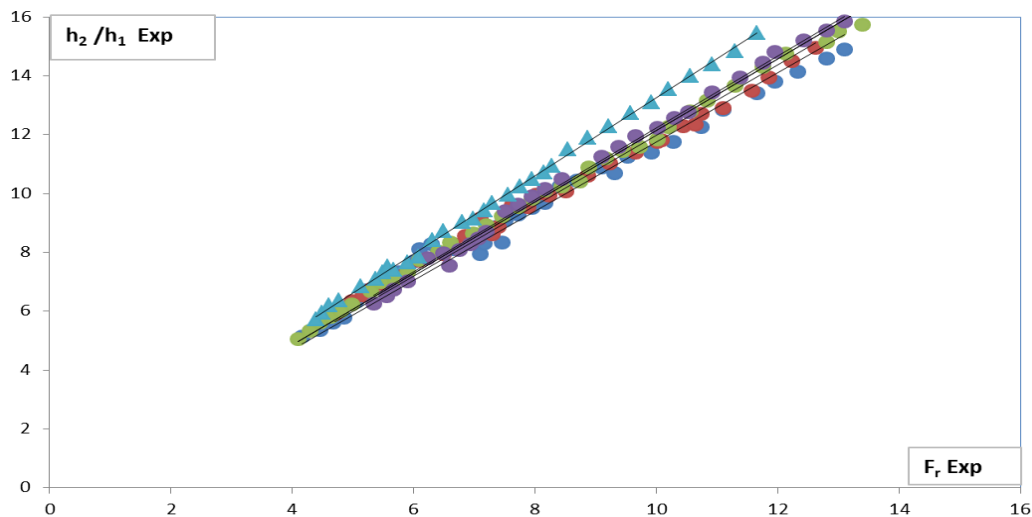


Figure A-9 la variation de la longueur h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude Fr

En outre, pour une valeur fixe du nombre de Froude incident, l'augmentation de la rugosité absolue provoque la diminution du rapport des hauteurs conjuguées.

Par ailleurs, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés non linéaire, montre que pour chaque rugosité absolue, un ajustement linéaire de la forme $h_2/h_1 = a.Fr$ est possible. La figure le montre bien. Le tableau : regroupe les valeurs du coefficient (a).

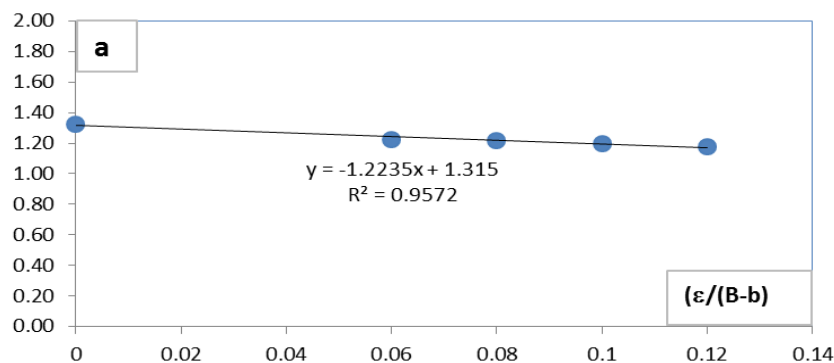
Tableau A-6 Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $h_2/h_1 = f(F_r)$

Rugosité	$\varepsilon/(B-b)$	Equation linéaire pour chaque allure= (a)	R ²
12	0.12	1.1756	0.979
10	0.1	1.198	0.987
8	0.08	1.2139	0.9952
6	0.06	1.2222	0.9962
0	0	1.3249	0.999

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

$$a = 1.315 - 1.2235x$$

Celle-ci est représentée dans la figureA.2

**Figure A-10 L’ajustement statistique des couples de valeurs (($\varepsilon/(B-b)$),a)**

$$h_2/h_1 = (-1.2235.(\varepsilon/(B-b))+1.315)*F_r$$

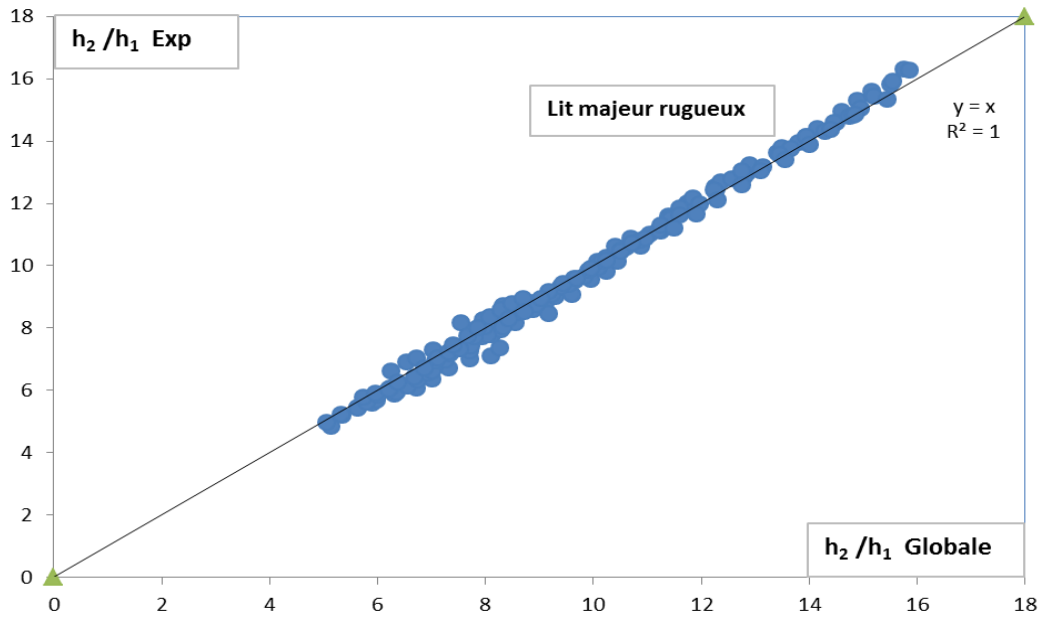


Figure A-11 représentation graphique de $(Y=h_2/h_1)$ expérimentale en fonction de $(Y=h_2/h_1)$ globale d'un lit majeur rugueux et celui de lit mineur lisse

A.2. Variation du coefficient C_r de résistance en fonction de la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$:

Pour trouver l'expression du coefficient C_r de résistance en fonction de la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$, nous allons représenter sur la figure, la variation du terme

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

en fonction de F_r^2 pour les quatre rugosités absolues (ε)

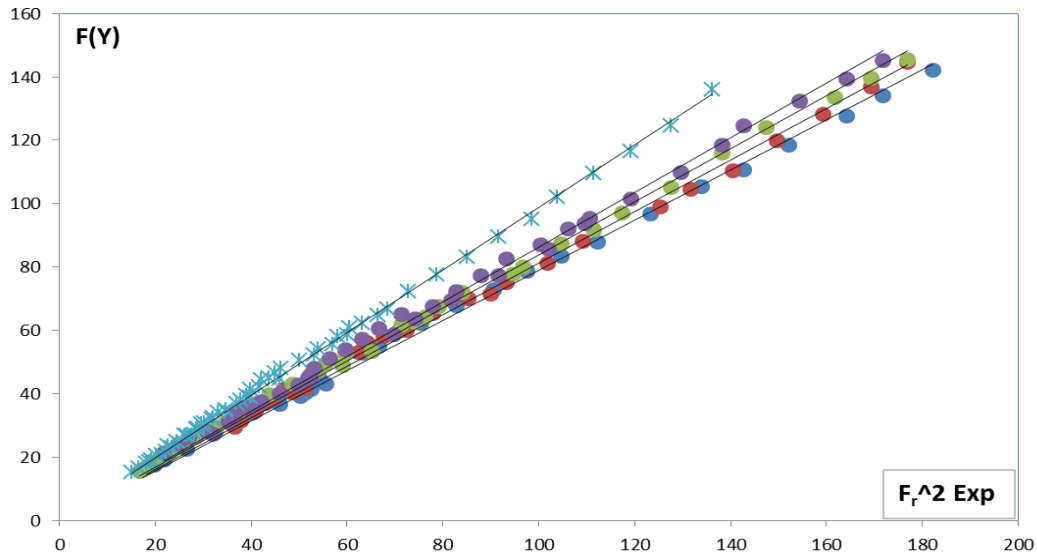


Figure A-12 la variation de la longueur $F(Y)$ en fonction du nombre de Froude F_r^2

La figure –A.4 montre quatre nuages de points différents, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$.

L'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut, montre que chaque nuage de points peut s'ajuster avec une relation de la forme :

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

Tableau A-7 Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $F(Y) = f(F_r^2)$

Rugosité	$\varepsilon/(B-b)$	(1-Cr)	Cr	R ²
12	0.12	0.7905	0.2095	0.9974
10	0.1	0.8118	0.1882	0.9963
8	0.08	0.8376	0.1624	0.9972
6	0.06	0.8623	0.1377	0.9972
0	0	0.9885	0.0115	0.9987

Le tableau montre que le coefficient **Cr** dû à la rugosité augmente avec l'augmentation de la rugosité relative $\varepsilon/B-b$. L'ajustement statistique des couples des valeurs

$(\varepsilon/(B-b), C_r)$ par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire d'équation :

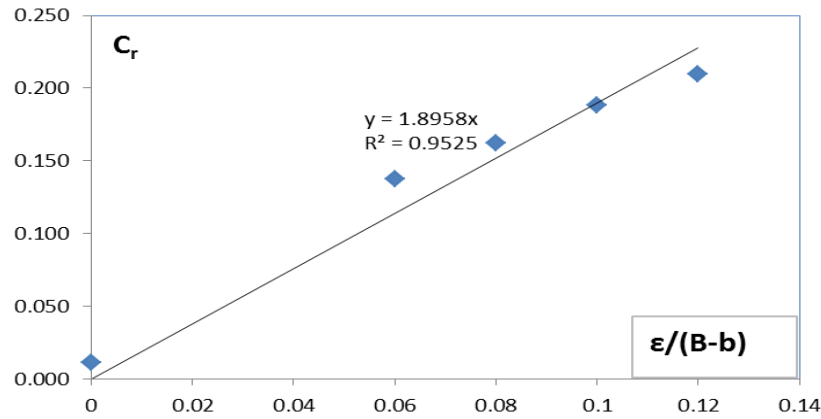


Figure A-13 L'ajustement statistique des couples de valeurs. $(\varepsilon/(B-b), C_r)$

$$C_r = 1,8958(\varepsilon/(B-b))$$

Celle-ci est représentée par la figure ci-dessous

En remplaçant le coefficient C_r par son expression dans la relation l'équation semi-théorique devient

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

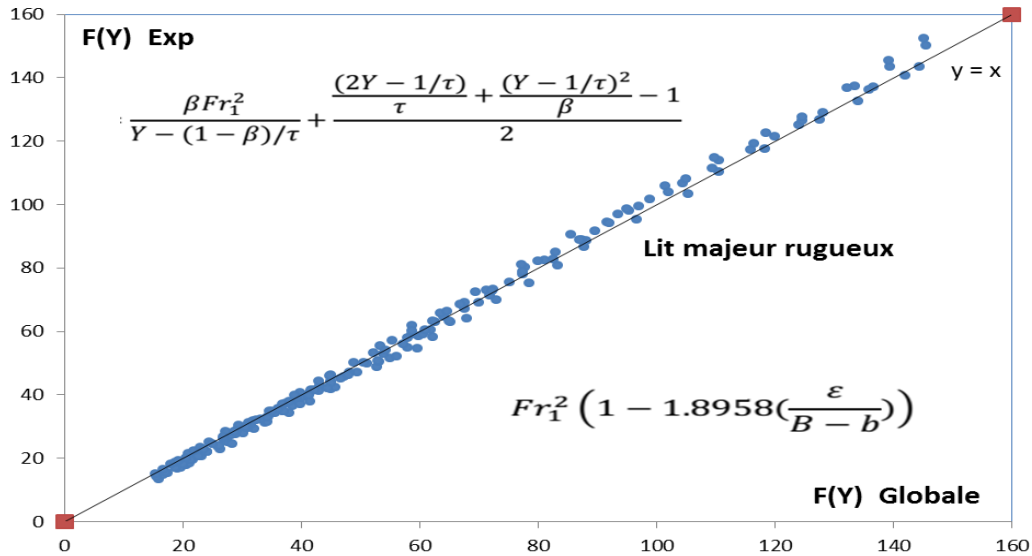


Figure A-14 Représentation graphique de $F(Y)$ expérimentale en fonction de $F(Y)$ globale d'un lit majeur rugueux

La figure-A.6 montre que la relation $f(Y) = \xi (\varepsilon/B-b, F_1)$ ajuste avec une bonne corrélation

les points de mesures expérimentales et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice, montrant par conséquent la fiabilité de la relation

A.3. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient C_r de résistance et du nombre de Froude incident Fr :

L'équation semi-théorique

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

étant implicite en Y , nous avons trouvé une relation approchée qui permet de trouver le rapport Y en fonction du coefficient C_r de résistance du lit majeur du canal rugueux et du nombre de Froude incident Fr de l'écoulement.

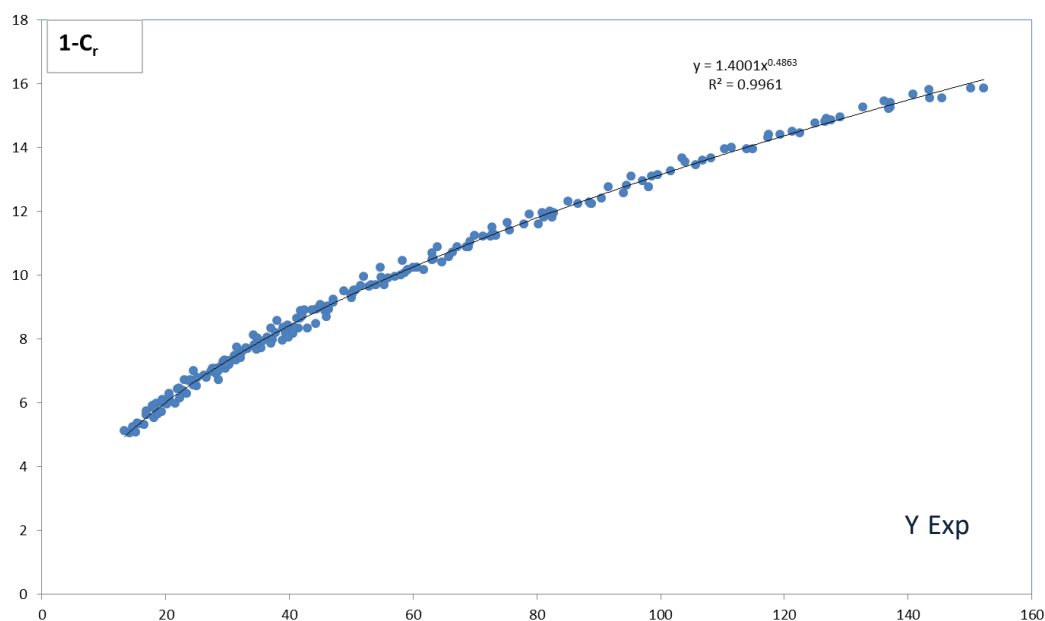


Figure A-15 la variation de (1-Cr) en fonction du Y Exp

La figure-A.7 montre un nuage de points qui suit parfaitement l'allure d'une courbe unique. L'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés non linéaire donne avec une très bonne corrélation la relation de type puissance suivante :

$$Y = 1.4001F_1^{0.957}(1 - Cr)^{0.4863}$$

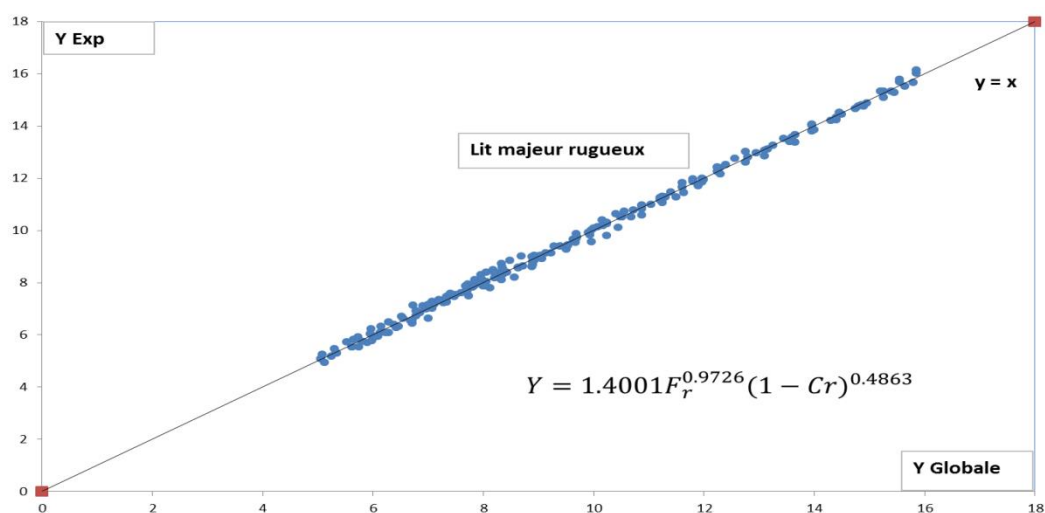


Figure A-16 Représentation graphique de Y expérimentale en fonction de Y globale d'un lit majeur rugueux

La figure-A.8 montre la comparaison entre Y expérimental et de l'équation semi-théorique. On remarque que le nuage de points suit parfaitement la première bissectrice ce qui justifie que la l'approche globale obtenue est acceptable et pourrait être appliquée au dimensionnement des bassins d'amortissement.

$$Y_{glob} = 1,4001 Fr_1^{0,96} \left(1 - 1,8958 \frac{\varepsilon}{B-b} \right)^{0,4863}$$