

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 Semi Théoriques Du Ressaut Hydraulique
Evoluant En Canal Rectangulaire De Section Composée Avec Lit Majeur
Rugueux**

Dirigé par :

L'encadreur GHOMRI Ali

Co encadreur AMMAR Abdesattar

Présenté par :

ZINE Abdessamie

CELGHOUM BRAHI

HOMMADI Ali

Promotion : Juin 2022

DEDICACE



Je dédie ce mémoire à :

☺ *Mes chers parents à qui je dois tout ce que j'ai acquis dans la vie, et que Dieu nous protège et nous accorde longue vie à tous*

☺ *Mes sœurs, à qui je souhaite beaucoup de réussites dans la vie*

☺ *Mes frères, auxquels je souhaite beaucoup de bonheurs dans la vie.*

☺ *Toute ma famille.*

☺ *Touts mes amis : garçons et filles et à tout le groupe hydraulique
Promotion 2022*

REMERCIEMENTS

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

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

A toute personne qui m'a aidé de près ou de loin pour l'élaboration de ce travail, un chaleureux merci à tous.

Je saisi cette occasion pour remercier ici l'ensemble des enseignants du département d'Hydraulique de l'Université d'El-Oued pour l'appui moral qu'ils m'ont témoigné ainsi que leur esprit d'amitié.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	
DEDICACES	
LISTE DES FIGURES.....	
LISTE DES TABLEAUX.....	
PRINCIPALES NOTATIONS.....	
RESUME.....	

INTRODUCTION GENERALE -----	1
-----------------------------	---

Première partie : Recherche bibliographique

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

Chapitre I

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

I.1. INTRODUCTION.....	5
I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE.....	5
I.1.2. Les différentes configurations du ressaut classique.....	6
I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	7
I.2.3. Les caractéristiques du ressaut.....	7
I.2.3.1. Longueur du ressaut.....	7
I.2.3.2. Longueur du rouleau de surface.....	8
I.2.4. Rendement du ressaut hydraulique.....	9
I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A FOND RUGUEUX.....	10
I.3.1. L'approche de RAJARATNAM (1968).....	10
I.3.1.1. Le Protocol d'expérimentation.....	10
I.3.1.2. Discussion des résultats obtenus.....	10

I.3.1.2.1. La hauteur caractéristique du ressaut hydraulique h_2	10
I.3.1.2.2. La longueur du rouleau de surface.....	12
I.4. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE AVEC LIT ONDULE.....	13
I.4.1. L'approche de RAJARATNAM (2002)	13
I.4.1.1. Le protocole expérimental.....	13
I.4.1.2. Discussion des Résultats obtenus.....	14
I.5. CONCLUSION.....	17

Chapitre II

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée

II.1. INTRODUCTION :.....	19
II.2. APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR 2012.....	19
II.2.1. Les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique	19
II.2.2. Le rendement du ressaut hydraulique	22
II.3. L'ETUDE EXPERIMENTALE DES CARACTRISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSEE.....	24
II.3.1. La problématique.....	24
II.3.2. Analyse des essais expérimentaux.....	25
II.3.3. Résultats expérimentaux.....	26
II.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	26
II.3.3.2 Les caractéristiques du ressaut hydraulique.....	27
II.3.3.2.1 La longueur relative L_j/h_1 du ressaut varie en fonction du nombre de Froude F_1 ..	27
II.3.3.2.2 La longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface varie en fonction du nombre de Froude F_1	28
II.4. CONCLUSION.....	29
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE -----	31

Deuxième partie : Etude expérimentale

INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE-----	33
--	----

Chapitre I

Description du canal expérimental

I.1. INTRODUCTION.....	36
I.2. Appareil de mesures.....	36
I.3. APPAREILLAGES DE MESURE.....	38
I.3.1. Procédure de mesure des débits	38
I.3.2. L'appareil Limnimétrique.....	39
I.4. APERÇU DES ESSAIS EXPERIMENTAUX.....	40
I.4.1. Protocole expérimental des essais.....	40
I.4.2. Mode de préparation de la rugosité équivalente.....	42
I.5. CONCLUSION.....	44

Chapitre II

Étude de l'approche semi théorique

II.1. INTRODUCTION.....	46
II.2.POSITION DU PROBLEME.....	46
II.3.DESCRPTION DES ESSAIS.....	47
II.3.1.Procédure expérimentale des essais.....	47
II.4.Mode de préparation de la rugosité utilisée.....	49
II.5. ETUDE SEMI-THEORIQUE.....	50
II.5.1. Analyse théorique.....	50
II.5.2. Les conditions d'application de l'équation de quantité de mouvement.....	51
II.6. RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	52

II.6.1. Variation du coefficient C_r de résistance en fonction de la rugosité relative ($\varepsilon/B-b$)...	52
II.6.2. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient C_r de résistance et du nombre de Froude incident F_1	54
II.7. CONCLUSION.....	56
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE	57
CONCLUSION GENERALE.....	58
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	61

LISTE DES FIGURES

Première partie

Chapitre I

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

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

Chapitre II

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée

Figure 2.1: Configuration du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée.....	19
Figure 2.2: Le rapport de Y, calculé par (2.4), varie en fonction de F_1 . (— — —) : $\beta = 1$	21
Figure 2.3: Le rapport de Y varie en fonction de F_1 . (o): expression (2.6), (+) : expression (2.4).....	22
Figure 2.4: Variation du η en fonction de F_1 . (— —) : $\beta=1$. Y est calculé par l'équation (2.7).....	23
Figure 2.5: Variation de η en fonction de F_1 . (o) : équation (2.7), (*) avec frottement.....	23
Figure 2.6: Configuration du ressaut contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire de forme composée.....	24
Figure 2.7: Le canal ayant servi à l'expérimentation.....	26

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.....	27
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 le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes de rouleur de surface.....	28
Figure 2.10: Représentation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude F_1 , (o)les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur.(—) Courbes d'ajustement.....	29

Deuxième partie

Chapitre I

Description du canal expérimental

Figure 1.1: Le canal d'expérimentation.	36
Figure 1.2: Schématisation de déroulement de l'expérimentation..	37
Figure 1.3 : Une pompe axiale.	37
Figure 1.4: La vanne de régulation du débit.	37
Figure 1.5: Le déversoir rectangulaire avec contraction latérale pour mesurer les débits pompés.....	38
Figure 1.6: Schéma de définition de la deuxième partie du canal avec déversoir, <i>Hachemi, 2007</i>).	38
Figure 1.7: La profondeur d'eau mesuré par pointe limnimétrique..	39
Figure 1.8: Les ouvertures (h_1 (cm) = 02 ; 02.5 ; 03 ; 03.5 et 04).....	40
Figure 1.9: Les parois minces pour contrôler la formation du ressaut..	40
Figure 1.10: Le ressaut hydraulique dans un canal composé avec lit mineur rugueux. a) Vue à l'amont du ressaut. b) Vue à l'aval du ressaut.....	42
Figure 1.11: Les tapis rugueux imposés au lit mineur du canal composé : a) canal avec fond lisse. b) canal avec fond rugueux.	43
Figure 1.12: Les tapis rugueux divers, (a) la méthode de conception des tapis rugueux ; (b) les divers tapis rugueux.	43

Chapitre II

Étude de l'approche semi théorique

Figure .2.1 :Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince en canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux.....	48
Figure 2.2 : Photographie du canal ayant servi à l'expérimentation.....	48
Figure 2.3 : Déversoir rectangulaire utilisé aux mesures des lames déversantes.....	49
Figure 2.4 :Photographie d'un tapis rugueux soigneusement collé sur le lit majeur du canal rectangulaire de section composée.....	50
Figure 2.5 : Photographie des quatre tapis rugueux : $\varepsilon=06$ mm, $\varepsilon=08$ mm, $\varepsilon=10$ mm et $\varepsilon=12$ mm.....	51
Figure 2.6 : Schéma de définition du Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux.....	51
Figure .2.7 : Variation de $f(Y)$ en fonction de F_1^2 , pour quatre rugosités relatives : $\varepsilon(\text{mm})=(\times)06, (\square) 08, (o) 10$ et $(\Delta)12$. (—) Courbe d'ajustement.....	53
Figure2.8 : Variation du coefficient Cr en fonction de la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$	54
Figure 2.9 : Variation de $f(y_1, y_2)$ en fonction de la relation $F_1^2 (1-1.896(\varepsilon/B-b))$ (Δ)Points de mesures expérimentales (-----) première bissectrice.....	55
Figure 2.10 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de $F_1^2 (1-Cr)$. ($\square$) Points de mesures expérimentales. (—) Courbe d'ajustement.....	56
Figure 2.11 : Comparaison entre Y expérimental et de l'équation semi-théorique (8). ($\square$)Points de mesures expérimentales. (—) Courbe d'ajustement	57

LISTE DES TABLEAUX

Deuxième partie

Chapitre II

Tableau 2.1: Coefficient Cr des courbes d'ajustement	54
---	----

PRINCIPALES NOTATIONS

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

P_2	Pression hydrostatique appliquée à la section aval du ressaut	[Pa]
Q	Débit volume	[m ³ /s]
q	Débit unitaire	[m ² /s]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
R_h	Rayon hydraulique	[m]
s	Hauteur d'un seuil	[m]
V	Le volume du liquide	[m ³]
V_1 et V_2	Vitesses moyennes au pied et à la fin de ressaut	[m/s]
ϖ	Poids spécifique du liquide	[N/m ³]
X	Coordonnée longitudinale	[m]
X	Position d'un seuil	[m]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées	[-]
Y^*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
β	Rapport de l'élargissement	[-]
τ	Rapport des hauteurs	[-]
λ	Fonction seulement de la rugosité relative	[-]
λ_B	Longueur relative du bassin	[m]
λ_S	Position relative du seuil	[m]
λ_r^*	La variation de la longueur relative du rouleau	[m]
η	Rendement du ressaut	[-]
η^*	Rendement du ressaut classique	[-]
ε	Rugosité absolue	[mm]
Δt	Le temps de variation	[s]
ρ	Masse volumique	[Kg/m ³]
ν	Viscosité cinématique	[m ² /s]
m	Cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du triangle par rapport à l'horizontal	[-]

ملخص

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

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

Résumé

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

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

Abstract

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

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

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 et de rouleau de surface et celle du ressaut hydraulique, 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 est caractérisé principalement par les deux hauteurs conjuguées, initiale et finale tel que sa longueur du rouleau de surface.

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

Ce présent mémoire a pour but d'étudier, l'approche théorique du ressaut hydraulique contrôlé par une paroi mince qui se forme en canal rectangulaire 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 sujet a été présenté.

Notre mémoire est scindé principalement en deux parties fondamentales :

- ✓ La première partie concernera une étude bibliographique à travers laquelle nous passerons en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique qui sont proches à notre sujet de recherche.
- ✓ La seconde partie concernera notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux, d'un point de vue théorique expérimental.

INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE

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

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

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

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

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

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

Chapitre I

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

I.1. INTRODUCTION

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

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

I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

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

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

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

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

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

I.1.2. Les différentes configurations du ressaut classique

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

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

Figure 1.1.d.

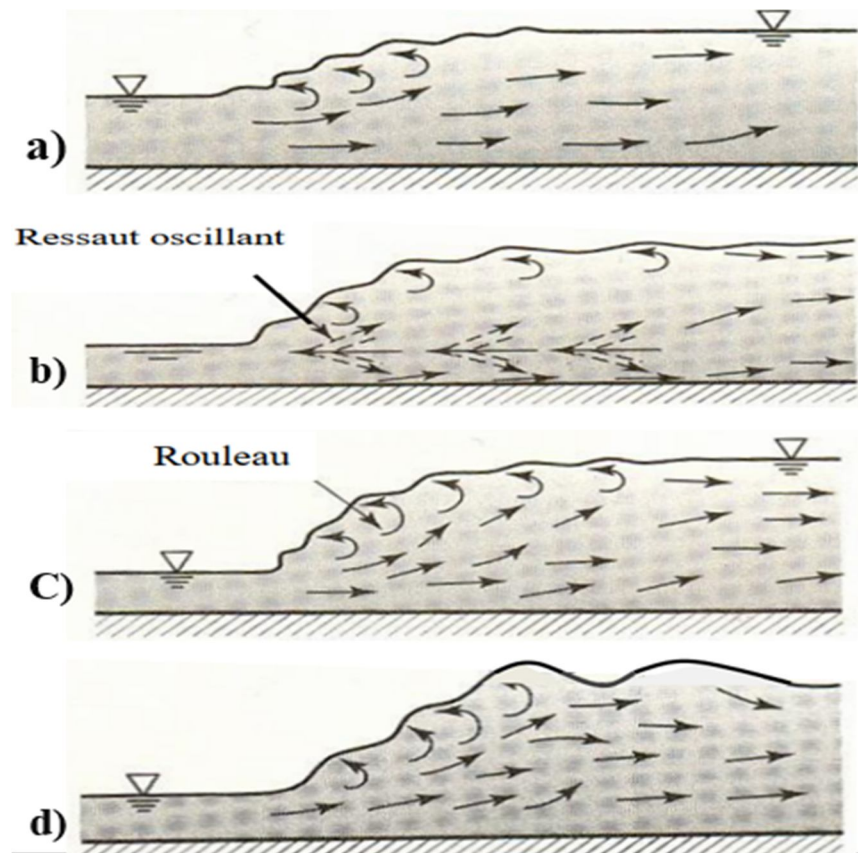


Figure 1.1 : Les différentes configurations du ressaut classique selon *Peterka et Bradley (1957)*. a) Pré-ressaut, b) Ressaut de passage, c) Ressaut stable, d) Ressaut clapoteux.

I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

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

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

$$Y^* = h_2^*/h_1 = 0.5[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1] \quad (1.2)$$

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

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

I.2.3. Les caractéristiques du ressaut

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

I.2.3.1. Longueurs du ressaut

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

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

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

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

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

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

I.2.3.2. Longueur du rouleau de surface

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

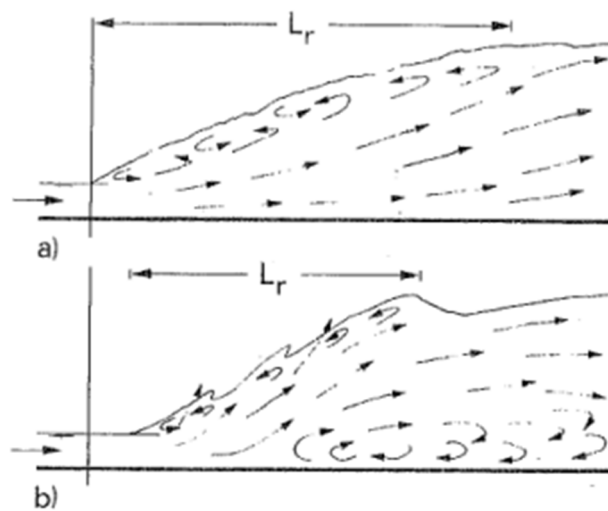


Figure 1.2: Configuration du ressaut hydraulique. a) rouleau de surface développé. b) rouleau de surface non développé.

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

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

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

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

« Tgh » indique la tangente hyperbolique.

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

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

I.2.4. Le Rendement du ressaut hydraulique

Le cas du canal de forme rectangulaire :

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

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

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

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

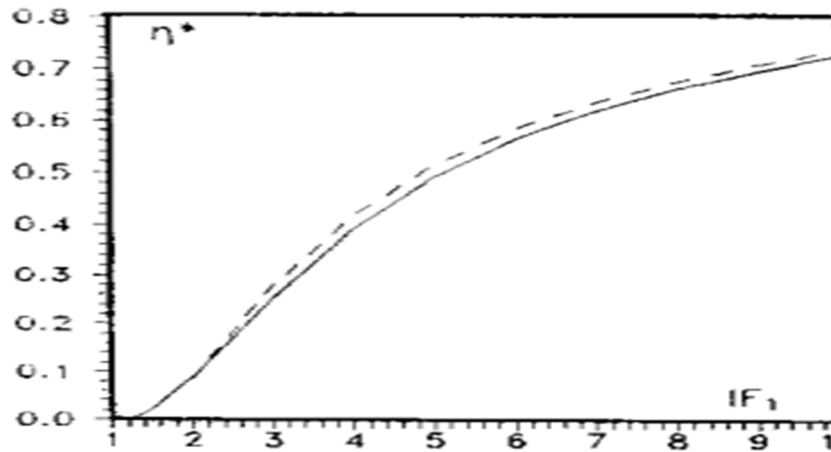


Figure 1.3: Le rendement η^* du ressaut classique qui varie en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbe tracée selon la relation (1.9). (---) Courbe tracée selon la relation (1.10).

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

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

I.3.1. L'Approche de RAJARATNAM (1968)

I.3.1.1. Le Protocol d'expérimentation

L'expérimentation a été faite dans un canal rectangulaire de largeur 0,311m, 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 du rouleau de surface sont très crédibles, cependant que les mesures de la longueur du ressaut hydraulique sont moins fiables.

I.3.1.2. Discussion des résultats obtenus

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

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

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

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

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

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

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

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

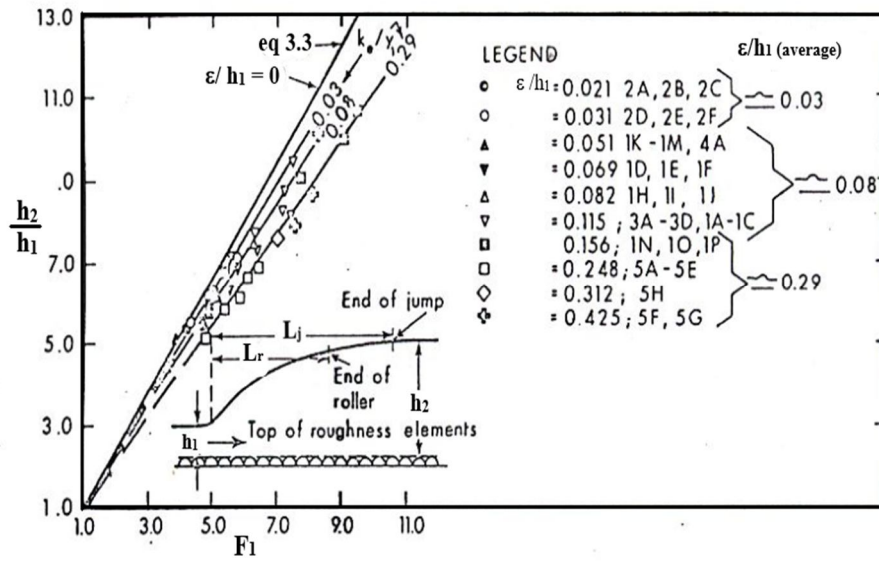


Figure 1.4: Variation de $y = h_2 / h_1$ en fonction de F_1 .

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

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

$$h_2/h_1 = 1.22 F_1 - 0.24 \quad \text{pour } \varepsilon/h_1 = 0.08 \quad (1.14)$$

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

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

$$h_2/h_1 = 1.41 F_1 - 0.5 \quad (1.15)$$

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

$$\frac{h_2}{h_1^*} = \lambda \left[\frac{\varepsilon}{h_1} \right] \quad (1.16)$$

Avec λ varie en fonction de la rugosité relative. Pour les différentes valeurs de ε/h_1 dans l'équation (1.14), λ devient égal respectivement à 0,92 ; 0,864 et 0,78. Les résultats obtenus

sont injectés dans la Figure (1.5) qui montre la variation de h_2/h_2^* en fonction de ε/h_1 et une courbe moyenne peut être tracée comme résultat premier. Les différentes valeurs indiquées auparavant sont montrées également sur la Figure (1.5).

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

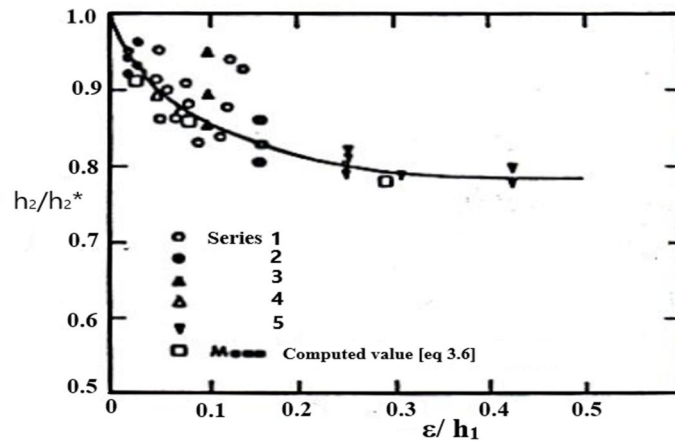


Figure 1.5: Variation de h_2/h_2^* en fonction de ε/h_1 .

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 (1.6, 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.

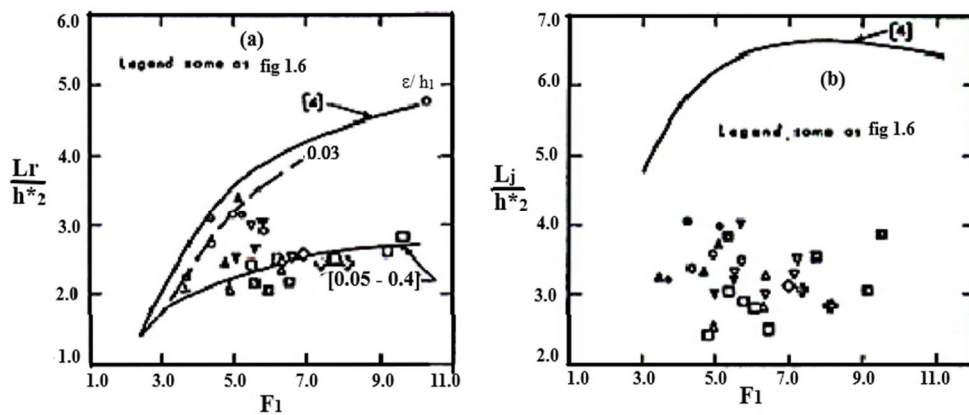


Figure 1.6: La variation de la longueur relative des caractéristiques du ressaut : (a) L_r/h_2^* en fonction de F_1 ; (b) L_j/h_2^* en fonction de F_1 .

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

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

I.4.1.1. Le protocole expérimental

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

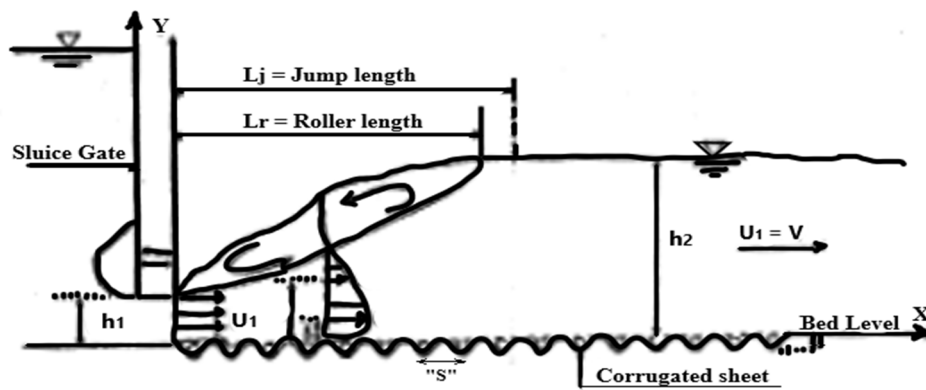


Figure 1.7: Configuration du ressaut hydraulique avec lit ondulé.

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 située entre 50800 et 206756. Différentes valeurs de l'ondulation sous forme des rugosités relatives, qui sont définies comme le rapport entre l'épaisseur de l'ondulation "t" et de la profondeur h_1 de valeurs 0,50 ; 0,43 et 0,25 sont testées expérimentalement.

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

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

I.4.1.2. Discussion des Résultats obtenus

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

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

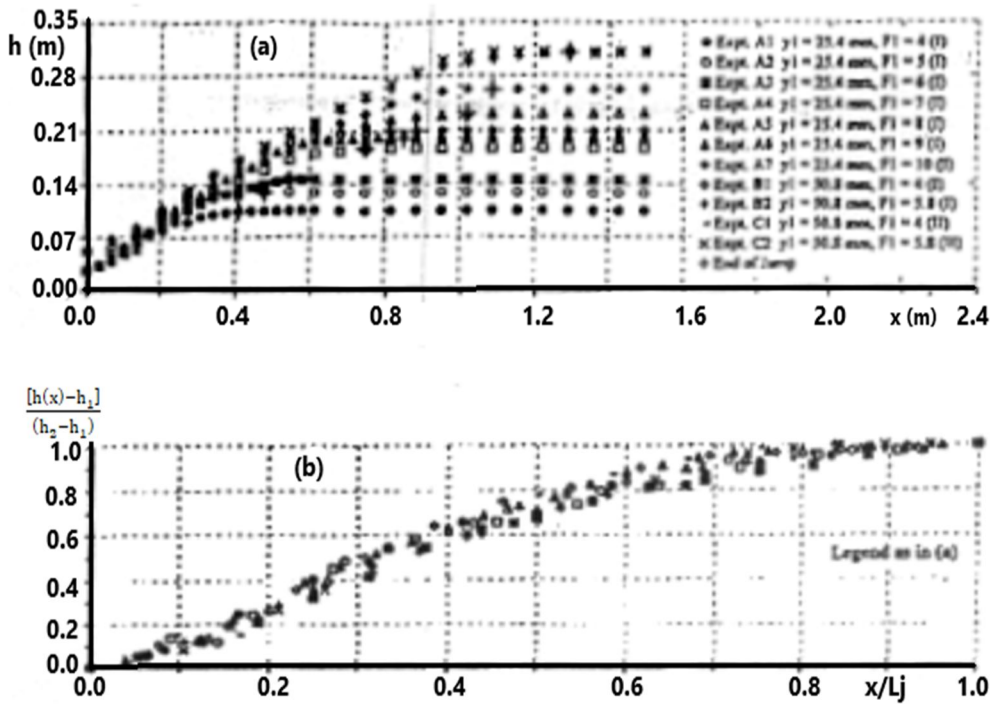


Figure 1.8: (a) Configuration de surface du ressaut hydraulique ; (b) Profil généralisé de surface du ressaut hydraulique.

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

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

Avec : ρ (kg.m^{-3}) : masse volumique du liquide et ν ($\text{m}^2. \text{S}^{-1}$) : viscosité cinématique du liquide. La relation (1.18) peut être réécrite comme suit :

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

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

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

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

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

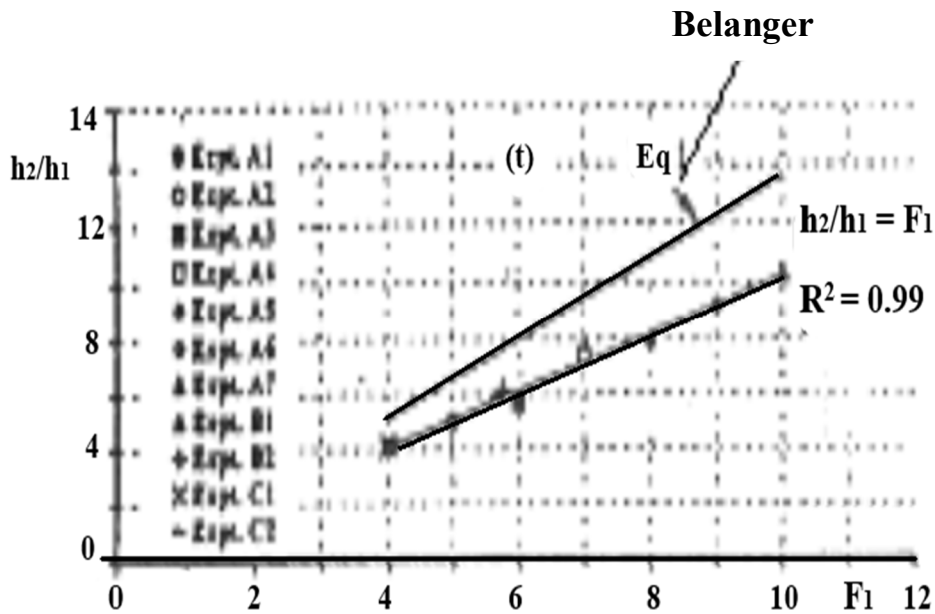


Figure 1.9: Variation de $\frac{h_2}{h_1}$ en fonction du nombre de Froude F_1 .

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

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

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

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

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

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

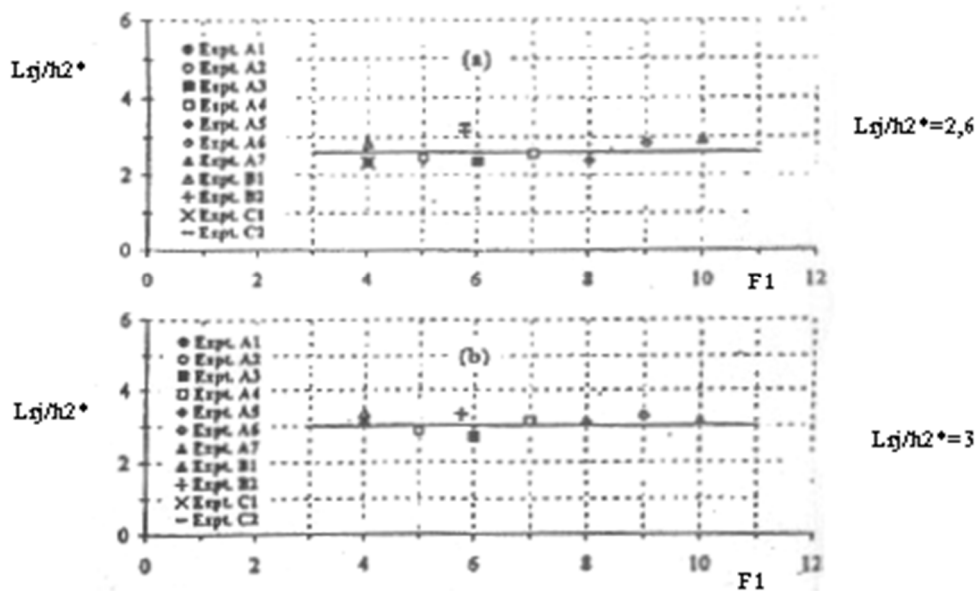


Figure 1.10: Configuration de la longueur relative du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude F_1 .

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

I.5. CONCLUSION

En se basant sur les résultats obtenus des mesures expérimentales par *Rajaratnam en 1968* et pour les différents ressauts contrôlés et créés dans le banc d'expérimentation de forme rectangulaire à pente nulle avec un fond rugueux, dans lequel la rugosité imposée relative 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 en 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 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 fond lisse, pour des diverses rugosités relatives dépassant 0.10, cela apparait un avantage très significatif du ressaut hydraulique avec lit rugueux.

Chapitre II

Ressaut hydraulique dans un canal
rectangulaire de section composée

II.1. INTRODUCTION :

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

II.2. APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR 2012

II.2.1. Les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique :

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

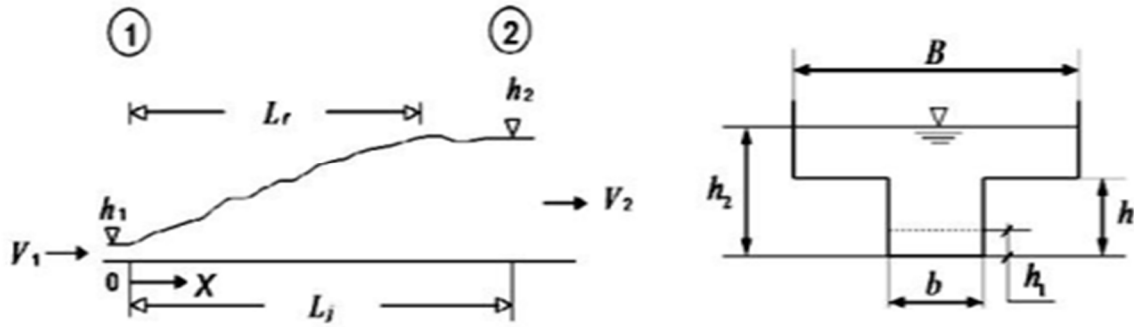


Figure 2.1: Configuration du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée

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

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

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

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

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

Tenant compte de l'expression de f_x , l'équation de la quantité de mouvement d'Euler se transforme comme suit :

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

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

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

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

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

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

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

Ou :

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

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

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

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

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

$Y^3 + pY + q = 0$ Dont la solution se fait facilement par l'utilisation le procédé trigonométrique.

La variation de Y calculé par l'équation (2.6) en fonction de F_1 est montrée par la figure (2.2). En faisant changer l'une des deux variables, 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 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,

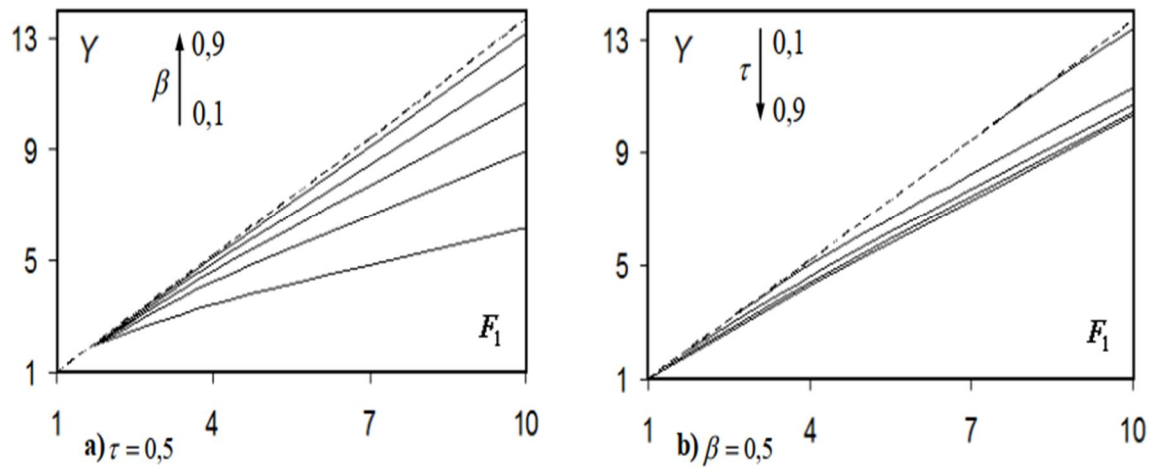


Figure 2.2: Le rapport de Y , calculé par (2.4), varie en fonction de F_1 . (— — —) : $\beta = 1$.

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

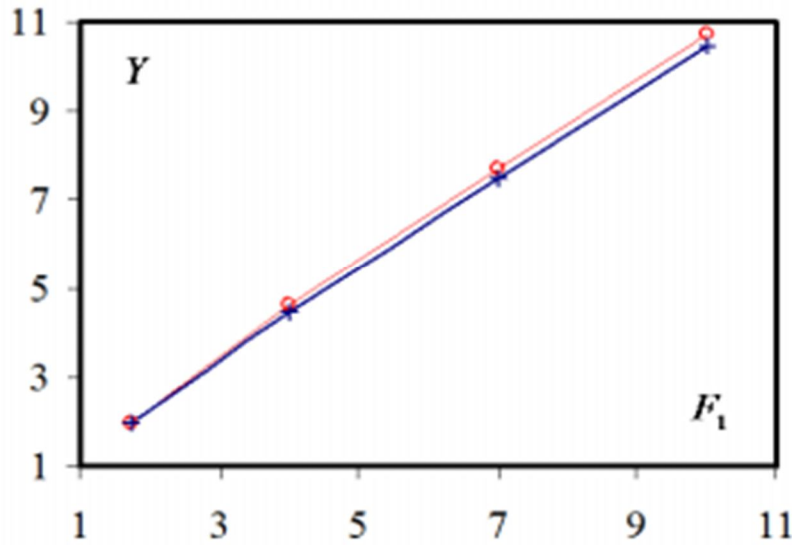


Figure 2.3: Le rapport de Y varie en fonction de F_1 . (o) : expression(2.6), (+) : expression(2.4).

II.2.2. Le Rendement du ressaut hydraulique :

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

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

Cette relation (2.7) permet de calculer explicitement, le rendement du ressaut hydraulique qui se produit en canal rectangulaire de forme composée, en connaissant F_1 , Y , 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 qui augmente avec l'accroissement de τ .

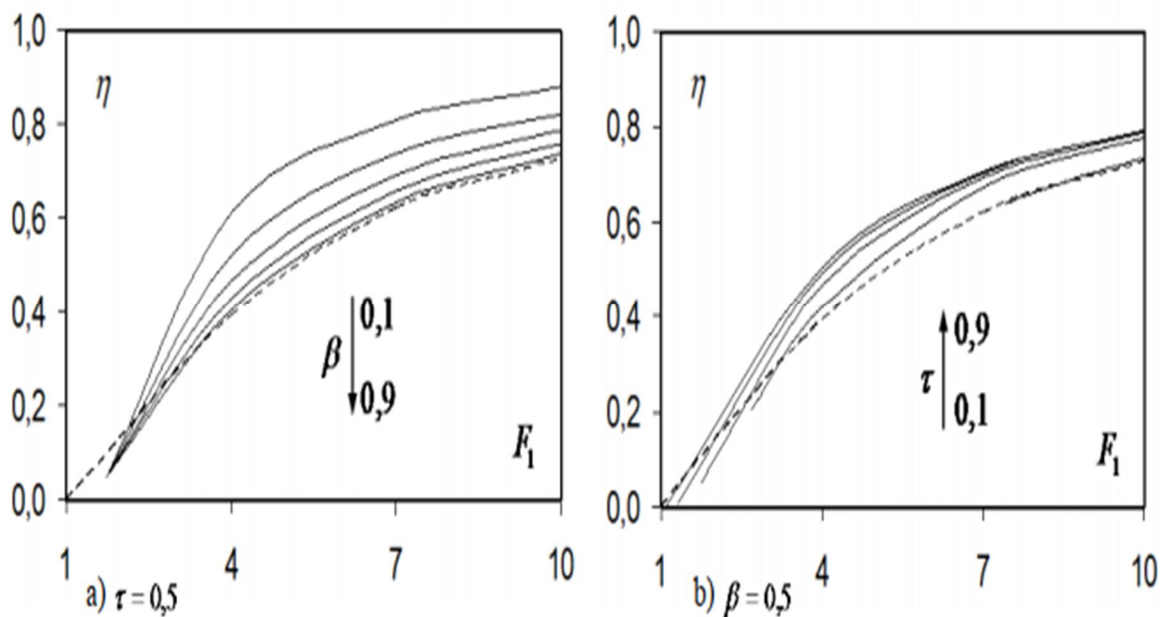


Figure 2.4: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 .

(- - -) : $\beta=1$, 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 calculés en tenant compte de la force de frottement dépassent ceux calculés sans frottements.

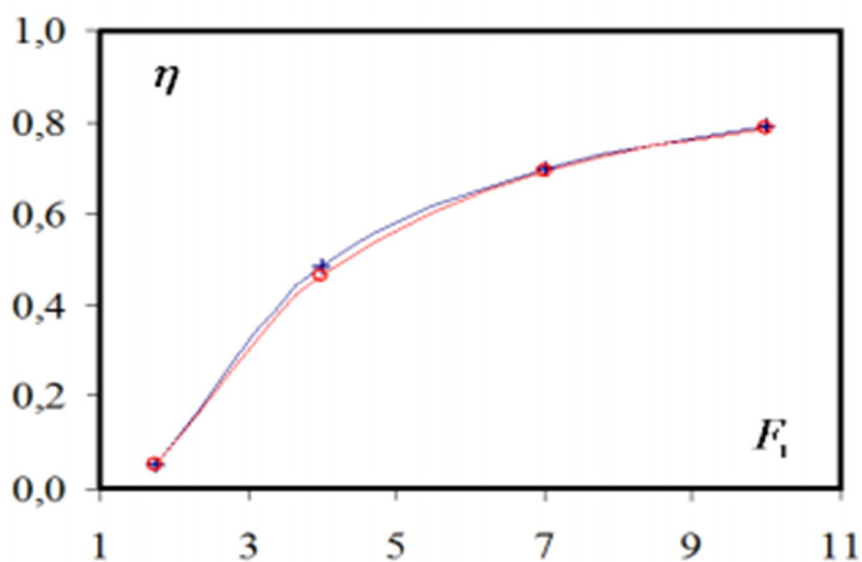


Figure 2.5: Variation de η en fonction de F_1 . (o) : équation (2.7), (*) avec frottement.

II.3. L'ETUDE EXPERIMENTALE DES CARACTÉRISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE ÉVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE

II.3.1. La problématique

Des différentes configurations du ressaut hydraulique peuvent être présentées, avec la modification des conditions à l'amont tel que débits, hauteurs etc... et à l'aval tel que le type d'obstacle, sa position, etc. Le ressaut s'appelle classique quand il se forme dans un canal rectangulaire de pente nulle ou faible, sans obstacle à l'aval. Il s'appelle contrôlé quand sa création est conditionnée par un obstacle mis à l'aval de l'écoulement. Il s'appelle forcé quand il se crée de part et d'autre de l'obstacle. L'évolution du ressaut hydraulique peut être formé dans des canaux non prismatiques ou prismatiques, avec lit rugueux ou lisse. Il s'agit pour notre cas le ressaut hydraulique formé par seuil Minc évoluant dans un canal de forme composée avec des différentes ouvertures h_1 (Figure 2.6). Pour une ouverture initiale h_1 donné, l'évolution du débit engendre le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation aussi de la longueur de 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 seuil premier de hauteur « s » doit être augmenté. Par conséquent pour chaque nombre de Froude incident F_1 , correspond la longueur du ressaut L_j et la longueur du rouleau de surface L_r , ainsi pour une hauteur h_2 à l'aval du ressaut hydraulique et une hauteur du seuil « s » (Figure 2.6).

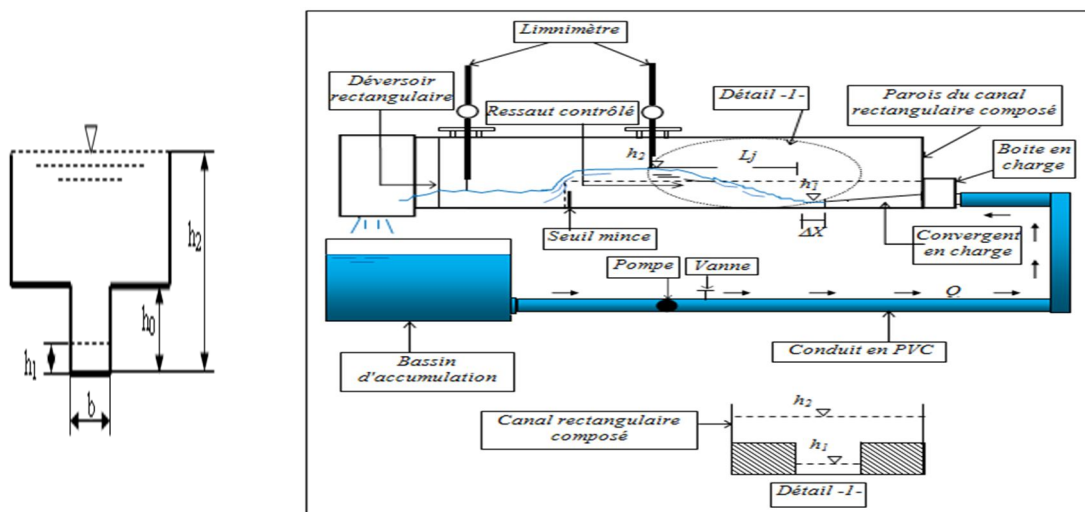


Figure 2.6: Configuration du ressaut contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire de forme composée.

II.3.2. Analyse des essais expérimentaux

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

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

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

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

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

OÙ :

Q : Le débit volumique en (m^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).

3. Le nombre de Froude se calcule, par application de l'expression (2.8).
4. La lecture de la hauteur aval h_2 du ressaut hydraulique.



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

II.3.3. Résultats expérimentaux

II.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées

Y est le rapport de la hauteur aval du ressaut h_2 sur la hauteur amont h_1 tel que $Y = h_2/h_1$. La figure ci-dessous représente la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut variant en fonction du nombre de Froude F_1 , pour cinq ouvertures h_1 : 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 et 4 cm pour le lit mineur et celui majeur du canal rectangulaire de forme composée.

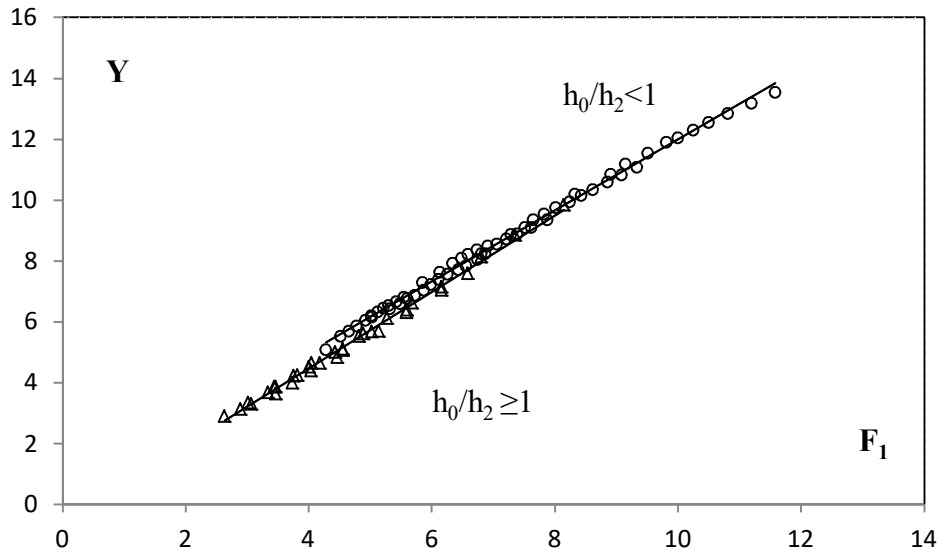


Figure 2.8: Le rapport des hauteurs conjuguées Y varie en fonction de Froude F_1 pour le canal composée. (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustements.

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

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

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

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

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

II.3.3.2. Les caractéristiques du ressaut hydraulique

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

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

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

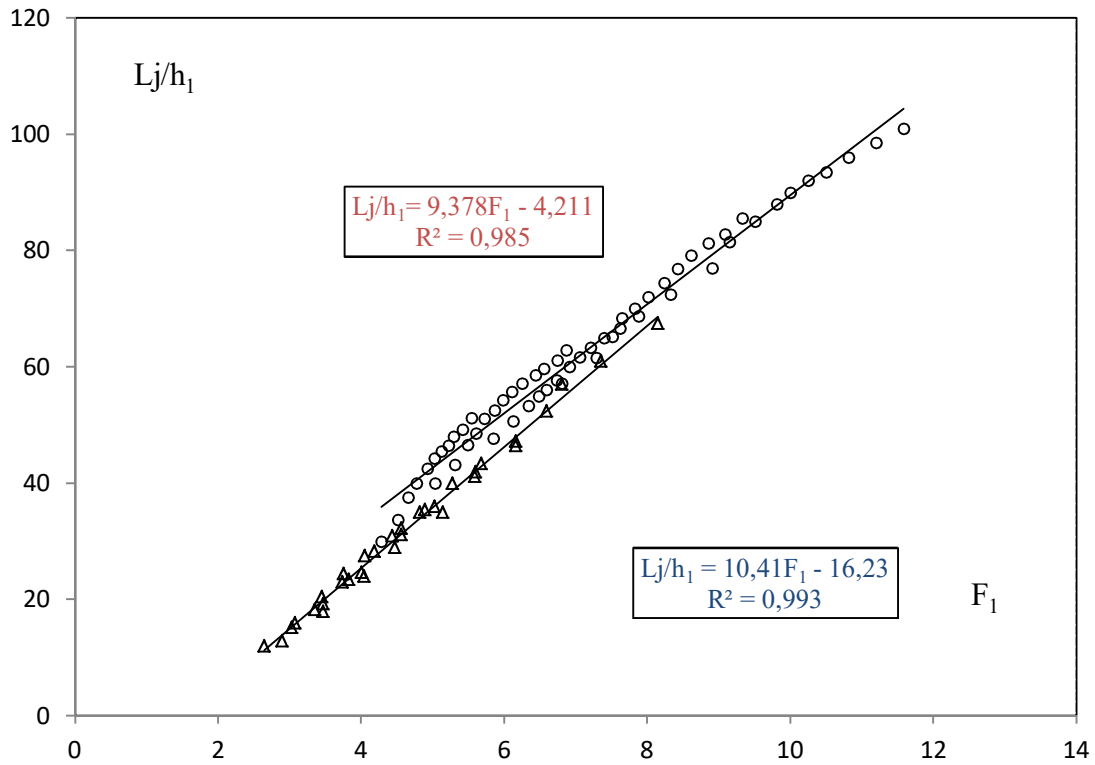


Figure.2.9 : La représentation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude F_1 ,

(o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur.

(—) Courbes d'ajustement de surface.

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

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

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

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

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

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

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

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

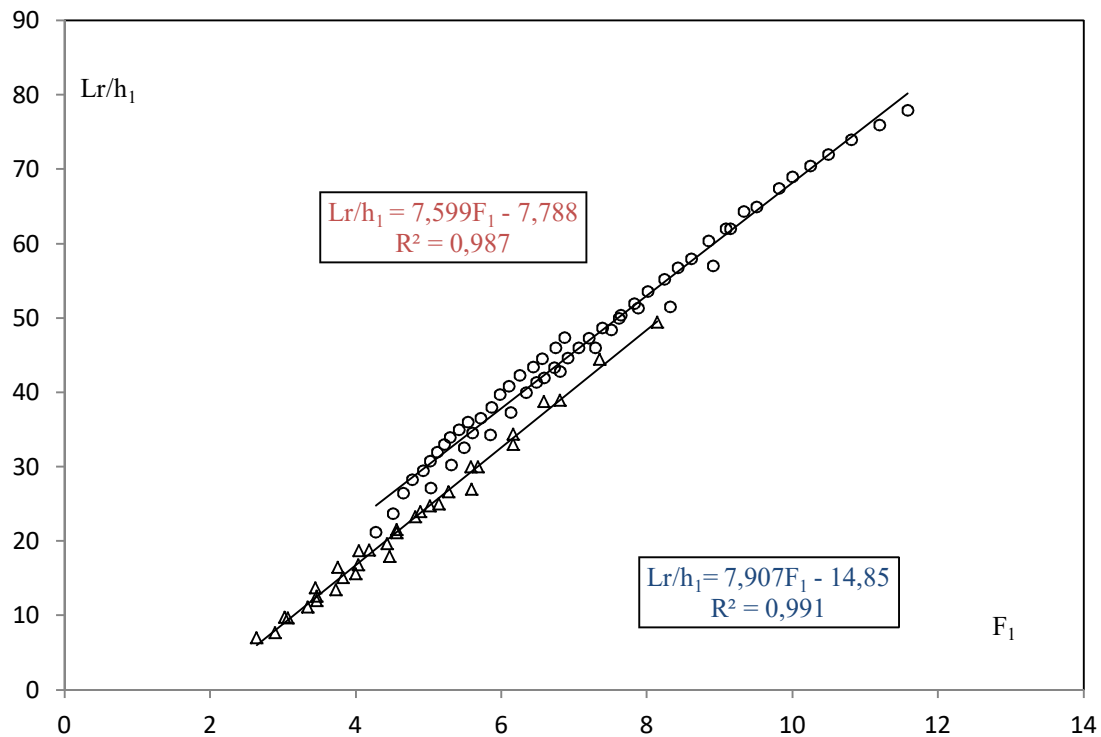


Figure 2.10: Représentation de la longueur relative Lr/h_1 du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude F_1 , (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.

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

II.4. CONCLUSION

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

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

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

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

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

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

A cet effet notre partie bibliographique est subdivisée en 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)*, 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 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 crée 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.

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

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

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

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

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

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

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE

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

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

La deuxième partie de ce mémoire est subdivisée en deux chapitres.

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

DEUXIEME PARTIE
ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre I

Description du canal expérimental

I.1. INTRODUCTION

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

I.2. Appareil de mesures

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



Figure 1.1: Le canal d'expérimentation.

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

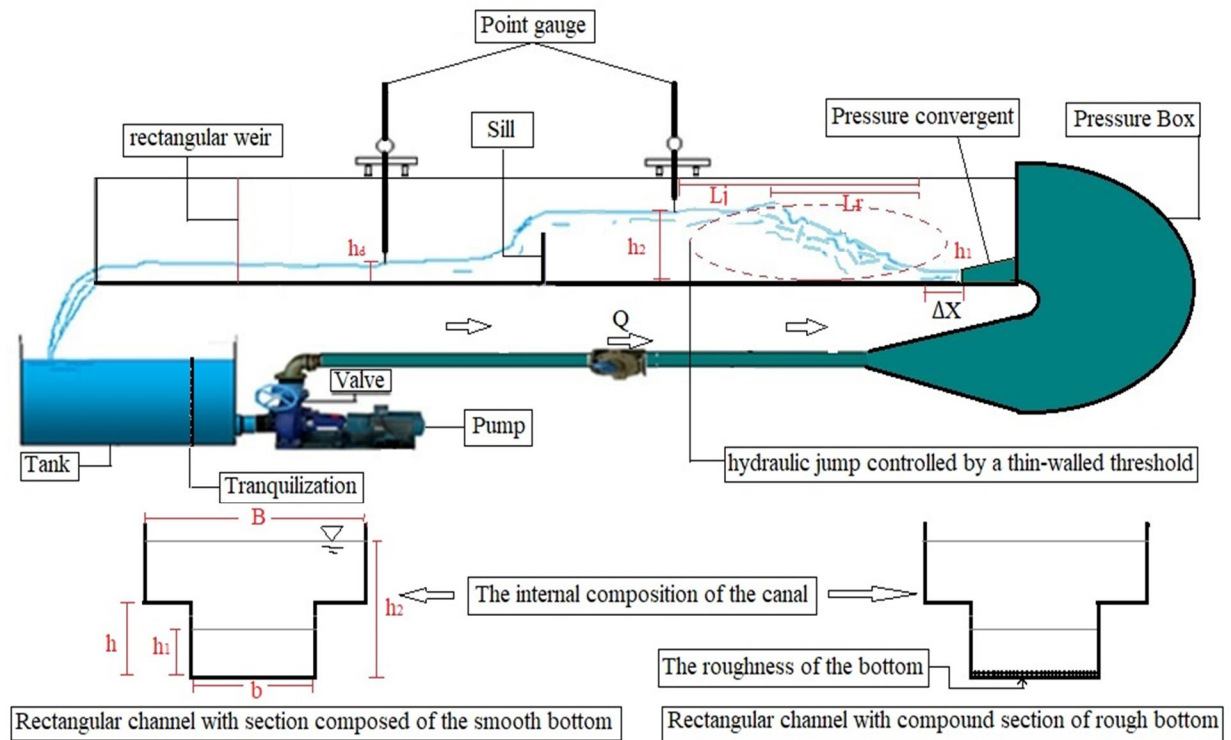


Figure 1.2: Schématisation de déroulement de l'expérimentation.



Figure 1.3 : Une pompe axiale.



Figure 1.4: La vanne de régulation du débit.

I.3. APPAREILLAGES DE MESURE

I.3.1. Procédure de mesure des débits

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



Figure 1.5: Le déversoir rectangulaire avec contraction latérale pour mesurer les débits pompés.

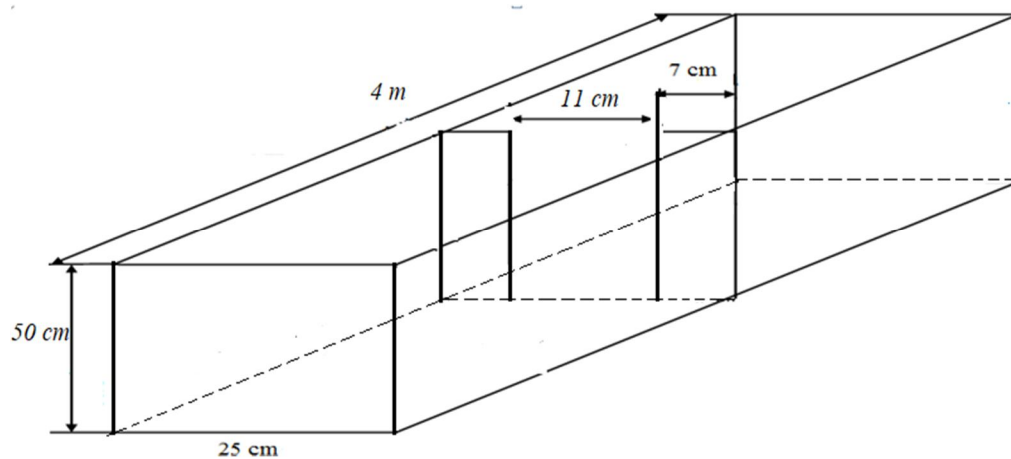


Figure 1.6: Schéma de définition de la deuxième partie du canal avec déversoir, *Hachemi, 2007*.

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

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

Avec :

Q : Le débit spécifique en (m^3/s).

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

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

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

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

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

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

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

I.3.2. L'appareil Limnimétrique

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

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

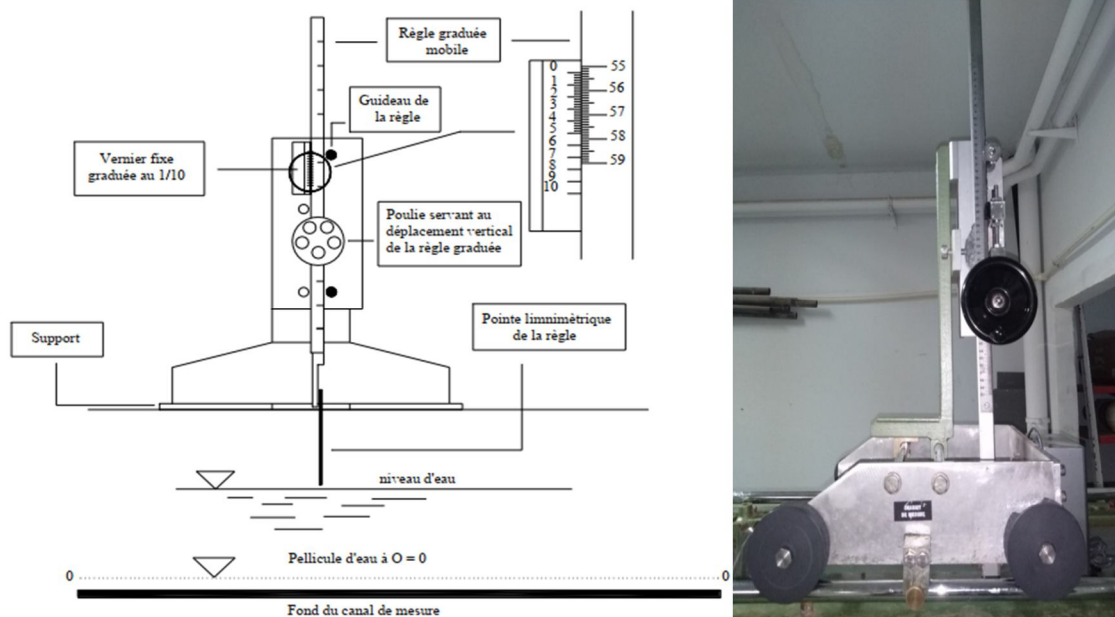


Figure 1.7:La profondeur d'eau mesurée par pointe Limnométrique.

I.4. APERÇU DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

I.4.1. Protocole expérimental des essais

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

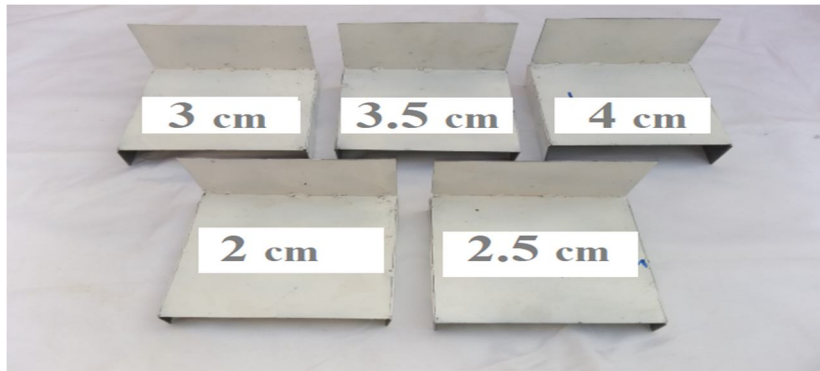


Figure 1.8: Les ouvertures (h_1 (cm) = 02 ; 02.5 ; 03 ; 03.5 et 04).

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



Figure 1.9: Les parois minces pour contrôler la formation du ressaut.

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

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

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

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

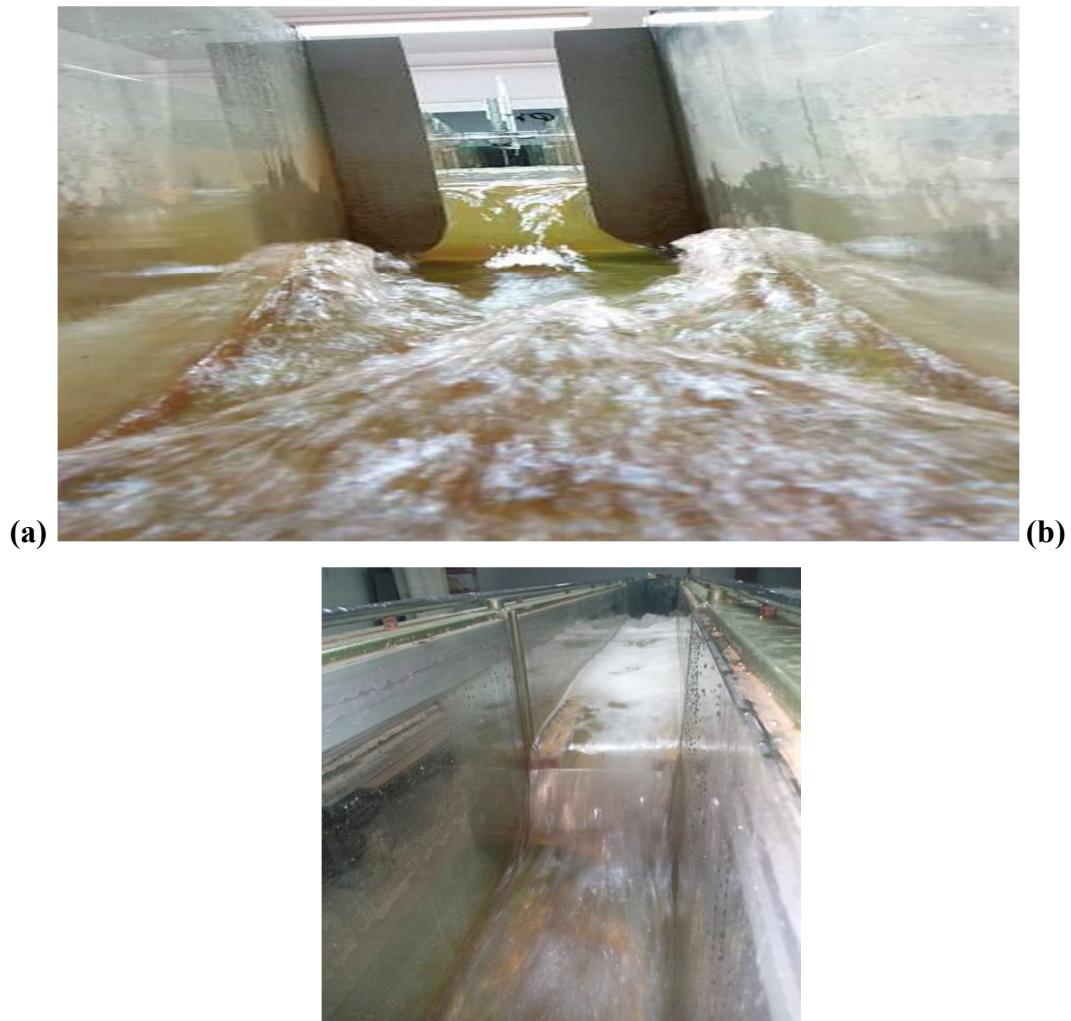


Figure 1.10: Le ressaut hydraulique dans un canal composé lisse.

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

I.4.2. Mode de préparation de la rugosité équivalente

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

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

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



Figure 1.11: Les tapis rugueux imposés au lit majeur du canal composé.

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

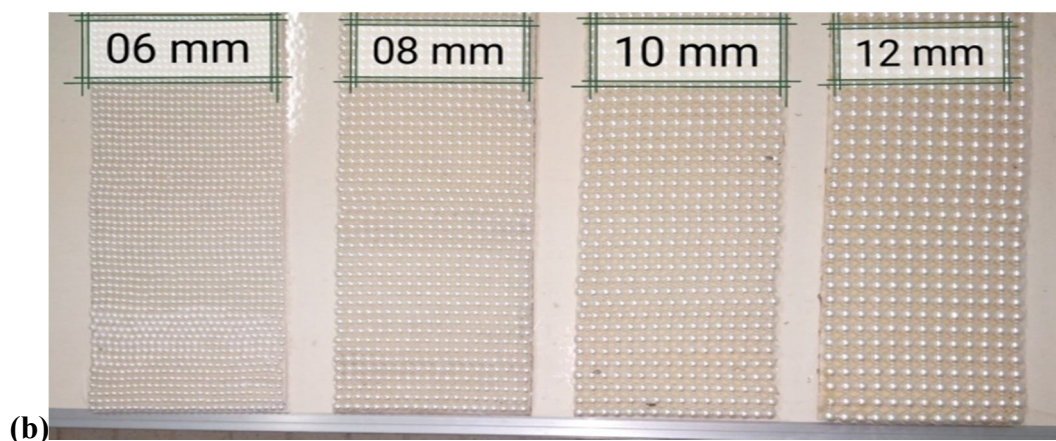
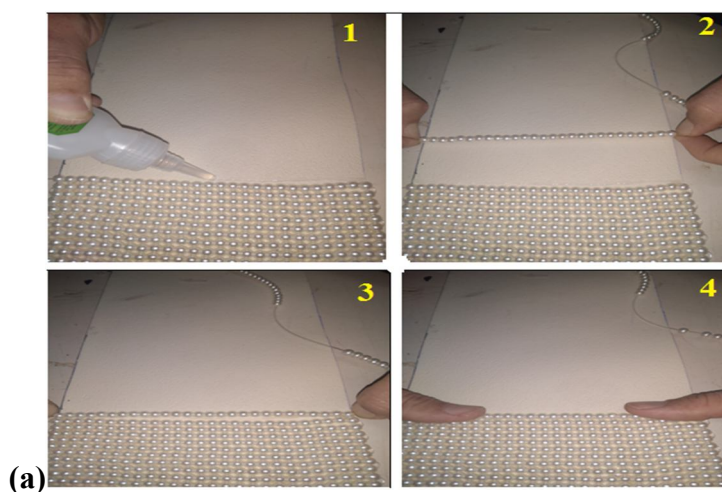


Figure 1.12: Les tapis rugueux divers

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

I.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exposé le banc expérimental utilisé à l'aide des diverses photographies. Nous avons aussi expliqué la procédure de l'utilisation des appareils permettant de mesurer les caractéristiques du ressaut hydraulique.

Pour les mesures de débit, nous avons utilisé le débitmètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de *Hachemi Rachedi L (2006)*.

Finalement, nous avons expliqué clairement la méthode de préparation des divers tapis rugueux qui s'imposent au lit majeur du canal.

Chapitre II :

étude de l'approche semi théorique

II.1. INTRODUCTION

Cette étude a pour objectif d'étudier et d'analyser l'approche semi théorique régissant le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux. Un développement semi théorique doit être établi sous forme d'une relation f telle que $f(Y, F_1, Cr, \beta, \tau) = 0$, avec Y qui est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, F_1 est le nombre de Froude incident, $\tau = h_1/h$: Rapport de forme, $\beta = b/B$: Rapport de l'élargissement et Cr est le coefficient de résistance, qui exprime l'effet de la rugosité du lit majeur de canal de section composée sur le ressaut hydraulique.

II.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.

Pour 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 qui s'intéressent 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 : $F_1^2 = Q^2 / (gb^2 h_1^3)$
- Le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut.
- Cr est le coefficient de résistance dû à la rugosité imposée au lit majeur de la section composée du canal d'expérimentation.

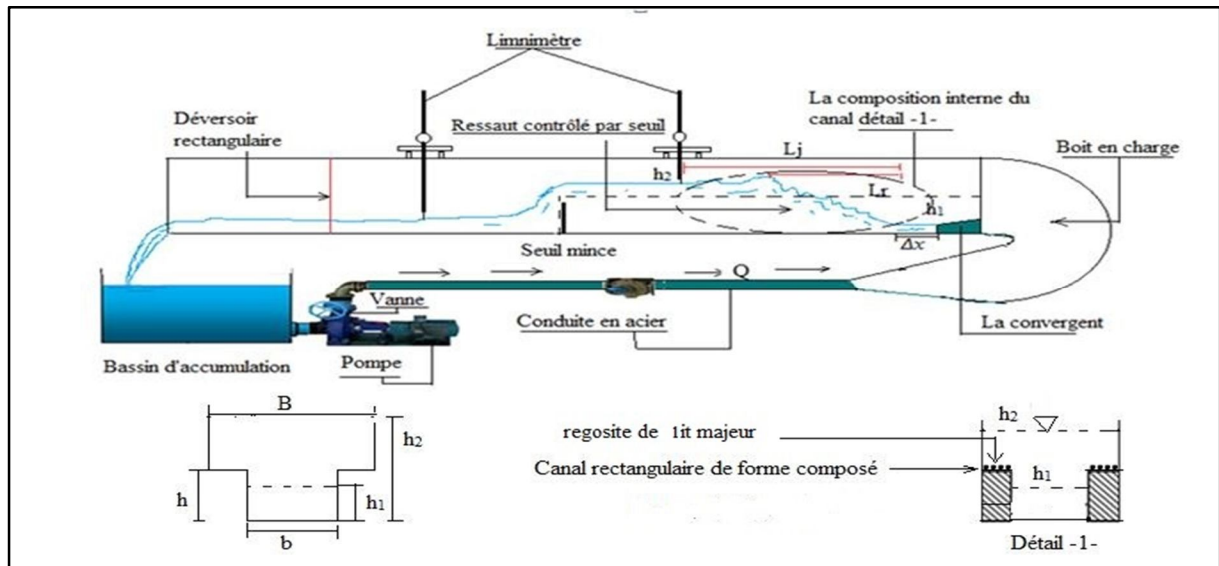


Fig.2.1. Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince en canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux.



Fig 2.2 : Photographie du canal ayant servi à l'expérimentation

II.3. DESCRIPTION DES ESSAIS

II.3.1. Procédure expérimentale des essais

L'expérimentation s'est intéressée 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 expérimentées. Quatre rugosités ont été testées 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. **(Photographie 2.3)**
2. Calcul du débit volume correspondant, par application de la relation du débitmètre rectangulaire (Hachemi, Rachedi L.2006) :

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

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(1).

4. Mesure de la hauteur finale h_2 du ressaut.



Fig 2.3. Déversoir rectangulaire utilisé aux mesures des lames déversantes.

II.4. Mode de préparation de la rugosité utilisée

Afin d'obtenir un lit majeur rugueux, avec une répartition uniforme de la rugosité, nous avons procédé les étapes suivantes :

1. Choisir le diamètre de boules en plastique de mercure de gamme entre 06 et 12 mm
2. Nous avons collé des boules en plastique sur un tapis de manière linéaire et régulière, placé sur quatre mètres du canal d'essai. La position des boules nous permet d'obtenir un tapis rugueux uniforme.
3. Le tapis rugueux obtenu, est ensuite soigneusement collé sur le lit majeur du canal rectangulaire de section composée.
4. Les rugosités obtenues sont : $\varepsilon=06$ mm, $\varepsilon=08$ mm, $\varepsilon=10$ mm et $\varepsilon=12$ mm



Fig. 2.4. Photographie d'un tapis rugueux soigneusement collé sur le lit majeur du canal rectangulaire de section composée.

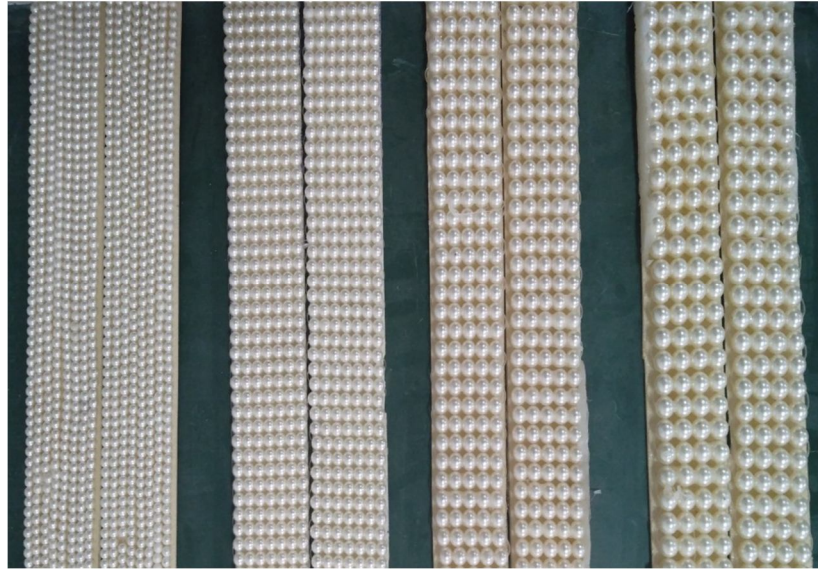


Fig. 2.5. Photographie des quatre tapis rugueux : $\varepsilon=06$ mm, $\varepsilon=08$ mm, $\varepsilon=10$ mm et $\varepsilon=12$ mm

II.5. ETUDE SEMI-THEORIQUE

II.5.1. Analyse théorique

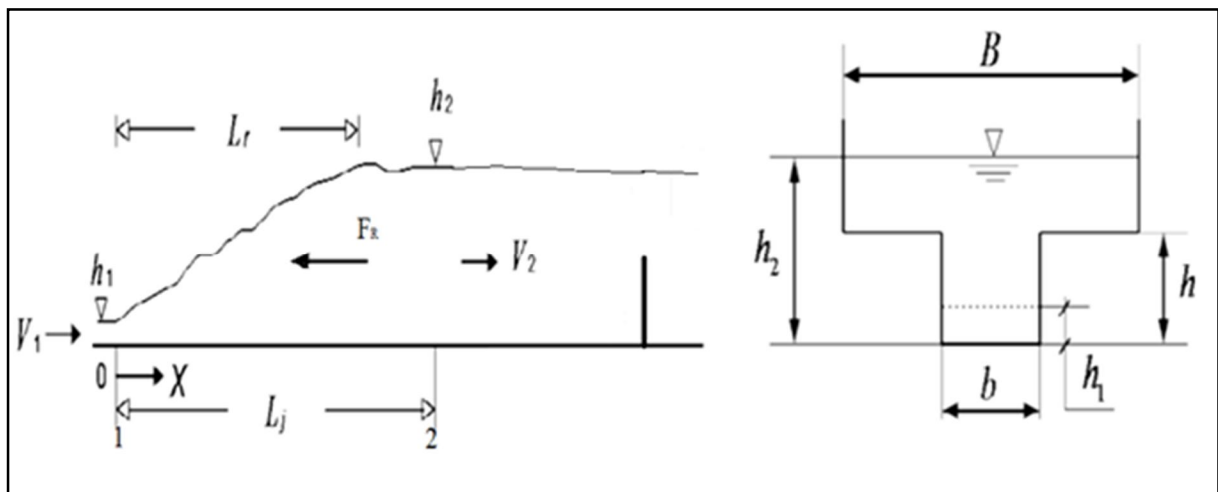


Fig.2.6 : Schéma de définition du Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux.

La Figure 2.6 montre un ressaut contrôlé par seuil à paroi mince évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée avec lit majeur rugueux. Le seuil dénuyé est placé à l'extrémité aval du canal, afin de surélever le plan d'eau à l'aval. h_1 et h_2 représentent les hauteurs conjuguées respectivement de la section initiale et finale du ressaut. L'écoulement étant en régime torrentiel à l'amont et fluvial à l'aval.

II.5.2. Les conditions d'application de l'équation de quantité de mouvement

- La répartition hydrostatique des pressions, dans les sections amont et aval ;
- La pente du canal est faible ou presque nulle ;
- La résistance de l'air est négligeable, l'écoulement est permanent.

L'équation de la quantité de mouvement appliquée entre le pied et la fin du ressaut, s'écrit comme suit :

$$\rho Q (P_2 V_2 - P_1 V_1) = f_1 - f_2 \quad (2.2)$$

En tenant compte de f_R , l'équation d'Euler devient :

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

Les sections A_1 et A_2 sont données respectivement par : $A_1 = bh_1$ et $A_2 = B(h_2 - h) + bh$.

Les forces F_1 et F_2 sont données respectivement par :

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

F_R est la force de résistance due à la rugosité du lit majeur du canal, dont l'expression est la suivante :

$$f_R = C \rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) (B - b)$$

Où :

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

L_j : Longueur du ressaut (m) ;

C : coefficient dû à la rugosité ;

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

ρ : Masse volumique du liquide ($kg/(m^3)$) ;

Q : débit volume (m^3/s)

On remplace les surfaces et les forces par leurs expressions, l'équation (2.3) s'écrit après le réarrangement comme suit :

$$2F_1^2 \left(1 - \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{L_j C}{h_1} \cdot \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \right) - \frac{\beta}{Y - (1 - \beta)/\tau} \right) = \frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} - 1 \quad (2.4)$$

En remplaçant $\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{L_j C}{h_1} \cdot \left(\frac{1}{\beta} - 1\right)\right)$ par Cr dans l'équation (2.4) on obtient :

$$2F_1^2 \left(1 - Cr - \frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau}\right) = \frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1 \quad (2.5)$$

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

Cette expression est semi-théorique du fait que le coefficient de résistance C_r , ne peut être trouvé qu'à partir de données expérimentales.

Il est clair que pour un coefficient C_r égale à zéro, l'expression (5) revient à l'approche de Khataoui et Achour (2012) d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée de pente nulle parfaitement lisse.

$$F_1^2 \left(1 - \frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau}\right) = \frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1 \quad (2.7)$$

II.6. RESULTATS EXPERIMENTAUX

II.6.1. 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 2.3, la variation du terme

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

absolues : $\varepsilon(\text{mm}) = 06 ; 08 ; 10 \text{ et } 12$.

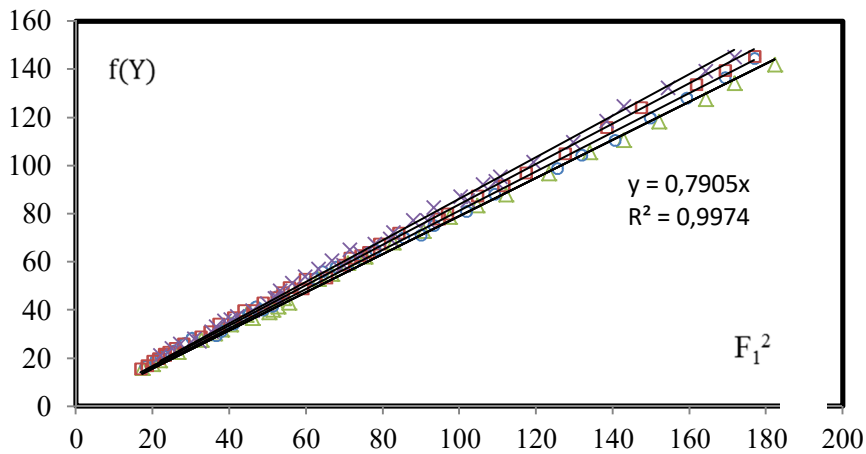


Fig.2.7. Variation de $f(Y)$ en fonction de F_1^2 , pour quatre rugosités relatives : $\varepsilon(\text{mm}) = (\times) 06$, $(\square) 08$, $(\circ) 10$ et $(\triangle) 12$. (—) Courbe d'ajustement.

La figure 2.3 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 :

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

Le terme 'S' représente le facteur $(1-C_r)$. (Le Tableau 1) regroupe les valeurs des coefficients C_r .

Tableau 1 : Coefficient C_r des courbes d'ajustement

$\varepsilon/B-b$	C_r	R^2
0,06	0,138	0,997
0,08	0,162	0,997
0,1	0,188	0,996
0,12	0,210	0,997

Le tableau 1 montre que le coefficient C_r 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 :

$C_r = 1,896 (\varepsilon/B-b)$. Celle-ci est représentée par la figure 4 ci-dessous

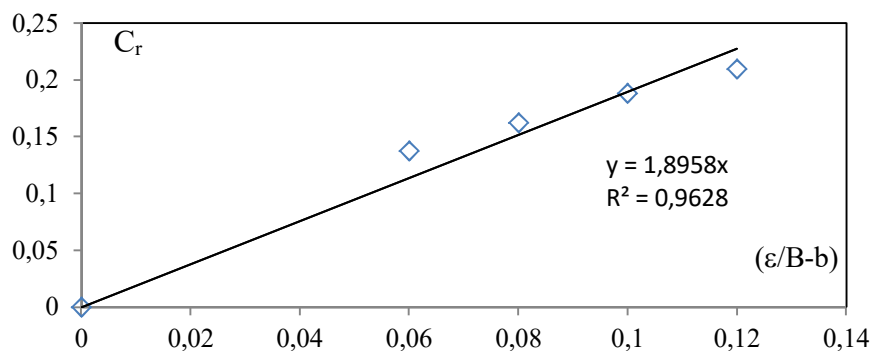


Fig2.8. Variation du coefficient C_r en fonction de la rugosité relative $\varepsilon/B-b$

En remplaçant le coefficient C_r par son expression dans la relation (6) l'équation semi-théorique devient

$$F_1^2(1 - 1.896(\varepsilon/B - b)) = \frac{\beta F_1^2}{Y - (1 - \beta)/\tau} + \frac{\frac{(2Y - 1/\tau) + (Y - 1/\tau)^2}{\tau} - 1}{\beta} \quad (2.8)$$

$$0.00 \leq \varepsilon/B - b \leq 0.12$$

La figure 2.5 montre que la relation $f(y_1, y_2) = \xi(\varepsilon/B - b, F_1)$ 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 (2.8).

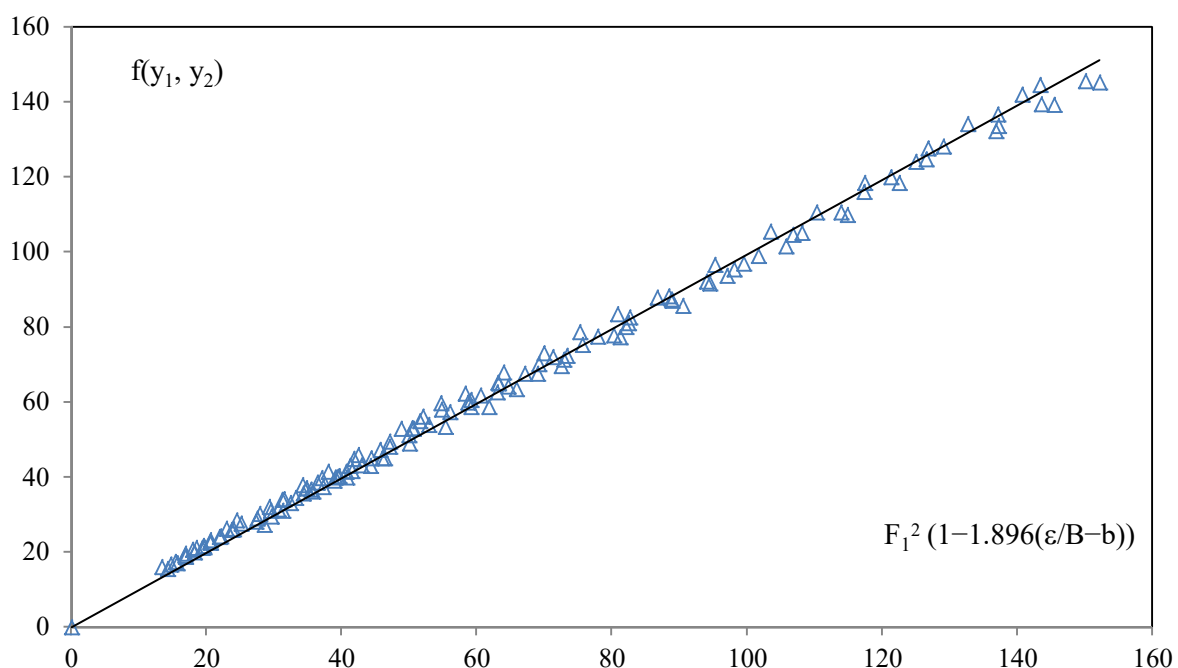


Figure 2.9 : Variation de $f(y_1, y_2)$ en fonction de la relation $F_1^2(1 - 1.896(\varepsilon/B - b))$

(Δ) Points de mesures expérimentales (-----) première bissectrice

II.6.2. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient C_r de résistance et du nombre de Froude incident F_1

L'équation semi-théorique (2.8) 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 F_1 de l'écoulement.

La figure (2.6) 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 :

$$Y = 1.45 F_1^{0.957} (1 - C_r)^{0.478}$$

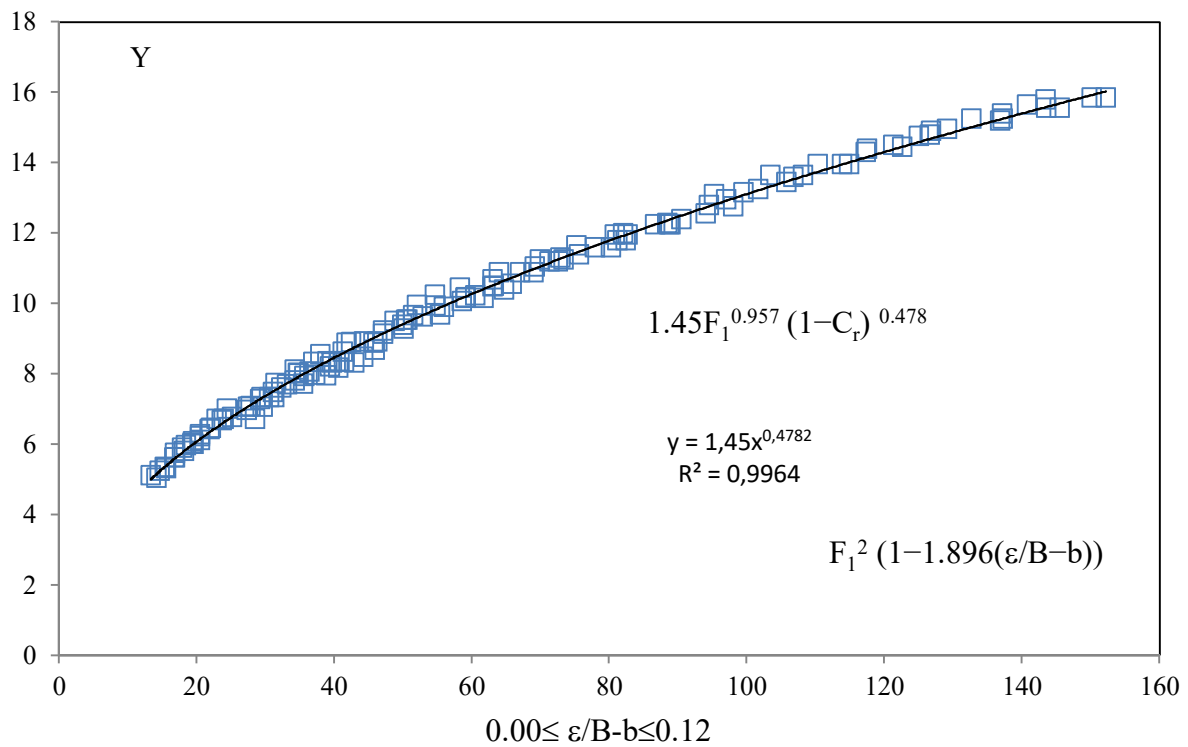


Fig.2.10. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de $F_1^2 (1-C_r)$.

(□) Points de mesures expérimentales. (—) Courbe d'ajustement.

La figure 2.10 montre la comparaison entre Y expérimental et de l'équation semi-théorique (2.8). On remarque que le nuage de points suit parfaitement la première bissectrice ce qui justifie que l'approche globale obtenue est acceptable et pourrait être appliquée au dimensionnement des bassins d'amortissement.

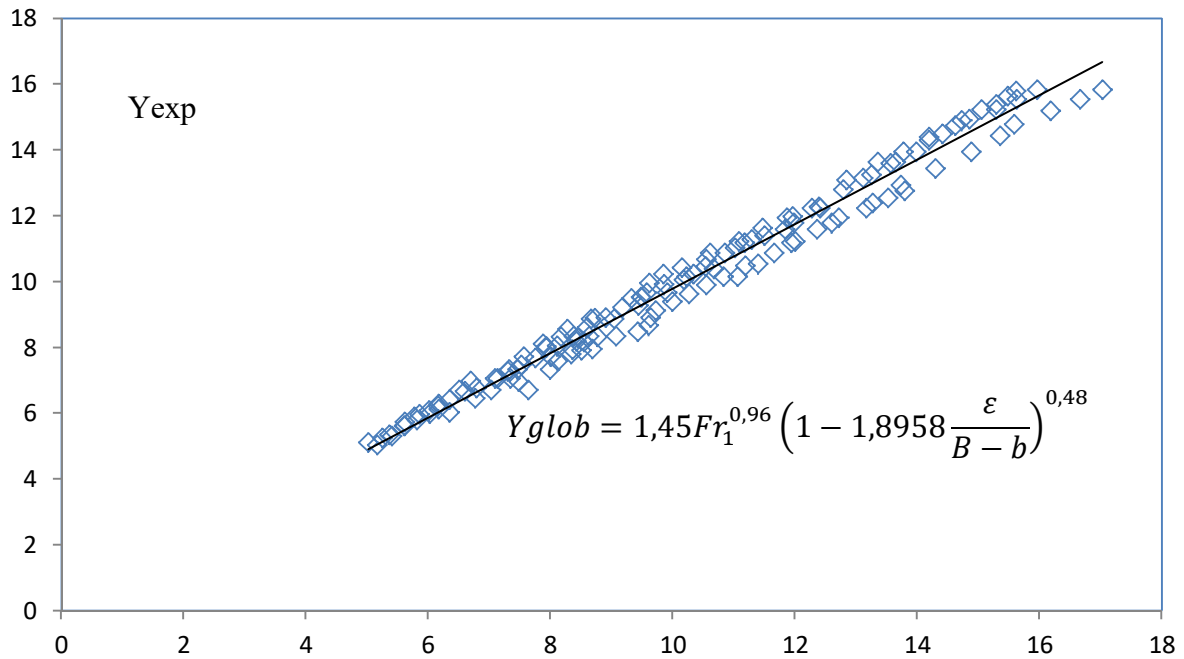


Fig.2.11. Comparaison entre Y expérimental et de l'équation semi-théorique (8).

(□) Points de mesures expérimentales. (—) Courbe d'ajustement.

II.7. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons analysé expérimentalement l'effet de la rugosité imposée au lit majeur du canal rectangulaire de section composée sur les caractéristiques essentielles de ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à parois minces....

L'étude a concerné en premier lieu l'étude de l'approche semi-théorique par laquelle on a tenté de trouver une approche explicite en remplaçant la relation semi théorique implicite en Y. Celle-ci permet de trouver le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient Cr de résistance du lit majeur rugueux du canal rectangulaire de section composée et du nombre de Froude F_1 incident de l'écoulement.

Ensuite l'étude a abordé la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient Cr de résistance et du nombre de Froude F_1 . La comparaison entre Y expérimental et de l'équation semi-théorique (2.8) a été obtenue. Cette approche semi théorique obtenue a été validée par la première bissectrice justifiant la fiabilité des mesures expérimentales et de l'applicabilité au dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Notre travail de recherche a été divisé dans cette partie fondamentale de contribution en deux chapitres primordiaux.

Pour le premier chapitre, nous avons exposé le banc d'essai utilisé en expérimentation sous forme de diverses photographies, nous avons aussi expliqué la procédure de l'utilisation des appareils permettant de mesurer les caractéristiques du ressaut hydraulique. Pour les mesures de débit, nous avons utilisé le débitmètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de *Hachemi Rachedi L. (2006)*.

Finalement, nous avons expliqué clairement la méthode de préparation des divers tapis rugueux qui s'imposent au lit mineur du canal.

A travers du deuxième chapitre nous avons réalisé ce qui suit : en premier temps, nous avons décrit le banc d'essai qui a servi de réaliser l'expérimentation du ressaut hydraulique. Toutes les mesures expérimentales obtenues au niveau du laboratoire ont permis d'établir la relation de l'approche semi théorique caractérisée par les paramètres suivants : F_1 , Y , Cr , β , et τ tels que : F_1 est le nombre de Froude incident, Cr est le coefficient de frottement ou de résistance, β est le rapport de l'élargissement, τ est le rapport de forme et Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique contrôlé. Cette approche adimensionnelle est établie à partir de la théorie d'Euler appliquée entre les deux sections du ressaut hydraulique après sa formation.

Finalement, on peut conclure, qu'a partir de ce mémoire, on est arrivé à établir l'approche globale semi théorique qui engendre la rugosité testée expérimentalement Y compris les caractéristiques du ressaut hydraulique.

Ainsi cette approche permettant de dimensionner les ouvrages hydrauliques tel que les bassins d'amortissement.

CONCLUSION GENERALE

Notre étude concerne la contribution à l'étude de l'approche semi théorique 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 deux parties fondamentales :

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

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

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

- ✓ Le ressaut hydraulique classique, concernant les travaux de *Hager (1990)*, par lequel l'auteur a démontré la caractérisation de ce type du ressaut. En premier lieu, une classification de *Peterka et Bradley* a été présentée (1957) qui se base essentiellement sur le facteur du nombre de Froude F_1 . L'auteur a noté que l'utilisation de la théorie d'Euler entre les deux sections du ressaut formé, sans frottement, conduit à l'approche de *Bélanger* qui une relation entre le rapport Y^* des hauteurs conjuguées et le facteur du nombre de Froude F_1 .
- ✓ Les travaux de l'auteur « *Rajaratnam en 1968* », effectué dans un canal rectangulaire avec lit rugueux, se basent sur les résultats obtenus des mesures expérimentales, et pour les différents ressauts contrôlés et créés dans le banc d'expérimentation de forme rectangulaire à pente nulle, dans lequel la rugosité imposée relative 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 créée 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 apparaît un avantage très significatif du ressaut hydraulique avec lit rugueux.

- ✓ Les travaux du '*Rajaratnam 2002*' réalisés dans un banc d'expérimentation à fond ondulé. Ils sont notés également de bonnes performances vis-à-vis de la réduction de la profondeur aval du ressaut.

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

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

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

Pour la deuxième partie, elle a été scindée en deux chapitres essentiels.

Pour le premier chapitre, nous avons exposé le banc expérimental utilisé en expérimentation sous forme des diverses photographies, nous avons aussi expliqué la procédure de l'utilisation des appareillages permettant de mesurer les caractéristiques du ressaut hydraulique. Pour les mesures de débit, nous avons utilisé le débitmètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de *Hachemi Rachedi L. (2006)*.

Finalement, nous avons expliqué clairement la méthode de préparation des divers tapis rugueux qui s'imposent au lit mineur du canal.

Pour le second chapitre, à travers lequel nous avons réalisé les travaux suivants : en premier temps, nous avons décrit le banc d'essai qui a servi de réaliser l'expérimentation complète du

ressaut hydraulique. Toutes les mesures expérimentales obtenues au niveau du laboratoire ont permis d'établir la relation l'approche semi théorique caractérisée par entre les paramètres suivants : F_1 , Y , Cr , β , et τ tels que : F_1 est le nombre de Froude incident, Cr est le coefficient de frottement ou de résistance, β est le rapport de l'élargissement, τ est le rapport d'aspect et Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique contrôlé. Cette approche adimensionnelle est établie à partir de **la théorie d'Euler** appliquée entre les deux sections du ressaut hydraulique après sa formation.

En second temps, nous avons présenté l'équation semi-théorique explicite qui a été établie expérimentalement permettent de calculer le rapport Y des hauteurs conjuguées en injectant le débit volumique d'écoulement et de la valeur de la rugosité absolue testée.

Pour le dernier chapitre de la deuxième partie, On a analysé principalement tous les résultats obtenus de nos expériences réalisées qui sont liées étroitement avec l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mine évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux.

Finalement, on peut conclure que ce type du ressaut hydraulique étudié présente un effet réducteur aux caractéristiques hydrauliques pour le lit majeur rugueux que celui au lit mineur lisse, et que cette approche semi théorique est validée expérimentalement par la première bissectrice, ainsi cette dernière pourrait être utilisée au dimensionnement des ouvrages hydrauliques tel que les bassins d'amortissement.

Avec recommandation aux étudiants chercheurs futurs de continuer les travaux théoriques et expérimentaux pour ce type de canal dans le but d'aboutir à des approches empiriques utilisables au dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

- Achour, B., Dissipation d'énergie par ressaut, thèse d'état. Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil, 1998. Achour, B., Ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. JHR 2000; 38(4): 307-311.
- Achour, B., Debabeche, M., Ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en U. Journal of Hydraulic Research, Vol. 41 (02), pp. 97-103, 2003.
- Ackers, P., (1991) Hydraulic design of straight compound channels brusquement élargie. JHR 2000 ; 38(4) : 307-311.

D

- Debabeche, M., Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie, 2003.
- Debabeche, M., Ghomri, A., Sahnoune, C., Ismail, K., "Effet de la rugosité sur le ressaut hydraulique dans un canal profilé en U (partie1) " Larhyss journal, N 004, pp.107-118, juin 2005.
- Djamaa, W., Ghomri. A., (2020)., Study of experimental approach of the relative length of the surface role of the hydraulic jump evolving in a rectangular channel of section composed with rough bottom; Journal of Fundamental and Applied Sciences ISSN 1112-9867.
- Djamaa, W., Ghomri. A., Khechana. S., (2021)., Study of the experimental approach of the relative threshold of the hydraulic jump evolving in a rectangular channel of composed section with rough minor bed; Journal of Fundamental and Applied Sciences ISSN 1112-9867.
- Djamaa, W., Lecheheb. S., Ghomri. A., (2020)., Séminaire international « Durabilité d'agriculture saharienne et l'utilisation de l'eau ». Communication poster intitulé : L'étude de l'effet d'une rugosité sur ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée du lit mineur rugueux ; Université d'El-Oued ; 02-03 Mars 2020.
- Djamaa, W., Lecheheb. S., Ghomri. A., (2020)., Séminaire national « Colloque Maghrébin sur

l'Eau et l'Environnement dans les Zones Arides et Semi-Arides (CMEEZASA'2020) ». Communication poster intitulée : « la contribution à l'étude de l'approche semi-théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée à fond rugueux » ; Université Biskra 22-23 Mars 2021.

Djamaa, W., Lecheheb. S., Ghomri. A., (24. Novembre 2021)., Séminaire national sur l'eau, géotechnique et environnement tenu au centre universitaire de Mila. Communication orale intitulée « étude de l'approche expérimentale de la longueur relative du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux

Djamaa, W., Lecheheb. S., Ghomri. A., (2020)., La quatrième journée d'étude Valorisation et Gestion Durable des Ressources Hydrique (VGDRH) : une communication intitulée : « Contribution à l'étude de l'approche semi-théorique du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux ». Université d'El-Oued ; 19 novembre 2019.

E

Ead, S. A., Rajaratnam, N., "plan turbulent wall jets in shallow" J.eng. mech., 128(2), pp. 143-155, 2002.

Ead, S. A., Rajaratnam, N., Katopodis, C., and Ade, "Turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts." J. Hydraulic. Eng., 126(10), pp. 750-757. F, 2000.

F

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

G

Ghomri, A., Ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant en canal profilé en "U", Mémoire de Magister en Sciences Hydrauliques, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, 2005.

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

Ghomri, A., Debabeche, M., Riguet, F., l'étude semi théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en U à fond rugueux, Revues des sciences fondamentales et appliquées, centre universitaire d'Oued Souf, N° 01, pp.40-57, 2009.

Ghomri, A., Riguet, F., Contribution to the Experimental Study on the Hydraulic Jump

Evolving in a U-Shaped Channel with Rough Bed, Journal of Fundamental and Applied Sciences, Université El Oued, N° 02, pp.254-271,2010.

H

Hachemi Rachedi, L., (2006). Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, mémoire de magistère en science hydrauliques, Département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

Hager, W., Bremen R., H., Classical Hydraulic jump; sequent depth, J. Hydraulic Research 27(5), 565-585, 1989.

Hager, W., Bremen R., H., et Kawogoshi N. Classical Hydraulic jump; length of roller, J. Hydraulic Research 28(5), 591-608, 1990.

Hager, W. H. and LI, D " Dissipateurs d'énergie contrôlé par seuil ", J. Recherches Hydrauliques, 30. n°2,165-181,1992.

K

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

L

Lecheheb. S., Djamaa, W., Ghomri. A., (2020). Séminaire national « Colloque Maghrébin sur l'Eau et l'Environnement dans les Zones Arides et Semi-Arides (CMEEZASA'2020) ». Communication poster intitulée : « la contribution à l'étude de l'approche semi-théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée à lit majeur rugueux » ; Université Biskra 22-23 Mars 2021.

Lecheheb. S., Djamaa, W., Ghomri. A., (24. November. 2021). The Second International Conference on Civil Engineering ICCE' 2021 Novembre 24-25, 2021, Laghouat, Algérie. Communication poster intitulée « L'étude de l'effet d'une rugosité sur le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée avec lit majeur rugueux »

M

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

R

Rajaratnam, N., Hydraulic jumps on rough beds, Transaction of the engineering institute of Canada, Vol. 11, N° A-2 may 1968.

Rajaratnam, N., (2002)., Hydraulic jumps on corrugated beds. J Hydraulic Engineering. ASCE 128 (7), 656-336.

- Rajaratnam, N., Subramanya, K., Profile of the Hydraulic Jump, Proc. ASCE J. Hydraulic Division, 94, HY3, 663-676; Vol. 95, HY1, 546-557; HY2, 725-727, Vol. 96, 1970, HY2, 579-580, 1968.
- Rand, W., An approach to generalized design of stilling basins, Trans. New York Academy of Sciences, Vol. 20 (2), pp. 173-191, 1957.
- Rand, W., Flow over vertical sill in an open channel. proc. ASCE, J. Hydraulic Division 91, Hy4, 97-121, 1965.
- Riguet, F., Debabeche, M., Ghomri, A., (2019). Experimental study of the sequent depth ratio of the hydraulic jump in a straight compound rectangular channel; Journal of Fundamental and Applied Sciences ISSN 1112-9867.

ANNEXE

Tableau : mesures expérimentales permettant au traçage des courbes.

F(y)	F*2	Y	$Fr_1^2 \left(1 - 1.8958 \left(\frac{\varepsilon}{B - b}\right)\right)$	Y gol
15,95804	17,292	5,125	13,35796	4,938630839
17,41815	19,91053633	5,35	15,38097	5,289190714
19,05807	21,7956012	5,625	16,83719	5,527057174
22,55586	26,64869818	6,125	20,58623	6,09468721
27,59622	32,5949774	6,775	25,17975	6,721873911
30,23101	36,10010354	7,075	27,88747	7,064176505
32,00383	37,94316596	7,275	29,31125	7,237321022
33,89984	40,33386006	7,475	31,15807	7,455596597
36,62795	45,94243789	7,725	35,49072	7,942914178
39,07763	50,33250307	7,95	38,88206	8,303364892
41,38924	52,62869694	8,175	40,65588	8,485466881
43,11193	55,59580088	8,325	42,94798	8,714833699
52,84732	63,16728457	9,5	48,79698	9,27309149
54,94296	66,74196623	9,666	51,55844	9,524680494
37,88229	44,36440288	8,12	34,27168	7,809048671
40,16377	51,35734189	8,32	39,67375	8,38515699
44,90625	54,15805061	8,88	41,83731	8,604497493
59,63773	70,8271085	10,24	54,71422	9,80386239
62,23576	75,47007722	10,44	58,30094	10,11130164
67,92139	82,80820507	10,88	63,96967	10,57801709
72,92973	90,60722015	11,24	69,99444	11,05130224
78,59038	97,46859313	11,64	75,29488	11,45064858
83,41703	104,6678981	11,96	80,85637	11,85442492
87,84912	112,2132584	12,24	86,68519	12,26257469
96,64286	123,3736027	13,1	95,3066	12,84122816
105,4301	133,9429676	13,65	103,4715	13,36491926
110,6144	142,8203668	13,95	110,3293	13,78858279
118,4073	152,081595	14,4	117,4836	14,21638129
127,5474	164,2102652	14,9	126,8531	14,75687338
134,1308	171,7880318	15,25	132,7069	15,0841983
141,9883	182,2494871	15,65	140,7885	15,52412792
16,65053	18,13742157	5,25	14,69893	5,173805408
19,55297	20,83886081	5,75	16,88823	5,535198694
20,57822	22,12090336	5,9	17,92722	5,698262235
21,10586	22,78118589	5,975	18,46233	5,780350454
23,17391	25,39974861	6,285	20,58446	6,094433573

26,21874	28,37674076	6,714	22,99708	6,431917593
28,39185	30,1779173	7	24,45679	6,627316182
38,46262	44,96122547	8,057	36,43748	8,045258245
40,1156	48,65489338	8,2	39,4309	8,360156952
41,67908	51,22643963	8,342	41,51493	8,572190577
29,50701	36,55514154	7,066	29,62502	7,274893544
31,3954	37,78723534	7,333	30,62353	7,393119614
34,3869	40,98791001	7,7	33,21742	7,691292087
36,92924	42,99240669	8	34,84191	7,871966065
45,81479	52,43473388	8,9	42,49416	8,669929271
53,12465	62,29401659	9,533	50,48432	9,427663089
57,97889	67,65622712	9,933	54,82996	9,813941682
59,88868	72,35295481	10,06	58,63628	10,13954313
41,49212	46,90698357	8,56	38,01436	8,212731049
56,08186	64,2259323	9,96	52,04998	9,568731702
65,17125	77,86577663	10,68	63,10398	10,50815966
70,05368	85,35597388	11,04	69,17419	10,98813174
75,16102	93,3117374	11,4	75,6217	11,47479175
81,03197	101,7471044	11,8	82,45789	11,96803302
88,21809	109,1530677	12,28	88,45983	12,38402107
71,30061	89,93935636	11,3	72,88865	11,27121093
98,93881	125,441274	13,25	101,6601	13,25062598
104,5364	131,7826391	13,6	106,7993	13,57224981
110,4784	140,5653504	13,95	113,917	14,0048354
119,931	149,7298597	14,5	121,3441	14,44166562
128,1467	159,2842906	14,95	129,0872	14,88269238
136,7072	169,2367664	15,4	137,1529	15,32786912
144,5317	176,9672268	15,8	143,4178	15,66444789
15,54576	16,74287095	5,05	14,20358	5,088269655
17,03789	18,42531182	5,325	15,63086	5,330805827
18,74606	19,91053633	5,625	16,89082	5,535612315
19,92389	21,47350397	5,8	18,21675	5,742830688
21,30076	23,116198	6	19,6103	5,95242829
21,69871	23,02014744	6,085	19,52882	5,940387744
22,66687	24,19044484	6,228	20,52163	6,085378987
24,07157	25,81162846	6,428	21,89693	6,280402178
25,97366	27,93793301	6,685	23,70075	6,526884061
47,22943	53,88703502	8,885	45,71431	8,983435075
28,94778	32,45407712	7,066	27,53196	7,020238504
31,00588	34,75767784	7,333	29,48619	7,258294835
34,18293	37,1677849	7,733	31,53077	7,498832967

36,97231	40,98791001	8,033	34,77152	7,864228558
39,77254	43,6748132	8,333	37,05092	8,110842844
42,94915	48,65489338	8,633	41,2757	8,548132655
49,40297	55,59580088	9,233	47,16392	9,120854844
52,89996	59,72257675	9,533	50,66481	9,444039495
61,76234	71,39676081	10,23	60,56844	10,30067021
64,14289	76,26310135	10,4	64,69673	10,63631393
39,84253	46,04895045	8,36	39,06498	8,322338606
45,04924	52,27990701	8,92	44,35093	8,852131164
48,93254	59,04902024	9,28	50,09341	9,392092433
53,33796	65,29634267	9,68	55,39324	9,862841978
58,67635	69,69691018	10,16	59,1264	10,18067002
62,58821	74,29087875	10,48	63,02363	10,50165037
67,63031	79,08240756	10,88	67,08845	10,82574694
71,93901	84,07565577	11,2	71,32441	11,15292478
77,86314	94,68394701	11,6	80,3238	11,81638996
87,34832	104,6678981	12,24	88,79355	12,40671856
80,09089	96,76738293	12	82,09125	11,9421256
91,63171	111,4429184	12,8	94,54104	12,79096302
96,96102	117,3071627	13,15	99,51589	13,11396871
105,0315	127,5319193	13,65	108,1899	13,65790517
115,9666	138,3341963	14,3	117,3539	14,20874319
124,0292	147,4024946	14,75	125,0468	14,65431506
133,5946	161,7347755	15,25	137,2054	15,33072602
139,4603	169,2367664	15,55	143,5696	15,67251181
145,4791	176,9672268	15,85	150,1277	16,01665846
27,19021	32,17349588	6,725	28,51383	7,140893171
21,21356	21,88821695	6,028571429	19,39848	5,921073413
24,12607	24,99227384	6,457142857	22,14945	6,315519523
26,04223	27,07393541	6,714285714	23,99433	6,566075557
35,57921	38,6840473	7,8	34,28381	7,810393258
37,40539	42,02992626	7,971428571	37,24911	8,131912492
42,89585	49,9296301	8,485714286	44,25023	8,842352024
45,02799	51,88318092	8,685714286	45,98157	9,008937388
28,09417	30,79482345	6,966666667	27,29197	6,990413245
31,08205	35,35012561	7,333333333	31,32912	7,475472707
33,11627	36,55514154	7,6	32,39707	7,598326943
36,0987	40,33386006	7,933333333	35,74596	7,970642915
48,17437	53,21345492	9,133333333	47,16053	9,120536172
51,1966	56,40543584	9,4	49,98943	9,382606836
53,97783	59,72257675	9,633333333	52,92925	9,647000618

57,2295	63,16728457	9,9	55,98213	9,913693697
60,60325	66,74196623	10,16666667	59,1502	10,18266293
64,99184	71,39676081	10,5	63,27552	10,52204112
39,84253	46,04895045	8,36	40,81097	8,501193342
45,04924	52,27990701	8,92	46,33317	9,042371631
58,67635	69,69691018	10,16	61,76903	10,39946202
63,49765	74,29087875	10,56	65,84044	10,72734053
67,53526	77,86577663	10,88	69,0087	10,97534035
72,34772	82,80820507	11,24	73,38894	11,30876596
77,38253	87,95547227	11,6	77,95071	11,64531303
82,63921	93,3117374	11,96	82,69771	11,98494779
87,0589	100,3073084	12,24	88,89755	12,41378353
92,11242	106,1490258	12,56	94,07479	12,76024734
95,40753	110,676112	12,76	98,08693	13,02205557
69,52217	81,86602219	11,2	72,55393	11,24600985
77,24732	91,61520228	11,8	81,19416	11,87848224
85,59351	102,1091934	12,4	90,49448	12,52173101
93,59504	109,5325103	12,95	97,07341	12,95644681
101,4938	119,306674	13,45	105,7358	13,50635617
109,8199	129,6456653	13,95	114,8987	14,06340072
118,4447	138,3341963	14,45	122,599	14,51410219
124,6345	142,8203668	14,8	126,5748	14,74112344
132,3079	154,4578273	15,2	136,8886	15,3134978
139,1992	164,2102652	15,55	145,5317	15,77630533
145,2169	171,7880318	15,85	152,2475	16,12624245
72,20174	72,83423675	11,5	72,83424	11,26711806
77,4914	78,77707042	11,9	78,77707	11,70518524
83,05542	85,03468448	12,3	85,03468	12,14847156
89,58427	91,61520228	12,75	91,6152	12,59690554
95,0046	98,5267472	13,1	98,52675	13,05041843
102,0319	103,9325291	13,55	103,9325	13,39384621
109,5199	111,4429184	14	111,4429	13,85608934
116,5164	119,306674	14,4	119,3067	14,32323502
124,6545	127,5319193	14,85	127,5319	14,79522331
135,8854	136,1267777	15,45	136,1268	15,27199633
44,74477	46,04895045	8,96	46,04895	9,015354597
52,21917	53,21345492	9,68	53,21345	9,672155944
55,44572	57,0587742	9,96	57,05877	10,00595757
58,72019	60,06126731	10,24	60,06127	10,2586345
62,12965	63,16728457	10,52	63,16728	10,51328448
64,7215	66,37858065	10,72	66,37858	10,76988965

66,80972	68,57879942	10,88	68,5788	10,94203736
27,31387	28,156767	6,9	28,15677	7,097267347
29,5191	30,25457582	7,2	30,25458	7,349668518
31,8158	31,89453649	7,5	31,89454	7,540780337
34,67063	34,75767784	7,833333333	34,75768	7,862706002
38,00111	37,78723534	8,2	37,78724	8,188832478
39,28251	39,04670789	8,333333333	39,04671	8,320445126
42,24465	41,6489927	8,633333333	41,64899	8,585641002
44,97159	43,6748132	8,9	43,67481	8,786247206
46,74671	45,06121333	9,066666667	45,06121	8,920791662
50,63867	50,14422707	9,4	50,14423	9,396724616
54,21866	53,99984803	9,7	53,99985	9,741403813
57,9531	58,04821086	10	58,04821	10,08996286
60,90397	60,57170029	10,23333333	60,5717	10,30093964
20,85417	21,51932224	5,971428571	21,51932	6,227498024
21,89144	22,26130359	6,142857143	22,2613	6,331008677
22,87484	23,40595201	6,285714286	23,40595	6,48727697
24,47749	24,99227384	6,514285714	24,99227	6,697488891
26,88799	26,22793709	6,857142857	26,22794	6,856524839
29,04106	28,82011937	7,114285714	28,82012	7,178093502
30,7035	30,1779173	7,314285714	30,17792	7,340606513
34,23803	33,02012396	7,714285714	33,02012	7,669042368
41,36156	39,77881478	8,428571429	39,77881	8,395948093
44,39218	42,02992626	8,714285714	42,02993	8,623739247
48,02747	46,17088053	9,028571429	46,17088	9,026955269
15,33893	15,16609729	5,075	15,1661	5,253128238
16,57006	16,47282989	5,3	16,47283	5,468565747
17,94191	18,13742157	5,525	18,13742	5,730656065
18,67872	18,71623247	5,65	18,71623	5,818872998
19,17291	19,30722841	5,725	19,30723	5,907512642
20,573	20,21684694	5,95	20,21685	6,04125953
23,5748	22,78118589	6,375	22,78119	6,40248285
24,98141	24,48908896	6,55	24,48909	6,631571325
26,84905	26,64869818	6,775	26,6487	6,909797077
28,75843	28,54247082	7	28,54247	7,144380953
30,46264	29,72068396	7,2	29,72068	7,286308411
32,37483	32,17349588	7,4	32,1735	7,572782018
35,01284	34,75767784	7,675	34,75768	7,862706002
36,81506	37,01398736	7,85	37,01399	8,106910516
38,95394	39,84791519	8,05	39,84792	8,403037488