



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydraulique

Spécialité : Conception et Diagnostic de Systèmes D'eau Potable et
D'assainissement

Thème

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE LA RENTABILITÉ DU RESSAUT HYDRAULIQUE DÉVELOPPÉ DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE SECTION COMPOSÉE RUGUEUSE

Présenté par :

- Aguib Adem
- Ben Yamma Ayoub

Dirigé par :

Encadreur: Pr.Ghomri Ali
Co-Encadreur: Dr.Riguet ferhat

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné la force et le courage d'accomplir cet humble travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements au Professeur [Ghomri Ali](#) , professeur à la Faculté de Technologie de l'Université d'El-oued, qui m'a encadré tout au long de ce mémoire et qui m'a fait partager sa merveilleuse intuition, pour laquelle je tiens également à remercier. Pour sa gentillesse, sa présence constante et les nombreux encouragements qu'il m'a apportés. Je n'oublierai jamais Docteur [Farhat Riguet](#) pour ses conseils et instructions.

À tous ceux qui m'ont aidé directement ou indirectement dans l'élaboration de ce travail , je remercie vivement tout le monde. Je tiens à remercier tous mes amis pour le soutien moral qu'ils m'ont apporté.

Je voudrais profiter de cette occasion pour remercier tous les enseignants du Département d'Hydraulique et génie civil de l'Université d'El-oued pour le soutien moral qu'ils m'ont apporté, ainsi que pour l'esprit d'amitié dont ils ont fait preuve et contribué en tout au long de mon parcours universitaire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont toujours

Présents dans mon Cœur

A ma très chère mère, A mon très cher père

A mes sœurs

A toute ma famille

A tous mes professeurs et docteurs

A tous mes collègues et mes amis sans exception

Resumé :

Ce mémoire vise à analyser, bibliographiquement et expérimentalement, un ressaut hydraulique contrôlé par seuil se développant au sein d'un canal rectangulaire de section composée à fond rugueux. Grâce aux analyses expérimentales obtenues, nous sommes arrivés à obtenir des relations de la forme $f(S/h_1, F_1, \varepsilon/b)$. Ces dernières permettent de connaître la rentabilité du ressaut hydraulique engendré par la rugosité imposée au fond du canal d'expérimentation.

Aussi de visualiser les différents profils du ressaut hydraulique pour différentes rugosités testées.

Mots-clés : ressaut hydraulique, canal rectangulaire composée, rugosité du fond, rendement.

Summary:

This dissertation aims to analyze, bibliographically and experimentally, a hydraulic jump controlled by a threshold developing within a rectangular channel of compound section with a rough bottom. Thanks to the experimental analyzes obtained, we managed to obtain relationships of the form $f(S/h_1, F_1, \varepsilon/b)$. The latter make it possible to know the profitability of the hydraulic jump generated by the roughness imposed at the bottom of the experimental canal.

Also to visualize the different profiles of the hydraulic jump for different roughnesses tested.

Keywords: hydraulic jump, compound rectangular channel, bottom roughness, yield.

ملخص:

تهدف هذه الأطروحة إلى التحليل الببليوغرافي والتجريبي للقفزة الهيدروليكية التي يتم التحكم فيها من خلال عتبة تتطور داخل قناة مستطيلة من المقطع المركب ذات قاع خشن. بفضل التحليلات التجريبية التي تم الحصول عليها، تمكنا من الحصول على علاقات من الشكل $f(S/h1, F1, \epsilon/b)$. وهذا الأخير يتيح معرفة مدى ربحية القفزة الهيدروليكية الناتجة عن الخشونة المفروضة في قاع القناة التجريبية. أيضًا لتصور الأشكال المختلفة للقفز الهيدروليكي لمختلف الخشونة التي تم اختبارها.

الكلمات المفتاحية: القفزة الهيدروليكية، القناة المركبة المستطيلة، خشونة القاع، المردودية.

Tables des matières

Remercîments	i
Dédicace	ii
Resumé :	iii
Tables des matières	vi
Liste des figures	ix
Liste de tableau :	xiv
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Ressaut hydraulique en canal rectangulaire	
I.1. INTRODUCTION	3
I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE.....	3
I.1.2. Différentes configurations du ressaut classique	3
I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	4
I.2.3. Les caractéristiques du ressaut	5
I.2.3.1. Longueurs du ressaut	5
I.2.3.2. Longueur du rouleau de surface.....	6
I.2.4. Rendement du ressaut hydraulique	7
I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT EN CANAL RECTANGULAIRE AVEC FOND RUGUEUX.....	
I.3.1. L'Approche de RAJARATNAM (1968)	8
I.3.1.1. Le Protocole d'expérimentation	8
I.3.1.2. Discussion des résultats obtenus	8
I.3.1.2.1. La hauteur caractéristique du ressaut hydraulique : h_2	8
I.3.1.2.2. La longueur du rouleau de surface L_r	10
I.4. LE RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT EN CANAL RECTANGULAIRE AVEC LIT ONDULE	
I.4.1. Approche de RAJARATNAM (2002)	11
I.4.1.1. Le protocole expérimental	11
I.4.1.2. Discussion des Résultats obtenus	12
I.4. CONCLUSION	15

Chapitre 2 : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE SECTION COMPOSÉE

II.1. INTRODUCTION	17
II.2. APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR 2012	17
II.2.1. Différentes caractéristiques du ressaut hydraulique :	17
II.2.2. Rendement du ressaut hydraulique :	20
II.3. L'ETUDE EXPERIMENTALE DES CARACTÉRISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE (APPROCHE DE RIGUET EN 2019)	22
II.3.1. La problématique	22
II.3.2. Analyse des essais expérimentaux	24
II.3.3. Résultats expérimentaux	25
II.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées	25
II.3.3.2. Les caractéristiques du ressaut hydraulique	26
II.3.3.2.1. La longueur relative L_j/h_1 du ressaut varie en fonction du nombre de Froude F_1	26
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	27
II.4. CONCLUSION	29

CHAPITRE 3: Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses

III.1. INTRODUCTION	31
III.2. PROCEDURE EXPERIMENTALE	31
III.2.1. Déroulement des essais	31
III.2.2. Mode de préparation des tapis rugueux.	32
III.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX	33
III.3.1. La longueur relative du ressaut L_j/h_1 varie en fonction du nombre de Froude F_1	33

III.3.2. Variation des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1	35
III.4. CONCLUSION	39

DEUXIEME PARTIE

CHAPITRE 1 : Protocol Expérimental

I.1. INTRODUCTION	42
I.2. Appareil de mesures	42
I.3. APPAREILLAGES DE MESURE	44
I.3.1. Procédure de mesure des débits	44
I.3.2. L'appareil Limnométrique.....	45
I.4. APERÇU DES ESSAIS EXPERIMENTAUX.....	46
I.4.1. Protocole expérimental des essais	46
I.4.2. Mode de préparation de tapis ou rugosité équivalente	48
I.5. CONCLUSION	50

CHAPITRE 2:Interprétation des Résultats Expérimentaux de la rentabilité du ressaut hydraulique

II.1. INTRODUCTION.....	52
II.2. ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	52
II.2.1.Variation de la hauteur relative du seuil S/h_1 en fonction du Froude F_1	52
II.2.2.1 Variation de la hauteur relative du seuil S/h_1 en fonction du Froude F_1 dans le lit mineur ($0 < h_2 < 20$) cm.	52
II.2.2.2. Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 dans le lit majeur ($20 < h_2 < 50$) cm.	58
II.2.2 Rendement du ressaut hydraulique.....	64
II.2.3 Profils de surface du ressaut hydraulique.....	66
II.3. EXEMPLE D'APPLICATION	68
II.4. CONCLUSION.....	69
Conclusion Générale	70
Références Bibliographiques	74

Liste des figures

Chapitre 1 : 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.	4
Figure 1.2: Configuration du ressaut hydraulique. (a rouleau de surface développé. b) rouleau de surface non développé.	6
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).	7
Figure 1.4 : Variation de $y = h_2 / h_1$ en fonction de F_1	9
Figure 1.5 : Variation de h_2/h_2^* en fonction de ε / h_1	10
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	10
Figure 1.7 : Configuration du ressaut hydraulique avec lit ondulé.	11
Figure 1.8 : (a) Configuration de surface du ressaut hydraulique ; (b) Profil généralisé de surface du ressaut hydraulique.	12
Figure 1.9 : Variation de h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	13
Figure 1.3: 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.	14

Chapitre 2 : Etude théorique de Khattoui et Achour en 2012

Figure 2.1: Configuration du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée.	17
Figure 2.2: Le rapport de Y , calculé par (2.4), varie en fonction de F_1 . (— — —) : $\beta = 1$	19

Figure 2.3: Le rapport de Y varie en fonction de F_1 . (o) : expression(2.6), (+) : expression(2.4).	20
Figure 2.4: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1	21
Figure 2.5: Variation de η en fonction de F_1 . (o) : équation (2.7), (*) avec frottement.	21
Figure 2.6: Configuration du ressaut contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire de forme composée.....	23
Figure 2.7: Le canal ayant servi à l'expérimentation(F. Riguet et al 2019).	25
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.....	26
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 ,.....	27
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.	28

CHAPITRE 3: RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRIANGULAIRE A'PAROIS RUGUEUSES

Figure 3.1: Tapis rugueux de rugosité équivalente $\varepsilon = 8,73\text{mm}$	32
Figure 3.2:Tapis collé soigneusement sur les parois du canal	33
Figure 3.3: Coefficient a issu de la relation (3.1) varie en fonction de la rugosité équivalente« ε ».	34
Figure 3.4: La longueur relative expérimentale $(L_j / h_1)_{Exp}$ varie en fonction de $\xi(\varepsilon, F_1)$ montrée par la relation (3.3). (o) Les motifs expérimentaux du ressaut hydraulique.	35

Figure 3.5: Rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut varie en fonction de $F1$, pour les différentes rugosités équivalentes ε . (- - -) : Courbes d'ajustement. (—●—) : $Y(F1)$ pour $\varepsilon \rightarrow 0$ (Wanoschek et Hager, 1987) ...	36
Figure 3.6: Illustration du coefficient b de la relation (3.5) en fonction de la rugosité équivalente ε (—) Courbe tracée issue par la relation (3.6).....	37
Figure 3.7: Représentation Y_{Exp} en fonction de $\Phi(F1, \varepsilon)$	38
DEUXIEME PARTIE	
CHAPITRE 1 : Protocol Experimental	
Figure 1.1: Le canal d'expérimentation.	42
Figure 1.2: Schématisation de déroulement de l'expérimentation.	43
Figure 1.3 : Une pompe axiale.....	43
Figure 1.4: La vanne de régulation du débit.....	43
Figure 1.5: Le déversoir rectangulaire avec contraction latérale pour mesurer les débits pompés.....	44
Figure 1.6: Schéma de définition de la deuxième partie du canal avec déversoir, Hachemi, 2007.....	44
Figure 1.7: La profondeur d'eau mesuré par pointe Limnométrique.	45
Figure 1.8: Les ouvertures (h_1 (cm) = 02 ; 02.5 ; 03 ; 03.5 et 04).....	46
Figure 1.9: Les parois minces pour contrôler la formation du ressaut.	46
Figure 1.10: Le ressaut hydraulique dans un canal composé avec lit majeur rugueux.a) Vue à l'amont du ressaut. b) Vue à l'aval du ressaut.	48
Figure 1.11: Les tapis rugueux imposés au lit majeur du canal composé.a) canal avec fond lisse. b) canal avec lit rugueux.	48
(a	49
(b	49
Figure 1.12: Les tapis rugueux divers (a) La méthode de conception des tapis rugueux ; (b) Les divers tapis rugueux.....	49

CHAPITRE 2:Interprétation des Résultats Expérimentaux de la rentabilité du ressaut hydraulique

- Figure 2.1 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour cinq valeurs différentes de " ε ": ($\diamond$) 12 mm ;($\square$) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; (O) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements..... 53
- Figure 2.2: Variation du coefficient " a_4 " en fonction de la rugosité relative ε/b dans le lit mineur. 54
- Figure2.3 : Variation de la hauteur relative S/h_1 en fonction de $f(\varepsilon/b, F_1)$.($\square$) Les points expérimentaux du ressaut hydraulique contrôlé à fond rugueux. (—) Première bissectrice..... 55
- Figure 2.4: Variation de la hauteur relative S/h_1 en fonction du nombre de Froude dans le lit majeur, pour cinq rugosités différentes testées " ε ".($\diamond$) 12 mm ;($\square$) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; (O) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements. 59
- Figure 2.5: Variation du coefficient " b_4 " en fonction de la rugosité relative ε/b dans le lit majeur. 60
- Figure 2.6 : Variation de la hauteur relative S/h_1 en fonction de $f(\varepsilon/b, F_1)$.($\square$) Les points expérimentaux du ressaut hydraulique contrôlé à fond rugueux. (—) Première bissectrice..... 61
- Figure 2.7: La variation de la hauteur relative S/h_1 expérimentale en fonction de $f(\varepsilon/b, F_1)$ pour les deux cas ($\square$ lit mineur ; $\square$ lit majeur)...... 64
- Figure 2.8: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . Les motifs représentent les points expérimentaux du ressaut en canal rectangulaire de la section composé à fond rugueux, de rugosité relative ε/b dans le lit mineur :($\diamond$)= 12 mm ; ($\square$)= 10 mm ; (Δ)= 08 mm ; (O) = 06 mm et (*) =00 mm..... 65
- Figure 2.9: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . Les motifs colorés représentent les points expérimentaux du ressaut en canal rectangulaire de la section composé à fond rugueux, de rugosité relative ε/b

dans le lit majeur :($\diamond$) = 12 mm ; ($\square$)= 10 mm ; (Δ)= 08 mm ; (0) = 06 mm et (*) =00 mm.....	66
Figure 2.10: Profile de surface du ressaut.	67
Figure 2.11: Profils du ressaut hydraulique pour le lit mineur dans un canal rectangulaire de la forme composée à fond rugueux pour quatre rugosités différentes : ($\diamond$) 06 mm ; ($\square$) 08 mm ; (Δ) 10 mm et ($\circ$) 12 mm.	67
Figure 2.12: Profils du ressaut hydraulique le lit majeur dans un canal rectangulaire de la forme composée à fond rugueux pour quatre rugosités différentes : ($\diamond$) 06 mm ; ($\square$) 08 mm ; (Δ) 10 mm et ($\circ$) 12 mm.	68

Liste de tableau :

Tableau 3.1 :Les valeurs du coefficient a issues de la relation (3.1).....	34
Tableau 3.2: Coefficients b et c issus de la relation (3.5).	37
Tableau 2.1 : coefficient a_4 des courbes d'ajustements.	53
Tableau 2.2: Ecart relatifs entre S/h_1 expérimentale et S/h_1 d'ajustements dans le lit mineur.	55
Tableau 2.2 (suite) : Ecart relatifs entre S/h_1 expérimentale et S/h_1 d'ajustement dans le lit mineur.....	56
Tableau 2.2 (suite et fin) :Ecart relatifs entre S/h_1 expérimentale et S/h_1 d'ajustement dans le lit mineur.....	58
Tableau 2.3: coefficient b_4 des courbes d'ajustements.....	59
Tableau 2.4: Ecart relatifs entre S/h_1 expérimentale et S/h_1 d'ajustements dans le lit majeur.	61
Tableau 2.4 (suite et fin) : Ecart relatifs entre S/h_1 expérimentale et S/h_1 d'ajustement dans le lit majeur.....	62

Introduction Générale

Introduction Générale

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 des pressions à l'intérieur du ressaut hydraulique.

Le phénomène du ressaut hydraulique peut se produire à l'aval immédiat d'une vannedu 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 present mémoire a pour but d'étudier, d'un point de vue expérimental, la rentabilité du ressaut hydraulique contrôlé par une paroi mince qui se forme en canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux. Quelques approches fonctionnelles en terme adimensionnel, liant les caractéristiques du ressaut, apparaissant l'influence de la rugosité imposée au lit mineur.

A notre connaissance, la rentabilité de ce type du ressaut hydraulique n'a pas été entamé au paravant, c'est à cet effet que notre thème de recherche a été abordé.

**Chapitre 1 : Ressaut
hydraulique en 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 à l'écoulement fluvial. Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur L_r appelée longueur du rouleau 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 évalué par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne. Après sa formation, la torrencialité 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 .

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.

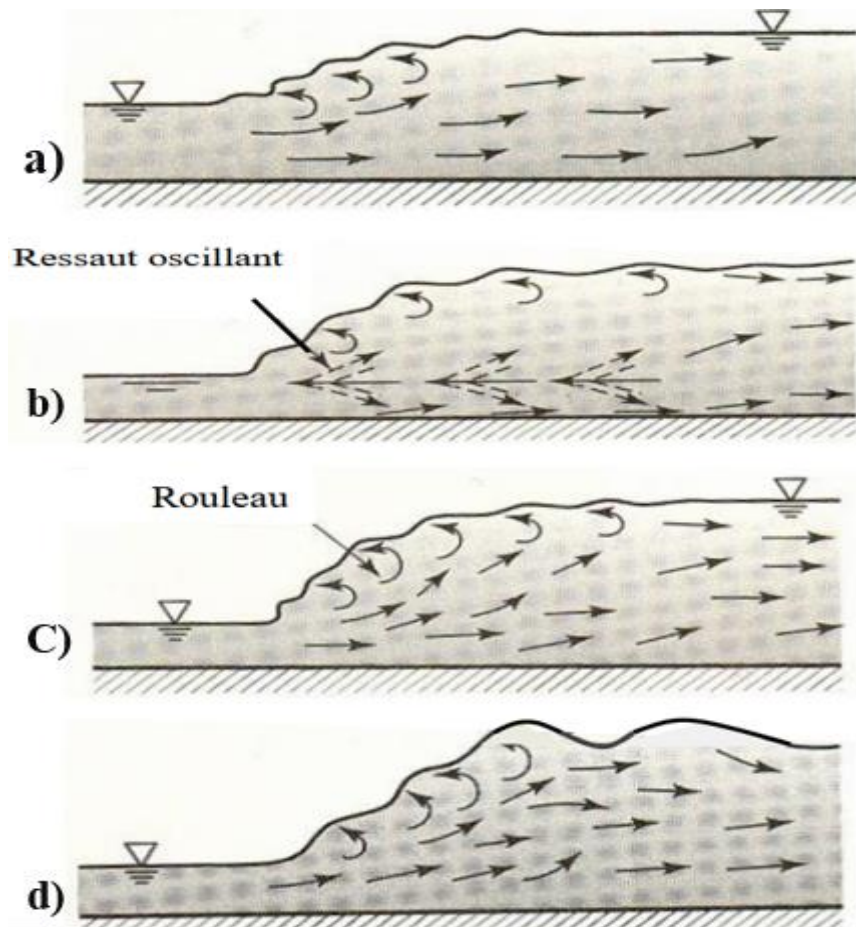


Figure 1.1: Les différentes configurations du ressaut classique selon Peterka et Bradley (1957). a) Pré-ressaut, b) Ressaut de passage, C) Ressaut stable, d) Ressaut clapoteux.

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 $M = 0$.

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

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

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

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

I.2.3. Les caractéristiques du ressaut

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

I.2.3.1. Longueurs du ressaut

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

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

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

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

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

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

I.2.3.2. Longueur du rouleau de surface

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

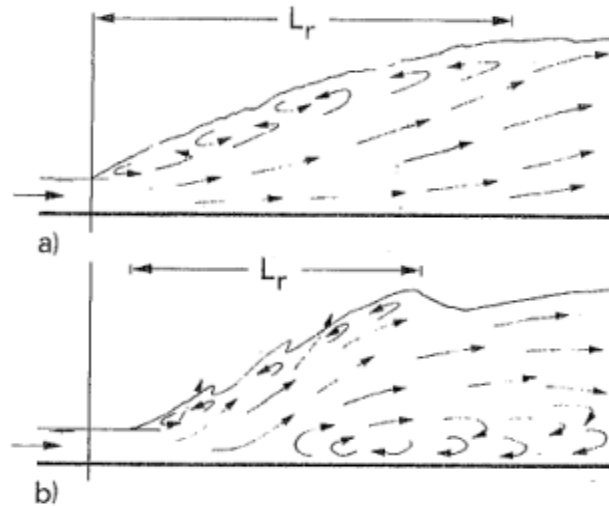


Figure 1.2: Configuration du ressaut hydraulique. (a) rouleau de surface développé. b) rouleau de surface non développé.

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

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

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

« T_{gh} » 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. 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 1.3.

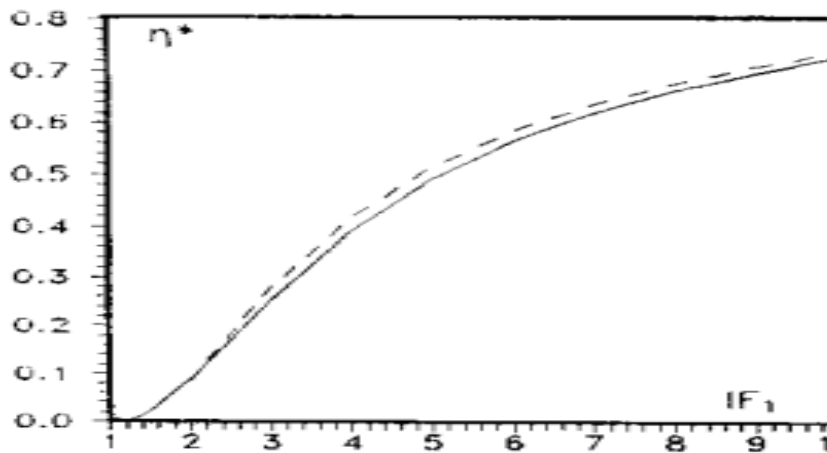


Figure 1.3: Le rendement η^* du ressaut classique qui varie en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbe tracée selon la relation (1.9). (---) Courbe tracée selon la relation (1.10).

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 .

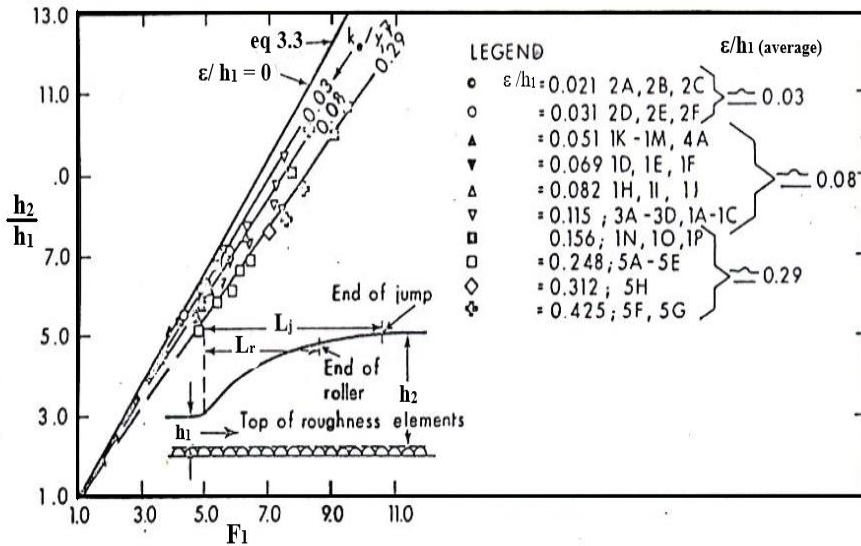


Figure 1.4 : Variation de $y = h_2 / h_1$ en fonction de F_1 .

L'allure de l'équation indiquée dans la Figure (1.4), 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 :

$$\begin{aligned} h_2/h_1 &= 1.30 F_1 - 0.3 \quad \text{pour } \varepsilon/h_1 = 0.03 \\ h_2/h_1 &= 1.22 F_1 - 0.24 \quad \text{pour } \varepsilon/h_1 = 0.08 \quad (1.14) \\ h_2/h_1 &= 1.10 F_1 - 0.10 \quad \text{pour } \varepsilon/h_1 = 0.29 \end{aligned}$$

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 (1.4).

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.

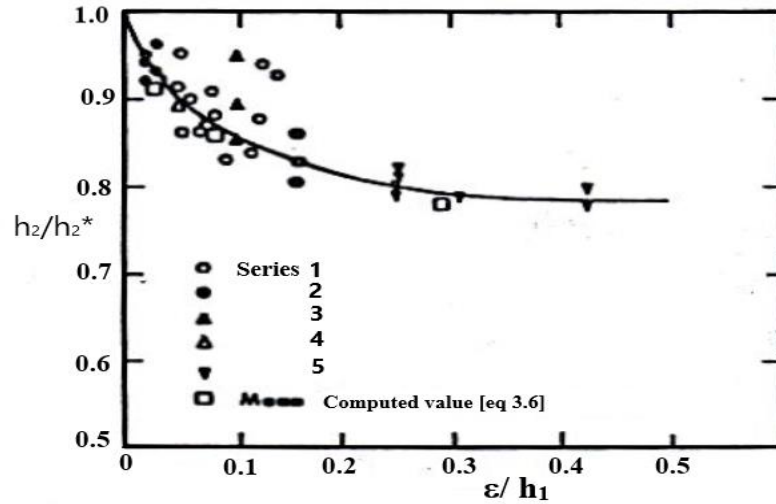


Figure 1.5 : Variation de h_2/h_2^* en fonction de ε/h_1 .

1.3.1.2.2. La longueur du rouleau de surface L_r

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.

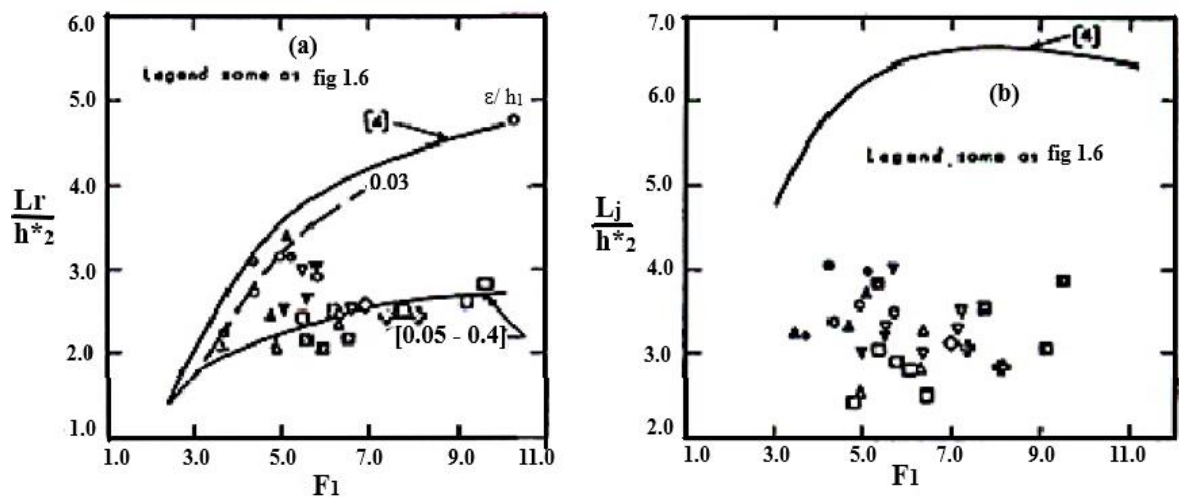


Figure 1.6: La variation de la longueur relative des caractéristiques du ressaut : (a) L_r/h_2^* en fonction de F_1 ; (b) L_j/h_2^* en fonction de F_1 .

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

I.4.1.Approche de RAJARATNAM (2002)

I.4.1.1. Le protocole expérimental

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

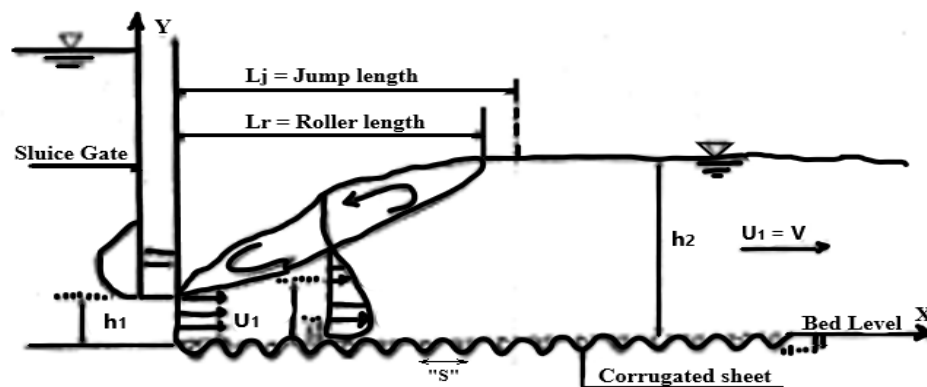


Figure 1.7 : Configuration du ressaut hydraulique avec lit ondulé.

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.

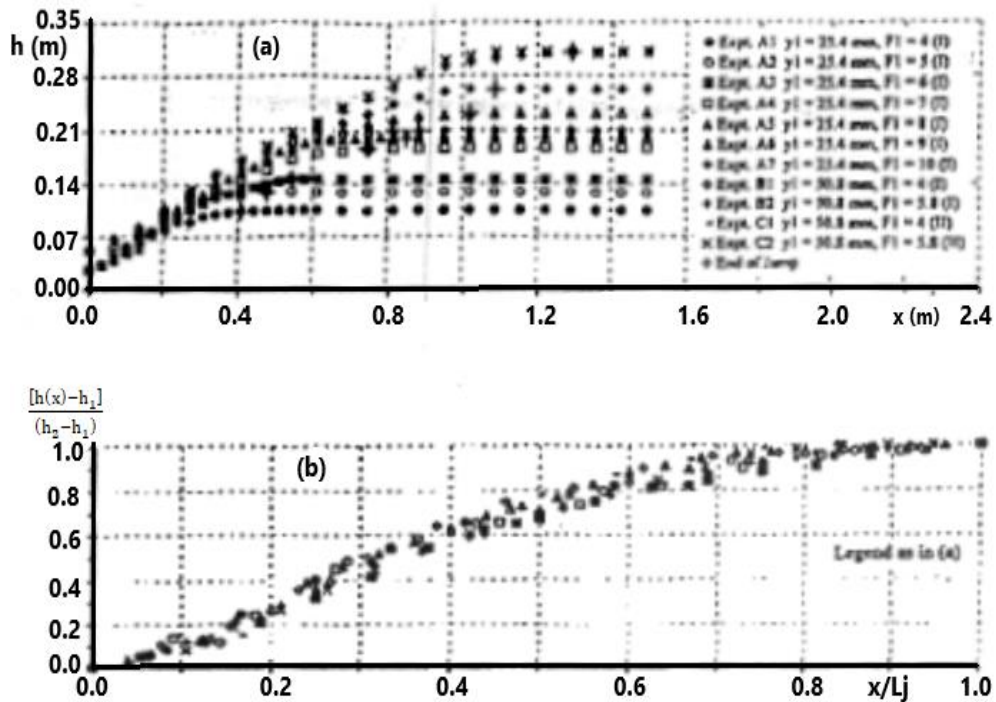


Figure 1.8 : (a) Configuration de surface du ressaut hydraulique ; (b) Profil généralisé de surface du ressaut hydraulique.

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 aussi réécrite comme suit :

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

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

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

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

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

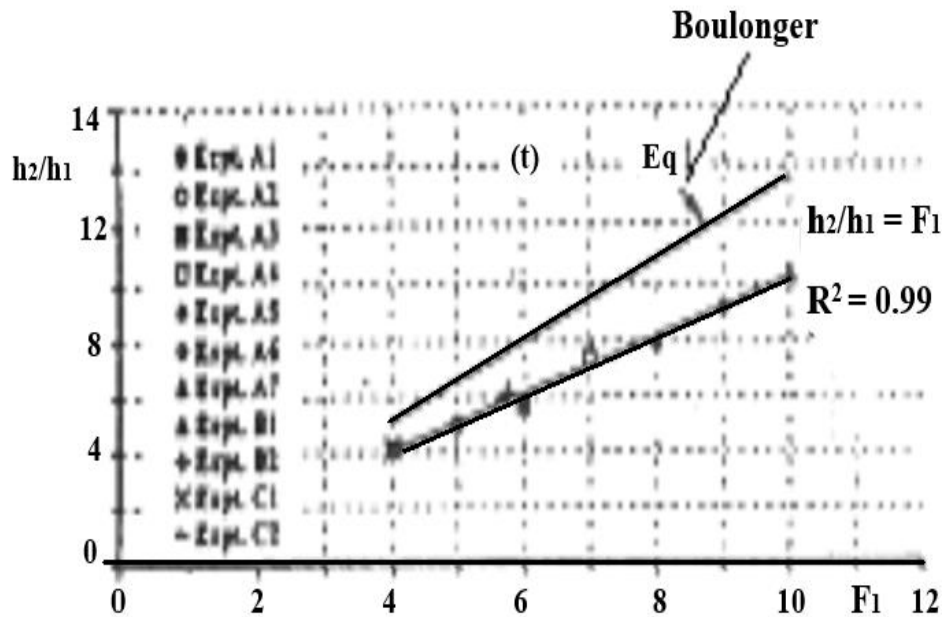


Figure 1.9 : Variation de $\frac{h_2}{h_1}$ en fonction du nombre de Froude F_1 .

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 testées l'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 caractéristique 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.

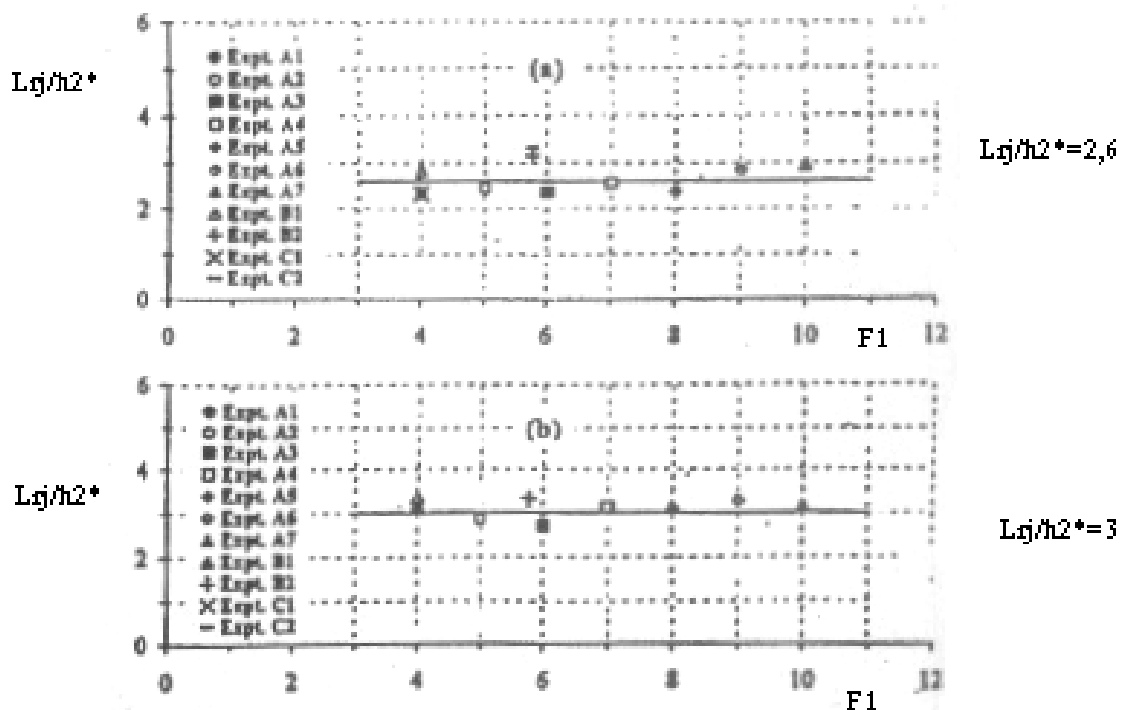


Figure 1.3: Configuration de la longueur relative du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude F_1 .

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

I.4. CONCLUSION

En se basant sur les résultats obtenus des mesures expérimentales par Rajaratnam en 1968 et pour les différents ressauts contrôlés et créés dans le banc d'expérimentation de forme rectangulaire à pente nulle avec un fond rugueux, dans lequel la rugosité imposée relative

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 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.

**Chapitre 2 : 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, 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. 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.

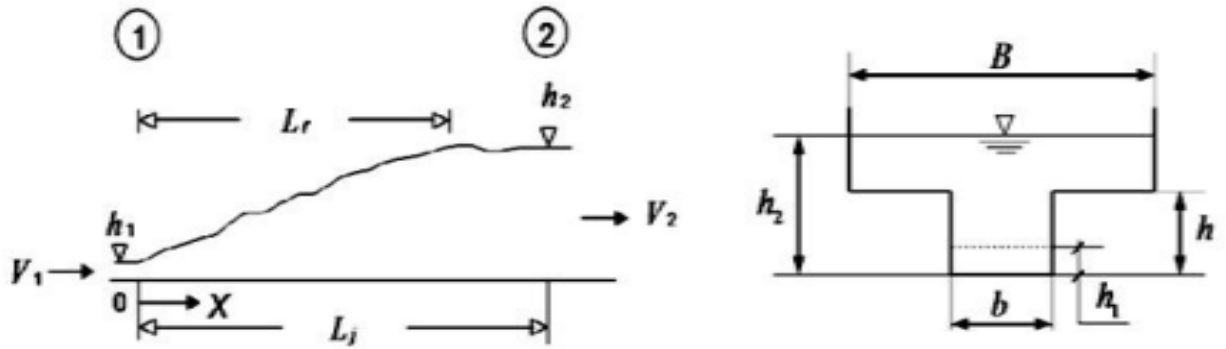


Figure 2.1: Configuration du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée

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 def_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 $V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q$, l'expression (2.3) se transforme après réarrangement de la manière suivante :

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

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

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

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

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

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 $F_{1\min} = [1/(2\sqrt{2})]\sqrt{(2/\tau + 1)^2 - 1}$ 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,

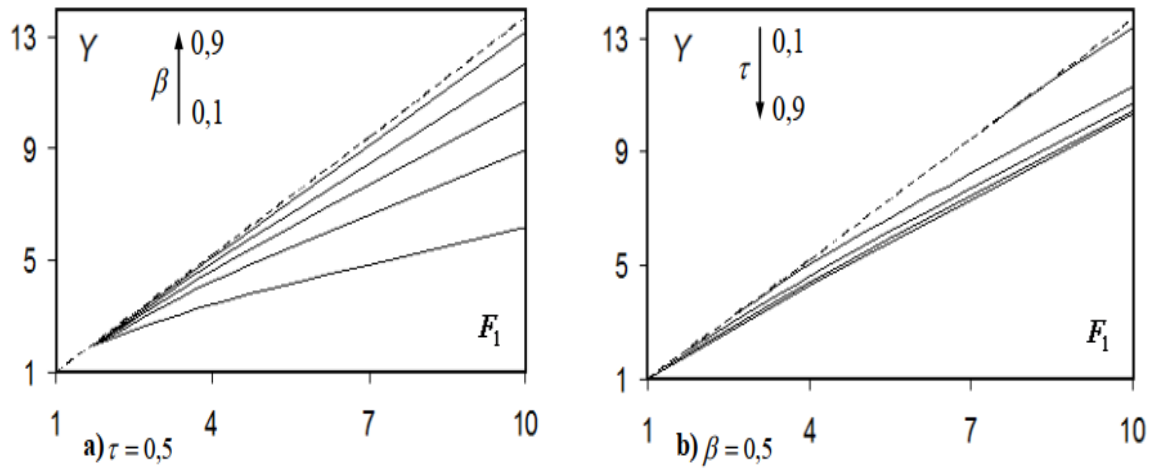


Figure 2.2: Le rapport de Y , calculé par (2.4), varie en fonction de F_1 . (— — —) : $\beta = 1$.

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.

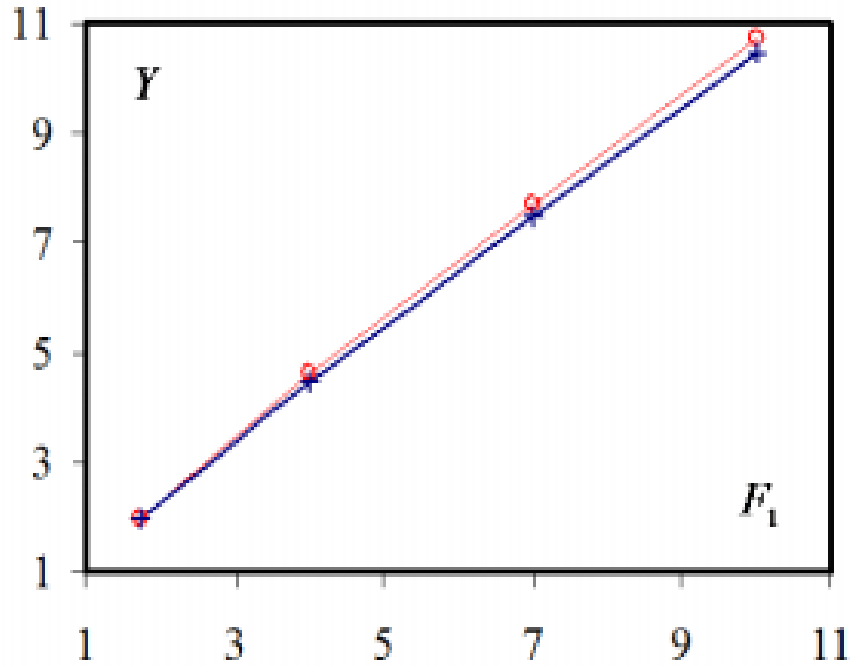


Figure 2.3: Le rapport de Y varie en fonction de F_1 . (o) : expression(2.6), (+) : expression(2.4).

II.2.2. 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 .

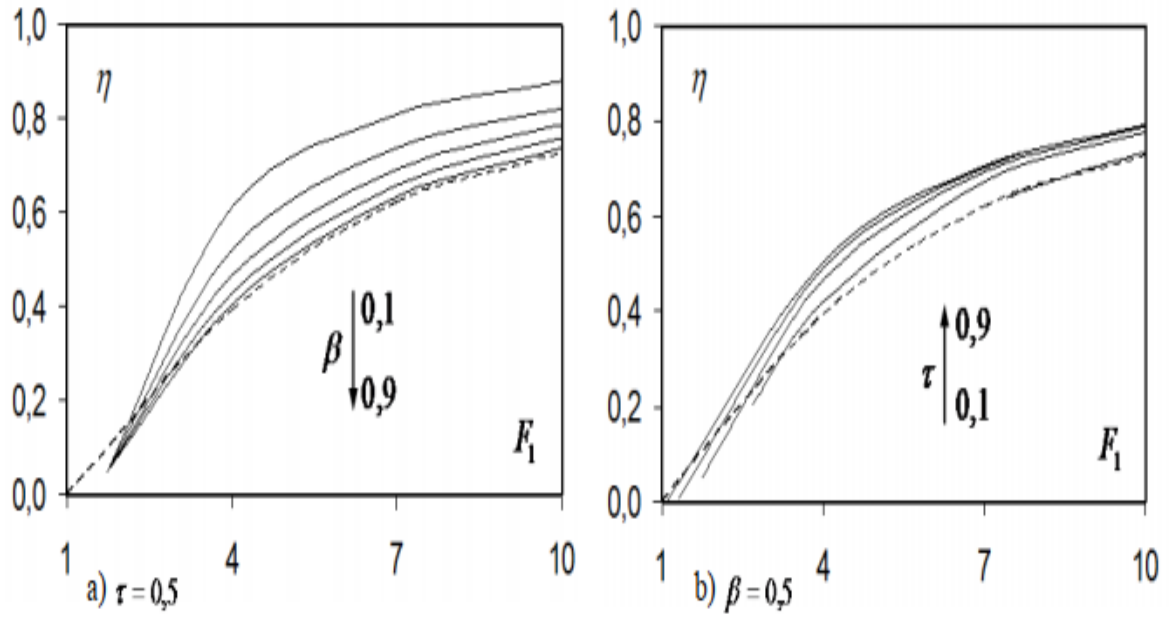


Figure 2.4: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 .

(— — —) : $\beta=1$, 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.

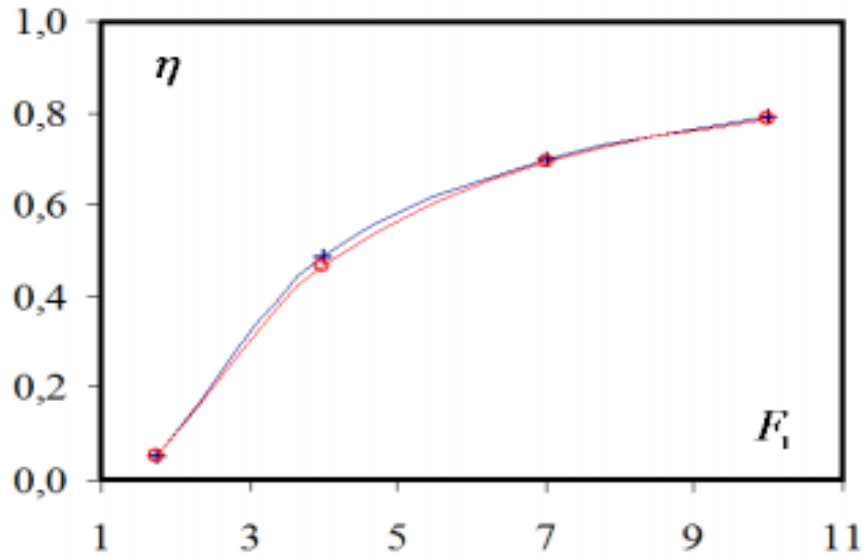


Figure 2.5: Variation de η en fonction de F_1 . (○) : équation (2.7), (*) avec frottement.

II.3. L'ETUDE EXPERIMENTALE DES CARACTERISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSEE (APPROCHE DE RIGUET EN 2019)

II.3.1. La problématique

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

CHAPITRE 2 L'etude experimental des caractéristiques du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée

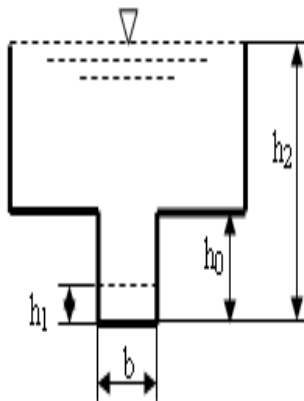
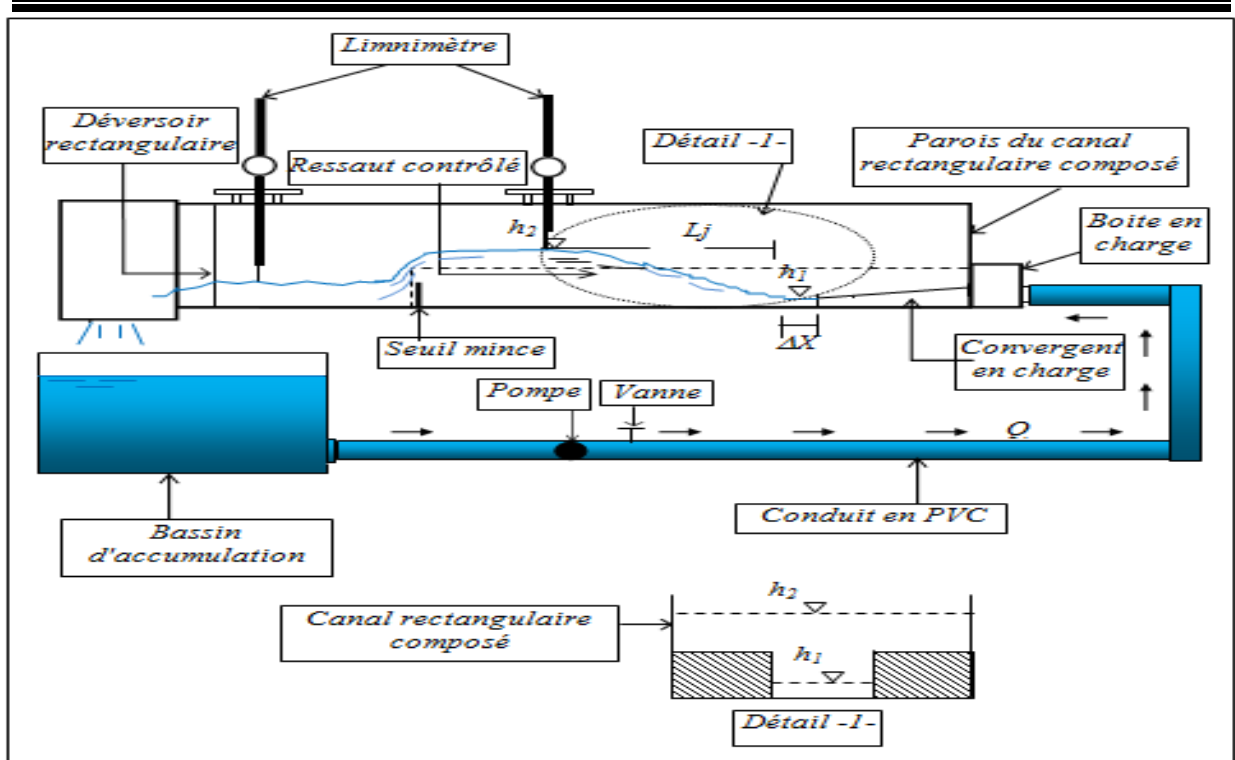


Figure 2.6: Configuration du ressaut contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire de forme composée.

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 4cm pour le lit mineur et celui majeur du canal rectangulaire de forme composée.

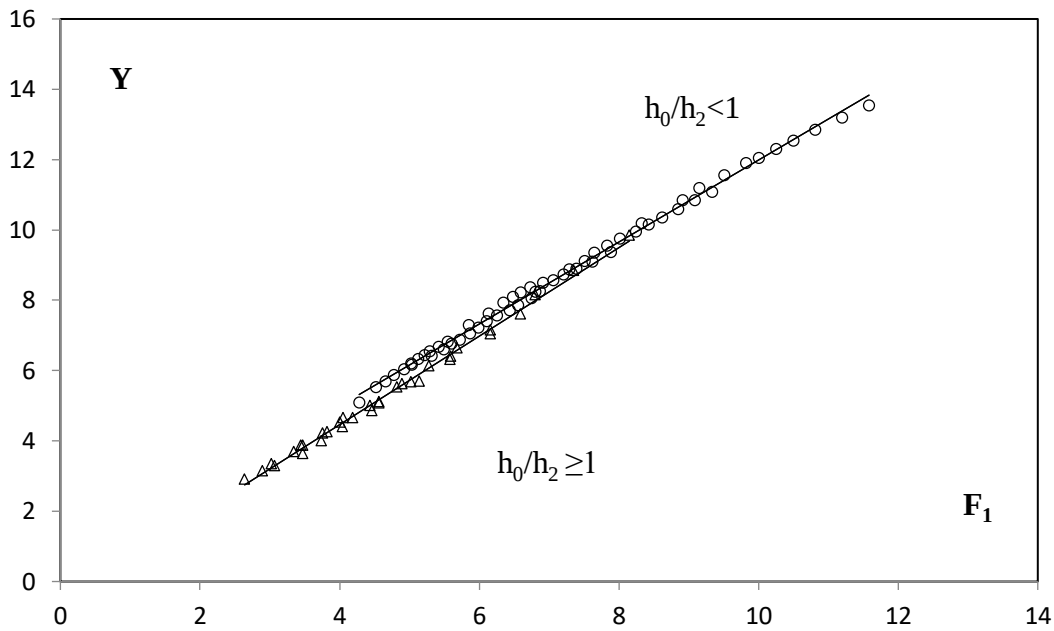


Figure 2.8: Le rapport des hauteurs conjuguées Y varie en fonction de Froude F_1 pour le canal composée. (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustements.

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

$$\begin{aligned} &\text{Pour } h_0/h_2 \geq 1 \text{ et } 2.64 < F_1 < 8.14 \\ &Y = 1,258 F_1 - 0,573 \quad (2.10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Pour } h_0/h_2 < 1 \text{ et } 4.27 < F_1 < 11.58 \\ &Y = 1,165 F_1 + 0,328 \quad (2.11) \end{aligned}$$

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).

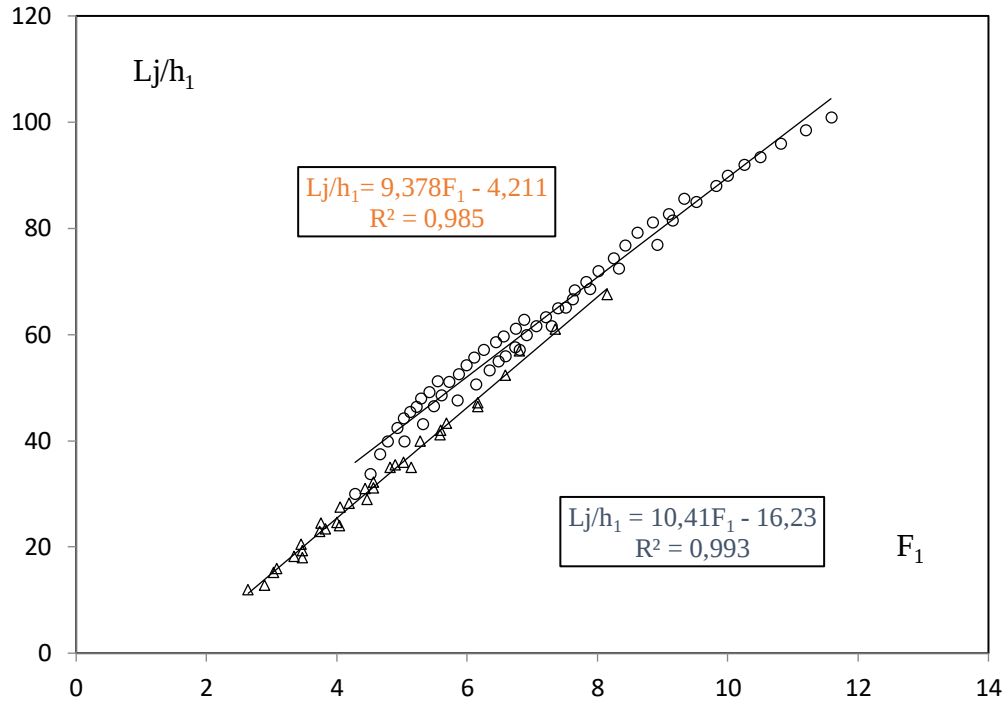


Figure.2.9 : La représentation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude F_1 ,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

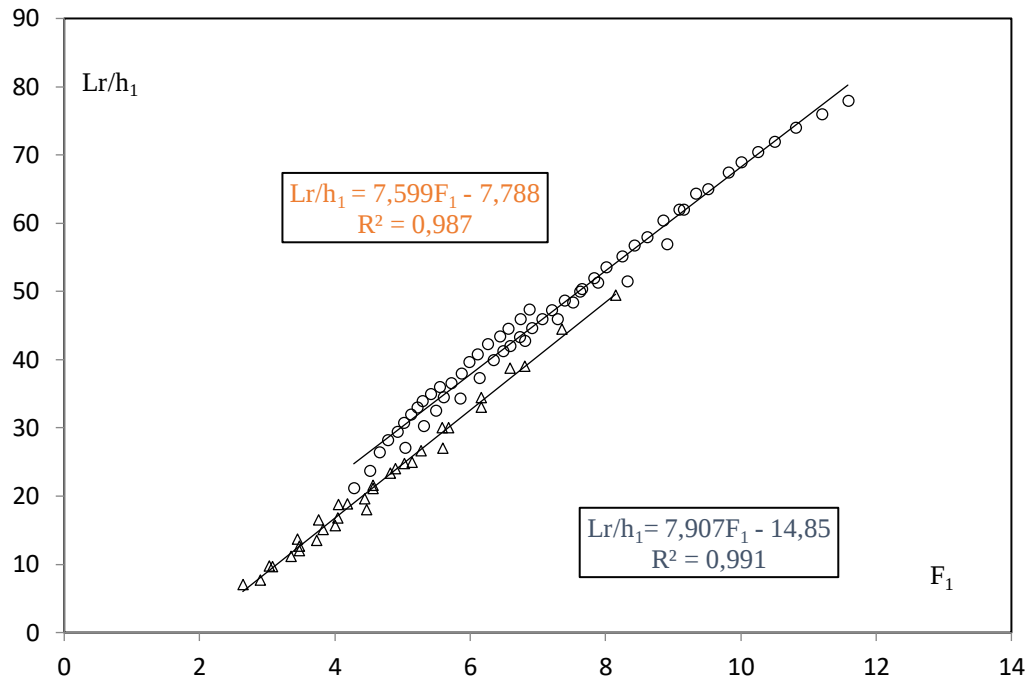


Figure 2.10: Représentation de la longueur relative Lr/h_1 du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude F_1 , (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.

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.

**CHAPITRE 3 : Ressaut
hydraulique dans un canal
triangulaire à parois
rugueuses (approche de
Kateb 2006)**

III.1. INTRODUCTION

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

III.2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

III.2.1. Déroulement des essais

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

✚ Le nombre de Froude F_1 tel que :

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

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

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

III.2.2. Mode de préparation des tapis rugueux.

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

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

I. Cette gamme est lavée puis séchée après l'obtention de la série voulue.

II. Selon le refus du tamis normalisé cette gamme choisie varie entre 4 et 12,50mm. Cette variété de particules obtenues sont réparties uniformément sur une toile en plastique (Figure 3.1), puis collées par une colle s'appelle "BECTA 10000".

III. La valeur de la rugosité absolue est évaluée par un appareil numérique s'appelle "Palmer", de précision 0,001mm.

IV. Enfin, le tapis rugueux obtenu est collé soigneusement sur les deux côtés du canal triangulaire (Figure3.2).



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



Figure 3.2: Tapis collé soigneusement sur les parois du canal

III.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

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

Cette Figure (3.3) représente la variation L_j/h_1 du ressaut hydraulique qui varie en fonction du nombre de Froude F_1 , avec quatre tapis rugueux testés. On constate quatre allures perceptibles, qui correspondent chacun à une rugosité équivalente « ε ». Ainsi on déduit que pour une rugosité fixée, l'augmentation de la longueur relative du ressaut engendre celle du nombre de Froude F_1 . Par ailleurs, pour un nombre de Froude F_1 fixé, la diminution de la longueur relative du ressaut hydraulique est engendrée par l'augmentation de la rugosité absolue., en outre, l'ajustement des mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés linéaires, a donné que pour chaque rugosité testée, la longueur relative L_j/h_1 pourrait être écrite selon la relation suivante :

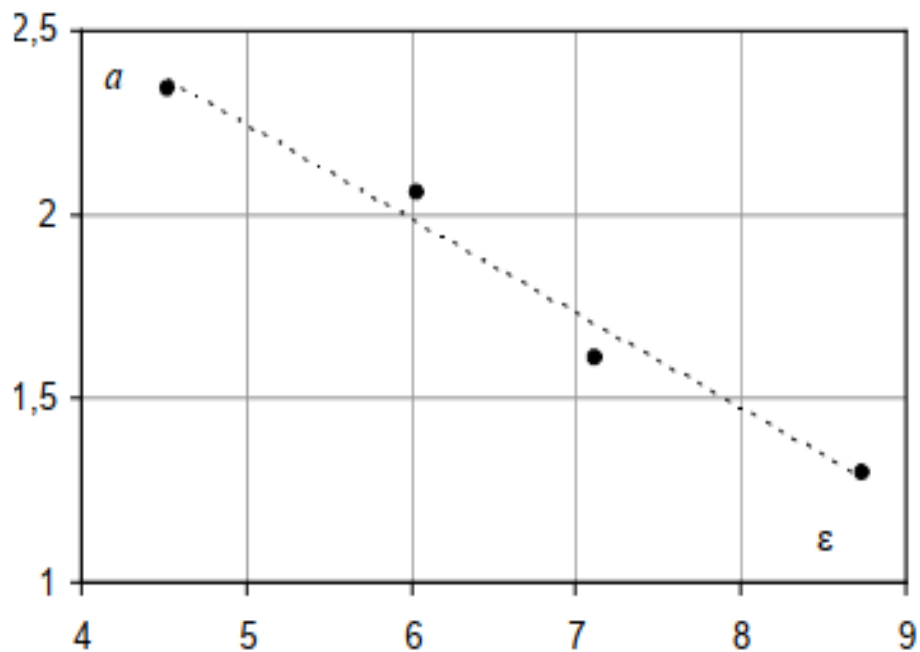
$$L_j / h_1 = a (F_1 - 1) \quad (3.1)$$

La récapitulation des valeurs du coefficient a et celles du coefficient de corrélation R^2 issues de l'ajustement établi est indiqué selon le tableau 3.1.

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

ε (mm)	a	R^2
4,53	2,3	0,9
6,04	2,0	0,9
7,11	1,6	0,9
8,73	1,3	0,9

La représentation de la rugosité ε en fonction du coefficient a est illustrée selon la figure 3.4.

**Figure 3.3:** Coefficient a issu de la relation (3.1) varie en fonction de la rugosité équivalente « ε ».

L'ajustement de la rugosité avec le coefficient a , par la méthode des moindres carrés, a donné la relation suivante :

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

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

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

L'application de la relation (3.3) est justifiée pour la gamme $4,53\text{mm} \leq \varepsilon \leq 8,73\text{mm}$.

La variation de la fonction $L_j/h_1 = \xi(\varepsilon, F_1)$ exprimée par la relation (3.3) est montrée par la figure (3.5). Par conséquent, la confirmation que $(L_j/h_1)_{Exp}$ est raisonnablement définie par la relation (3.3) car la majorité des mesures expérimentales se répartissent autour de la première bissectrice.

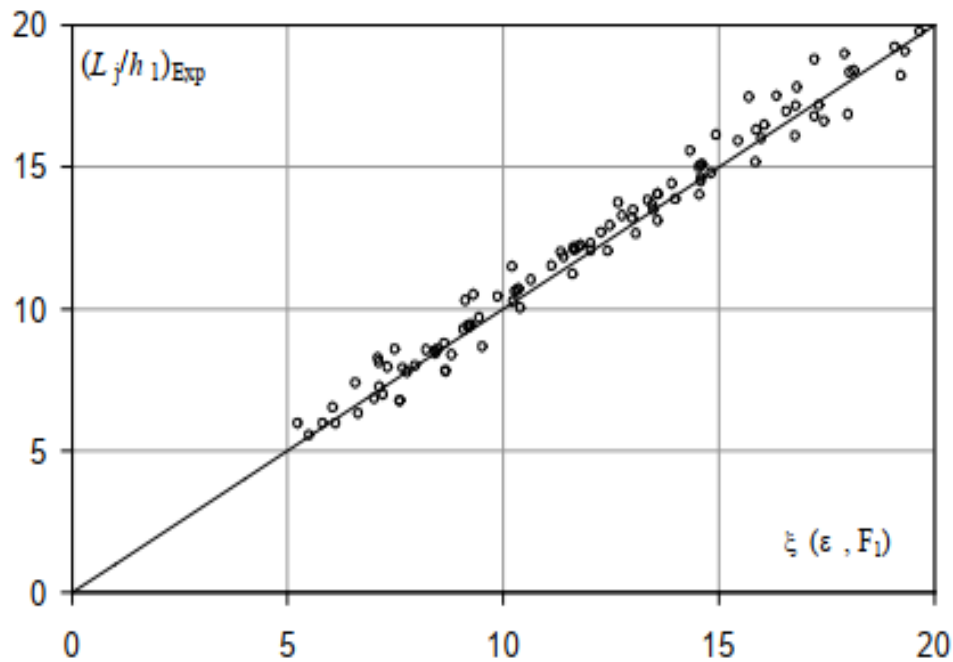


Figure 3.4: La longueur relative expérimentale $(L_j/h_1)_{Exp}$ varie en fonction de $\xi(\varepsilon, F_1)$ montrée par la relation (3.3). (o) Les motifs expérimentaux du ressaut hydraulique.

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

La représentation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut qui varie en fonction du nombre de Froude incident F_1 , pour différentes rugosités testées est indiquée par la figure 3.6. Nous constatons que l'augmentation du rapport Y des hauteurs conjuguées entraîne l'augmentation du nombre de Froude incident F_1 , pour les quatre rugosités testées. On remarque aussi, que pour un nombre de Froude incident F_1 fixé, la diminution du rapport Y provoque l'augmentation de la rugosité testée « ε ». Quatre allures de points, correspondant chacune à une valeur donnée de la rugosité absolue « ε », sont montrés par la figure (3.6), une représentation de la variation $Y(F_1)$ correspondant à une rugosité équivalente $\varepsilon \rightarrow 0$ est illustrée par la même figure citée ci-dessous. Cette courbe a été représentée selon l'approche de Wanoschek et Hager (1987), inspirée par l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut hydraulique telle que :

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

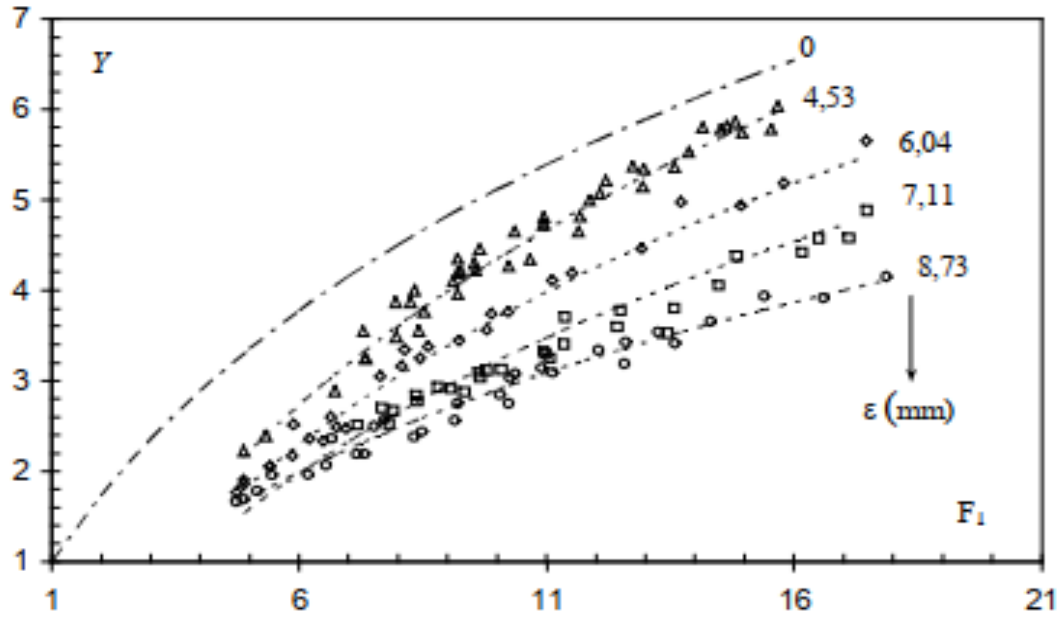


Figure 3.5: Rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut varie en fonction de F_1 , pour les différentes rugosités équivalentes ε . (---) : Courbes d'ajustement. (—●—) : $Y(F_1)$ pour $\varepsilon \rightarrow 0$ (Wanoschek et Hager, 1987)

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

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

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

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

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

On constate d'après le tableau ci-dessus (3.2), l'augmentation de la rugosité équivalente « ε » avec la diminution du coefficient b . L'ajustement des couples de valeurs (ε, b) par la méthode des moindres carrés a donné une relation de type linéaire d'équation suivante :

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

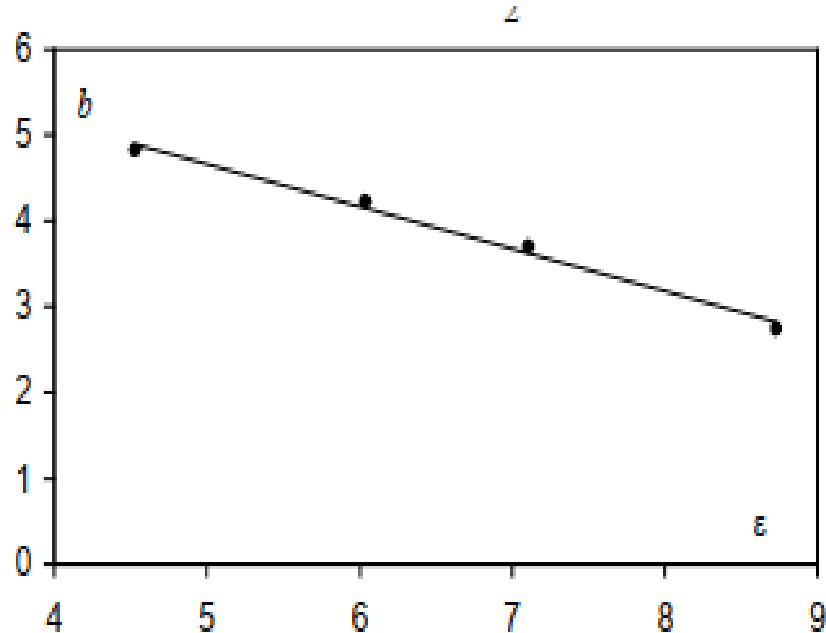


Figure 3.6: Illustration du coefficient b de la relation (3.6) en fonction de la rugosité équivalente ε (—) Courbe tracée issue par la relation (3.6).

D'après Le tableau (3.2) on constate que le coefficient c ne varie pas en fonction de la rugosité testée « ε » ainsi une valeur moyenne constante lui a été attribué.

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

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

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

L'approche expérimentale (3.8) est justifiée dans la gamme $4,53 \text{ mm} \leq \varepsilon \leq 8,73 \text{ mm}$.

La représentation de $Y = \Phi(F_1, \varepsilon)$ exprimée par l'approche expérimentale obtenue (3.8) est illustrée graphiquement sur la figure (3.8) variant en fonction des valeurs expérimentales Y_{Exp} .

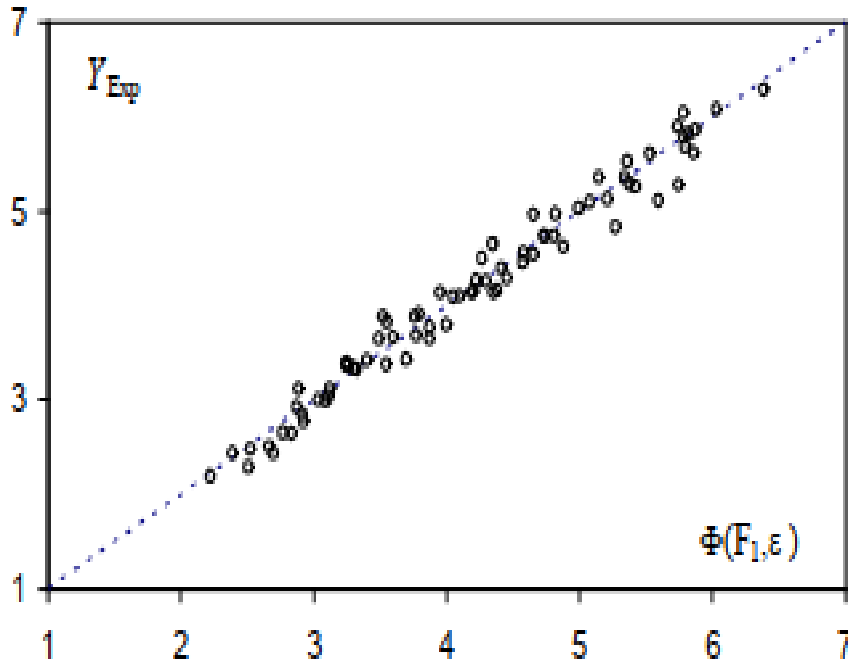


Figure 3.7: Représentation Y_{Exp} en fonction de $\Phi(F_1, \varepsilon)$.

(- -) : la Première bissectrice.

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

III.4. CONCLUSION

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

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

Il a été remarqué que pour une valeur fixée du nombre de Froude incident, la diminution de la longueur relative du ressaut entraîne l'augmentation de la rugosité testée. Par-ailleurs, l'analyse statistique des mesures expérimentales adonné que, pour chaque rugosité équivalente testée expérimentalement, le nombre de Froude incident F_1 est lié à la longueur relative L_j/h_1 par une approche expérimentale adimensionnelle obtenue **(3.3)**. En second temps, la variation du nombre de Froude incident F_1 en fonction du rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut hydraulique a été étudiée sous l'effet de chaque rugosité équivalente examinée.

Nous avons pu constater que, pour un nombre de Froude F_1 fixé, la diminution du rapport Y engendre l'augmentation de la rugosité équivalente. Cette approche adimensionnelle obtenue $Y(F_1, \varepsilon)$ a été modélisée par une loi de type logarithmique [Equation **(3.8)**], déduite par l'analyse statistique des mesures expérimentales.

DEUXIEME PARTIE

CHAPITRE 1 : Protocol Expérimental

I.1. INTRODUCTION

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

I.2. Appareil de mesures

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



Figure 1.1: 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 à 55,55 l/s. Les essais ont été réalisés dans un canal conçu au « Laboratoire d'exploitation et valorisation des ressources naturelles en zones aride » de l'Université de Ouargla.

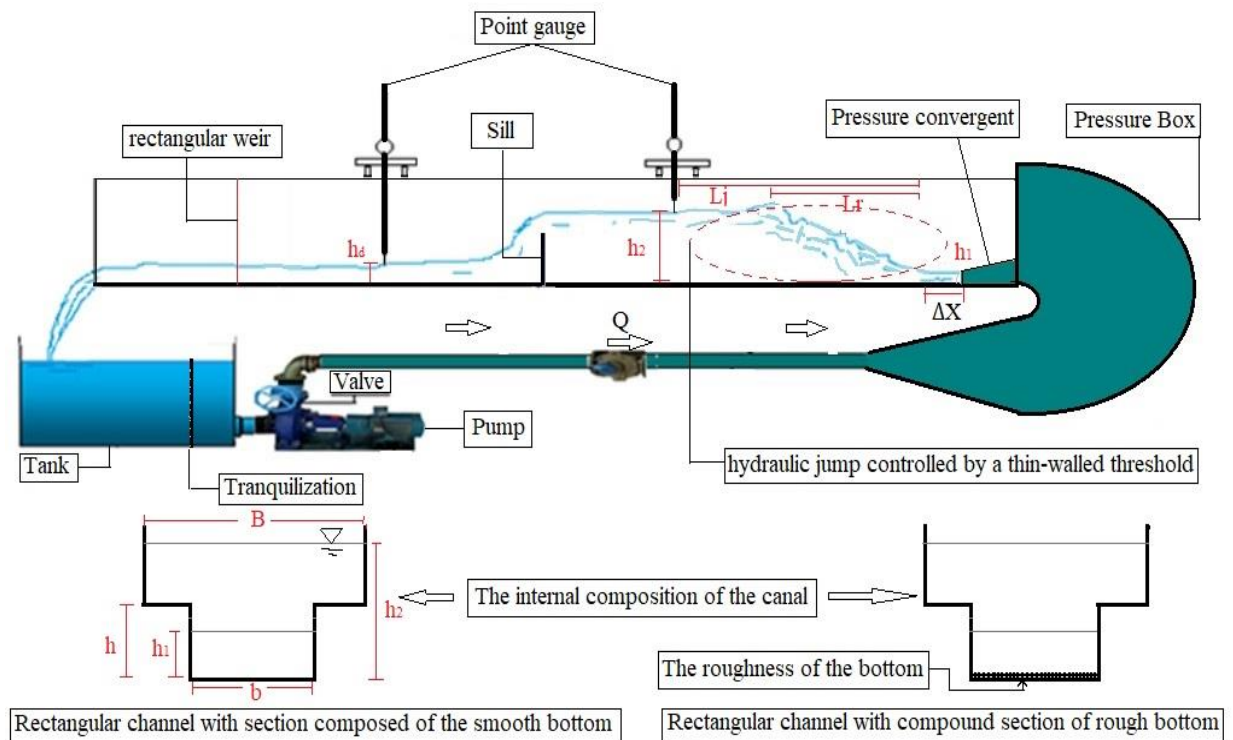


Figure 1.2: Schématisation de déroulement de l'expérience.



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



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

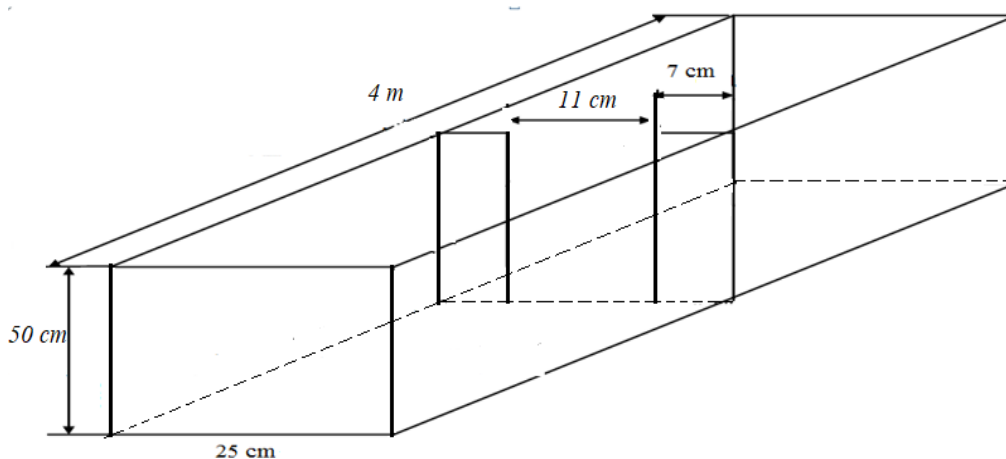


Figure 1.6: Schéma de définition de la deuxième partie du canal avec déversoir, *Hachemi, 2007*.

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 Limnométrique

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

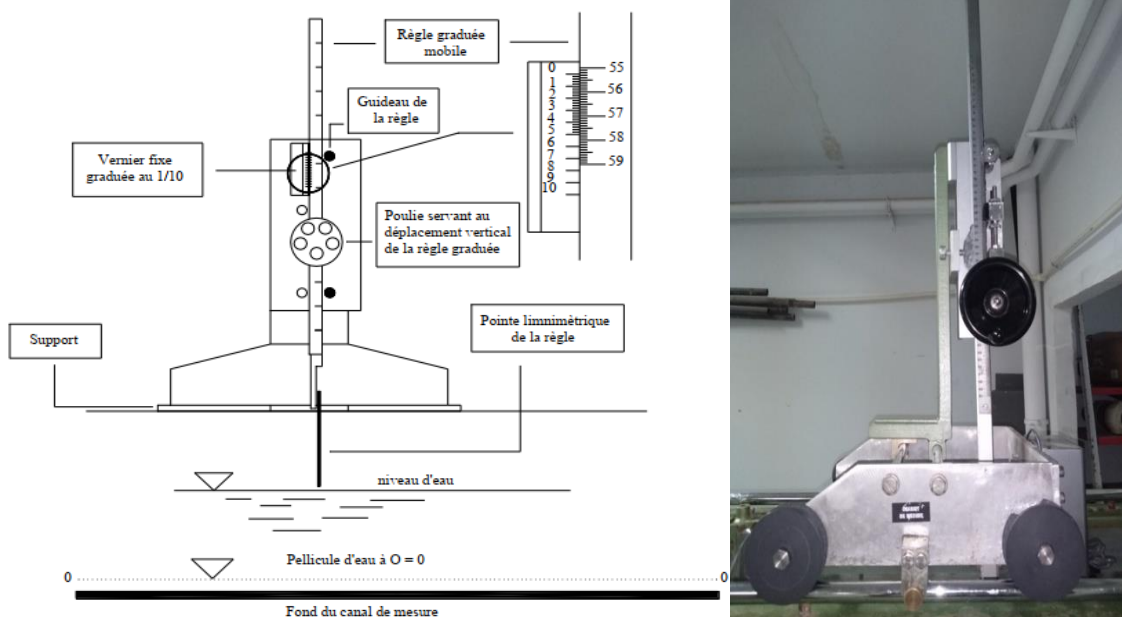


Figure 1.7: La profondeur d'eau mesuré par pointe Limnométrique.

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 un fond rugueux. Elle a été réalisée avec cinq ouvertures de la section amont (h_1 (cm) = 02 ; 02.5 ; 03 ; 03.5 et 04). Une gamme des mesures des nombres de Froude a été obtenue ($2 < F_1 < 20$).

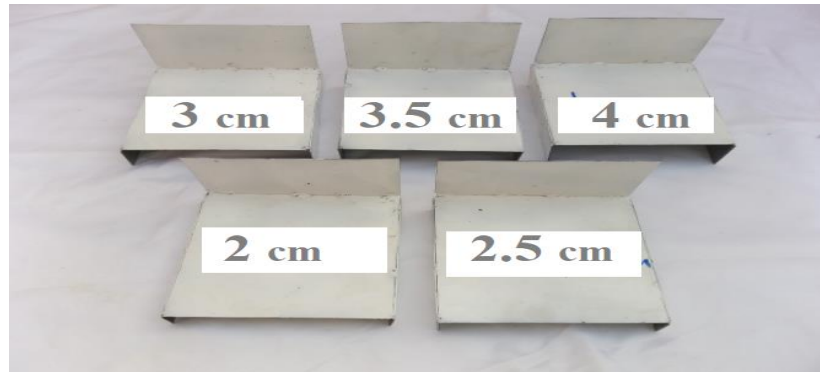


Figure 1.8: Les ouvertures (h_1 (cm) = 02 ; 02.5 ; 03 ; 03.5 et 04).

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. []

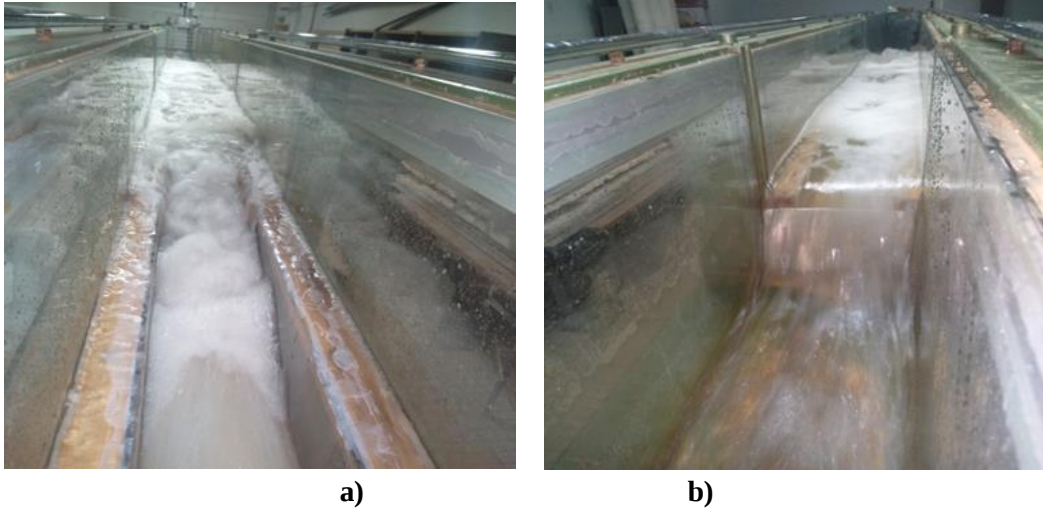


Figure 1.10: Le ressaut hydraulique dans un canal composé avec lit majeur rugueux. a) Vue à l'amont du ressaut. b) Vue à l'aval du ressaut.

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

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

Des Pellets en plastique ont été préparés avec des trous au milieu, 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 :

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

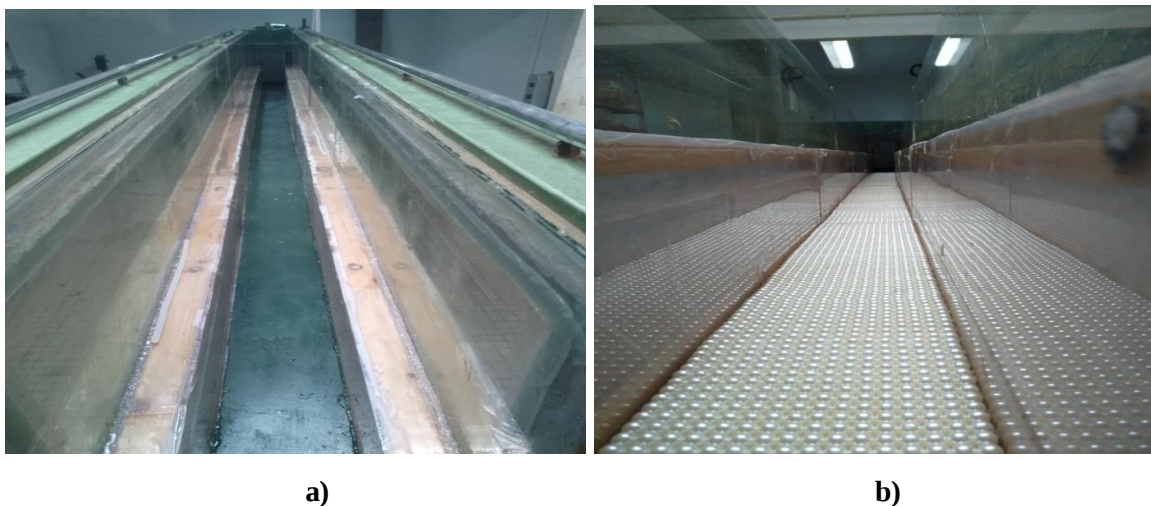
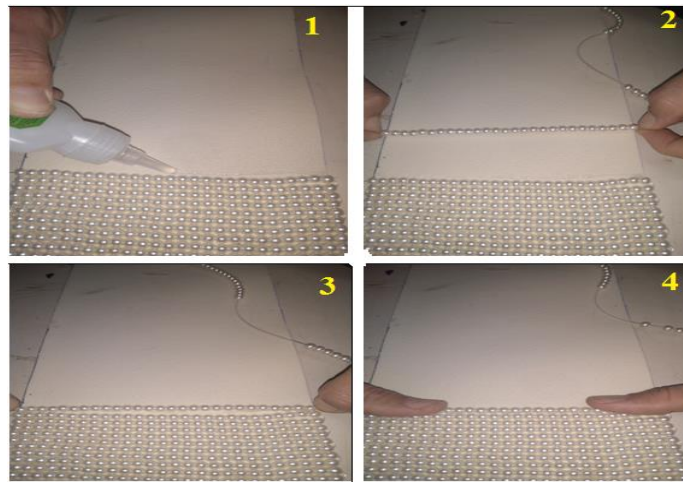
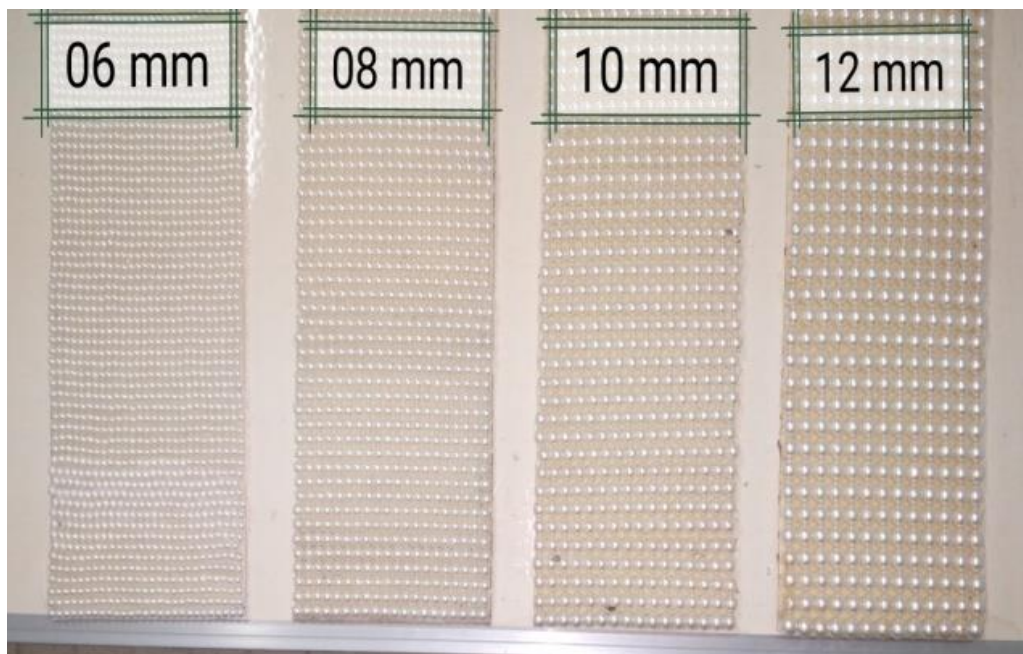


Figure 1.11: Les tapis rugueux imposés au lit majeur du canal composé. a) canal avec fond lisse. b) canal avec lit rugueux.



(a)



(b)

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 mineur du canal.

**CHAPITRE 2:Interprétation
des Résultats Expérimentaux
de la rentabilité du ressaut
hydraulique**

II.1. INTRODUCTION

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

Comme il a été signalé dans la partie bibliographique, à l'exception *des travaux de Hager (1987,1989)* et ceux plus récemment *Khataoui et Achour (2012)*, très peu d'étude ont été entreprises dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée. Quand au ressaut en canal à fond rugueux, à notre connaissance l'étude la plus connue est celle de *Rajaratnam (1968)*, qui a expérimenté le ressaut hydraulique en canal rectangulaire à fond rugueux et celle aussi de *Rajaratnam (2002)*, relative au ressaut hydraulique en canal rectangulaire à fond ondulé. A notre connaissance, le canal rectangulaire de la section composée à fond rugueux, n'a jamais fait l'objet d'étude de ce genre. C'est dans le but de combler cette lacune que cette étude pour ce type de ressaut a été proposée.

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

II.2. ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

II.2.1.Variation de la hauteur relative du seuil S/h_1 en fonction du Froude F_1

II.2.2.1 Variation de la hauteur relative du seuil S/h_1 en fonction du Froude F_1 dans le lit mineur ($0 < h_2 < 20$) cm.

La figure (2.1) montre la représentation graphique de la variation de la hauteur relative S/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 incident pour cinq valeurs de rugosités absolues : $\varepsilon = 0$ mm ; $\varepsilon = 06$ mm ; $\varepsilon = 08$ mm ; $\varepsilon = 10$ mm, et $\varepsilon = 12$ mm.

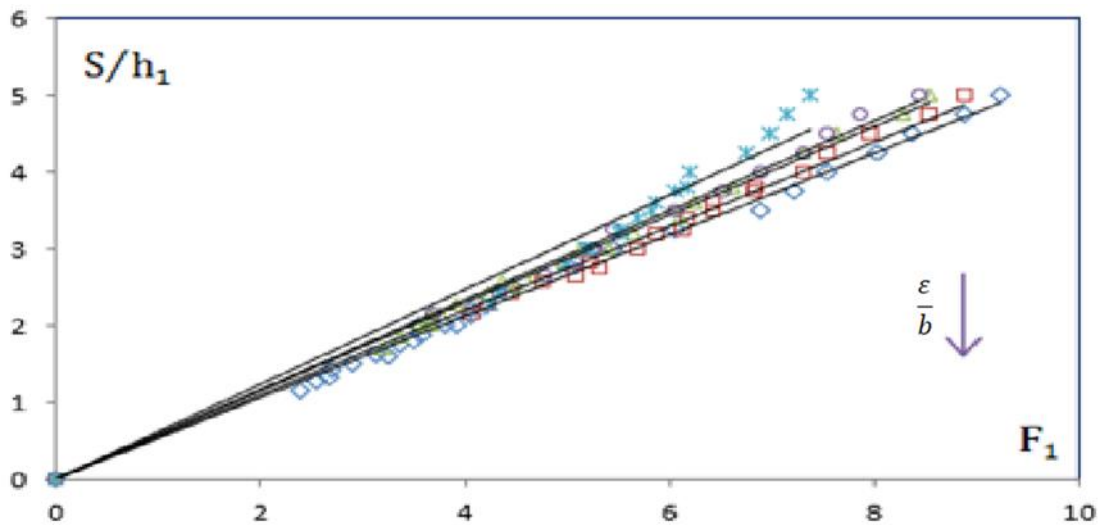


Figure 2.1 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour cinq valeurs différentes de " ε ": ($\diamond$) 12 mm ;($\square$) 10 mm ; ($\triangle$) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et ($*$) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.

On remarque cinq nuages de points distincts, correspondant chacun à une rugosité fixée. Par ailleurs, l'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut à fond rugueux, montre qu'à chaque rugosité " ε ", correspond une courbe de type linéaire de la forme $Y=a_4(F_1)$.

L'analyse de ces résultats montre que la hauteur relative s/h_1 augmente au fur et à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente aussi et ceci pour toutes les rugosités. En outre, l'augmentation relative de la rugosité ε/b provoque la diminution de la hauteur relative s/h_1 .

Le tableau (2.1) regroupe les valeurs du coefficient a_4 .

Tableau 2.1 : coefficient a_4 des courbes d'ajustements.

ε / b	Coefficient a_4	R^2
0,08	0.5314	0,9962
0,06666667	0.5489	0,9937
0,05333333	0.5741	0,9964
0,04	0.5835	0,9956
0	0.6166	0,962

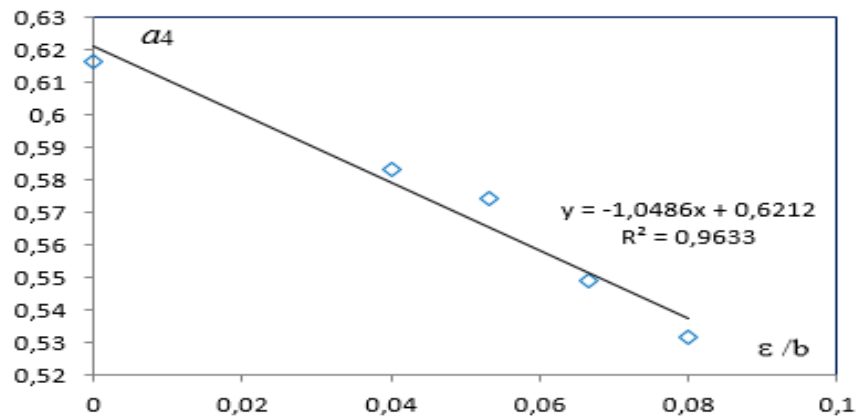


Figure 2.2: Variation du coefficient " a_4 " en fonction de la rugosité relative ε/b dans le lit mineur.

L'ajustement des couples de valeurs (a_4 , ε/b) du tableau ci-dessus a permis d'aboutir avec une bonne corrélation par la méthode des moindres carrées selon la relation linéaire suivante :

$a_4 = -1.0486 * \varepsilon/b + 0.6212$, avec $R^2 = 0,9633$. Cette équation est présentée par la figure (2.2). L'équation liant la hauteur relative S/h_1 , le nombre de Froude F_1 et la rugosité relative ε/b s'écrit alors :

$$S/h_1 = (-1.0486 * \varepsilon/b + 0.6212) F_1 \quad (2.1)$$

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

La figure (2.3) montre également que la relation $S/h_1 = f(\varepsilon/b, F_1)$ ajuste avec une bonne Corrélation pour le lit mineur en majorités des points de mesures expérimentales obtenues et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice.

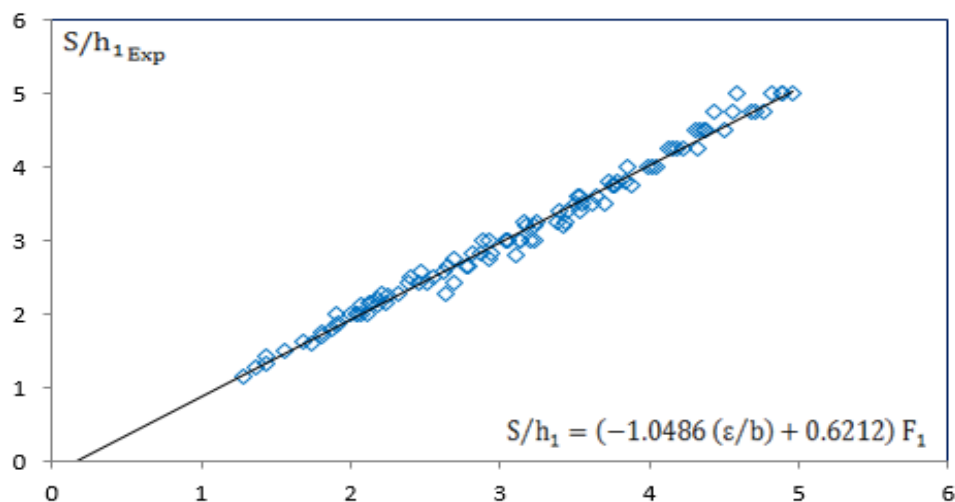


Figure 2.3 : Variation de la hauteur relative S/h_1 en fonction de $f(\varepsilon/b, F_1)$. (□) Les points expérimentaux du ressaut hydraulique contrôlé à fond rugueux. (—) Première bissectrice.

En outre, les écarts relatifs entre les valeurs des mesures expérimentales $S/h_{1\text{exp.}}$ avec celles obtenues par la relation d'ajustement (2.3) dans le lit mineur sont estimés et présentés au tableau (2.2).

Le tableau (2.2), montre que les écarts relatifs sont en majorité inférieur à 5%, ce qui justifie la fiabilité des mesures expérimentales obtenues.

Tableau 2.2: Ecart relatifs entre $S/h_{1\text{expérimentale}}$ et S/h_1 d'ajustements dans le lit mineur.

$S/h_{1\text{relation}}$	$S/h_{1\text{exp.}}$	$\Delta S/h_1$ (%)	$S/h_{1\text{relation}}$	$S/h_{1\text{exp.}}$	$\Delta S/h_1$ (%)
1,686	1,625	3,623	1,900	1,857	2,274
1,802	1,750	2,864	2,063	2,000	3,063
1,920	1,875	2,324	2,125	2,143	-0,821
2,110	2,000	5,215	2,209	2,286	-3,459
2,181	2,125	2,558	2,380	2,429	-2,028
2,252	2,250	0,101	2,467	2,571	-4,217
1,282	1,143	10,874	2,548	2,500	1,888
1,368	1,286	6,039	2,652	2,667	-0,549
1,439	1,429	0,691	2,811	2,833	-0,806

Tableau 2.2 (suite) : Ecarts relatifs entre S/h_1 expérimentale et S/h_1 d'ajustement dans le lit mineur.

S/h_1 relation	S/h_1 exp.	$\Delta S/h_1$ (%)	S/h_1 relation	S/h_1 exp.	$\Delta S/h_1$ (%)
1,427	1,333	6,546	2,891	3,000	-3,767
1,552	1,500	3,348	3,049	3,000	1,598
1,742	1,600	8,145	3,181	3,200	-0,589
1,875	1,800	4,025	3,452	3,400	1,504
2,040	2,000	1,966	3,521	3,600	-2,251
2,181	2,200	-0,882	3,730	3,800	-1,880
1,903	2,000	-5,119	2,002	2,000	0,081
2,398	2,500	-4,273	4,124	4,250	-3,067
2,697	2,750	-1,964	4,307	4,500	-4,486
2,929	3,000	-2,415	4,681	4,750	-1,470
3,249	3,250	-0,042	4,824	5,000	-3,644
3,705	3,500	5,543	2,135	2,143	-0,349
3,876	3,750	3,261	2,506	2,429	3,089
4,050	4,000	1,234	2,772	2,667	3,783
4,315	4,250	1,506	2,935	2,833	3,466
4,495	4,500	-0,116	3,046	3,000	1,504
4,769	4,750	0,398	3,032	3,000	1,052
4,955	5,000	-0,913	3,158	3,250	-2,916
2,238	2,143	4,231	3,502	3,500	0,064

CHAPITRE 2 Interprétation des Résultats Expérimentaux de la rentabilité du ressaut
hydraulique

2,321	2,286	1,538	3,768	3,750	0,482
2,449	2,429	0,842	3,995	4,000	-0,134
2,623	2,571	1,968	4,226	4,250	-0,579
2,793	2,667	4,536	4,366	4,500	-3,066
2,872	2,833	1,357	4,556	4,750	-4,260
3,135	3,000	4,312	4,895	5,000	-2,155
3,234	3,200	1,041	3,432	3,250	5,304

Tableau 2.2 (suite et fin) : Ecarts relatifs entre S/h_1 expérimentale et S/h_1 d'ajustement dans le lit mineur.

$S/h_{1relation}$	$S/h_{1exp.}$	$\Delta S/h_1$ (%)	$S/h_{1relation}$	$S/h_{1exp.}$	$\Delta S/h_1$ (%)
3,400	3,400	0,002	3,616	3,500	3,204
3,535	3,600	-1,835	3,756	3,750	0,155
3,776	3,800	-0,643	3,850	4,000	-3,893
2,925	2,750	5,993	4,186	4,250	-1,524
3,127	3,000	4,062	4,333	4,500	-3,853
3,375	3,250	3,701	4,432	4,750	-7,177
3,544	3,500	1,232	4,582	5,000	-9,133
3,758	3,750	0,223	3,100	2,800	9,692
4,022	4,000	0,536	3,207	3,000	6,448
4,155	4,250	-2,278	3,423	3,200	6,513
4,382	4,500	-2,703	3,533	3,400	3,758
4,705	4,750	-0,959	3,644	3,600	1,200
4,893	5,000	-2,185	3,831	3,800	0,814
2,037	2,000	1,839	3,237	3,000	7,308
2,074	2,125	-2,482	2,640	2,286	13,407
1,801	1,714	4,809	2,687	2,429	9,633

II.2.2.2. Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 dans le lit majeur ($20 < h_2 < 50$) cm.

Nous avons tracé le graphique du variation de la hauteur relative S/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour cinq valeurs de rugosité relative ε/b pour le lit majeur.

On remarque cinq allures de points distincts dont chacun dépend d'une rugosité bien déterminée. Par ailleurs, l'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut à fond rugueux pour le lit majeur, montre aussi qu'à chaque valeur de rugosité " ε " correspond une courbe de type linéaire de la forme $S/h_1 = b_4 (F_1)$.

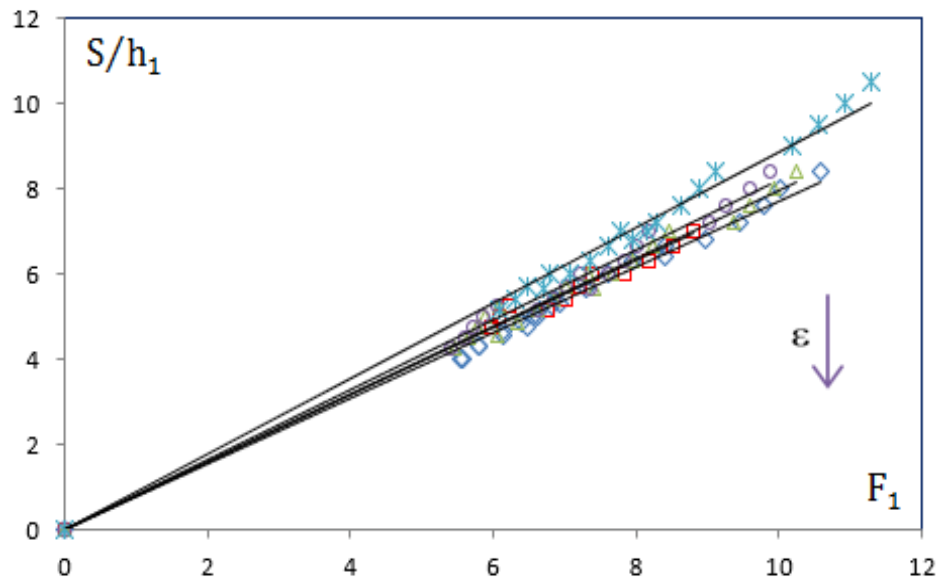


Figure 2.4: Variation de la hauteur relative S/h_1 en fonction du nombre de Froude dans le lit majeur, pour cinq rugosités différentes testées " ε ". ($\diamond$) 12 mm ; ($\square$) 10 mm ; ($\triangle$) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et ($*$) 0 mm. (—) Courbes d'ajustements.

L'analyse de ces résultats montre que la hauteur relative s/h_1 augmente au fur et à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente aussi et ceci pour toutes les rugosités. En outre, l'augmentation relative de la rugosité ε/b provoque la diminution de la hauteur relative s/h_1 , ceci est dû à la rugosité du fond du canal qui engendre la compacité du ressaut hydraulique.

Le tableau (2.3) regroupe les valeurs du coefficient b_4 .

Tableau 2.3: coefficient b_4 des courbes d'ajustements.

ε / b	Coefficient b_4	R^2
0,08	0.7703	0,9912
0,0667	0.7904	0,9922
0,0533	0.7999	0,9883

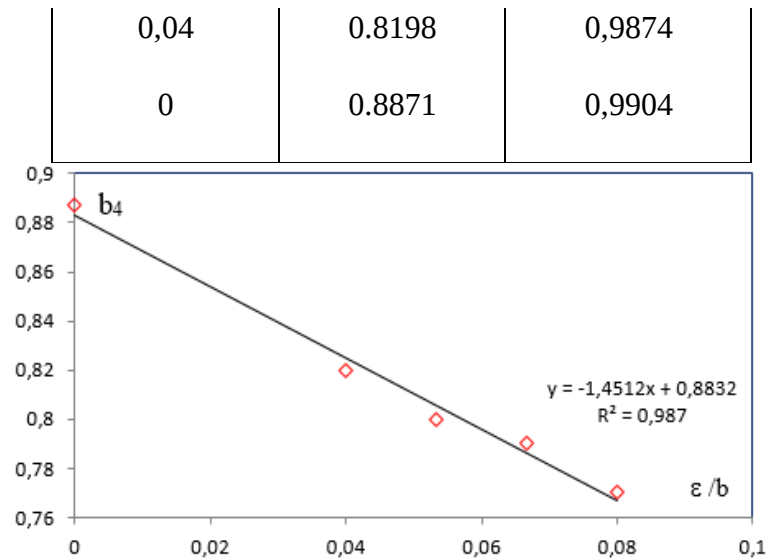


Figure 2.5: Variation du coefficient " b_4 " en fonction de la rugosité relative ε/b dans le lit majeur.

L'ajustement des couples de valeurs (b_4 , ε/b) du tableau ci-dessus a permis d'aboutir avec une bonne corrélation par la méthode des moindres carrées selon la relation linéaire suivante :

$b_4 = -1.4512 * \varepsilon/b + 0.8832$, avec $R^2 = 0,987$. Cette équation est présentée par la figure (3.5). L'équation liant la hauteur relative S/h_1 , le nombre de Froude F_1 et la rugosité relative ε/b s'écrit alors :

$$S/h_1 = (-1.4512 * \varepsilon/b + 0.8832) F_1 \quad (2.2)$$

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

La figure (2.6) montre que la relation $S/h_1 = f(\varepsilon/b, F_1)$ ajuste avec une bonne Corrélation pour le lit majeur en majorités des points de mesures expérimentales obtenues et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice.

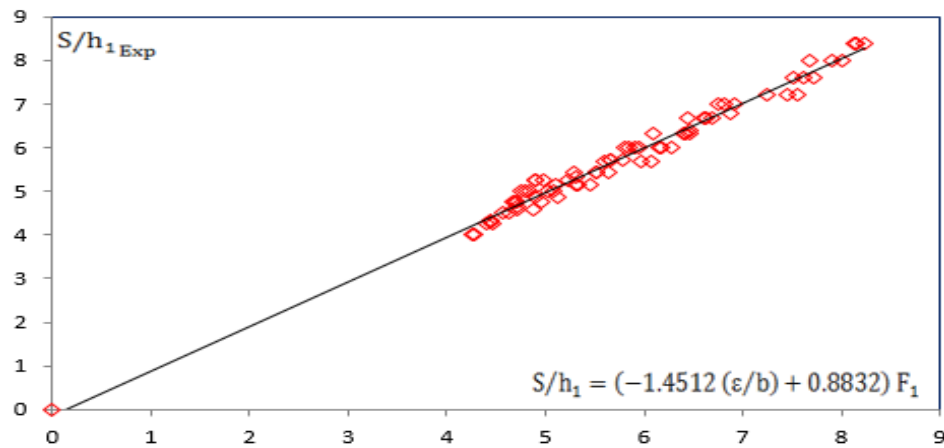


Figure 2.6 : Variation de la hauteur relative S/h_1 en fonction de $f(\varepsilon/b, F_1)$. (□) Les points expérimentaux du ressaut hydraulique contrôlé à fond rugueux. (—) Première bissectrice.

En outre, les écarts relatifs entre les valeurs des mesures expérimentales $S/h_{1\text{Exp}}$. Avec celles obtenues par la relation d'ajustement (2.8) dans le lit majeur sont estimés et présentés au tableau (2.4).

Le tableau (2.4), montre que les écarts relatifs sont en majorité inférieur à 5%, ce qui justifie la fiabilité des mesures expérimentales.

Tableau 2.4: Ecarts relatifs entre S/h_1 expérimentale et S/h_1 d'ajustements dans le lit majeur.

$S/h_{1\text{relation}}$	$S/h_{1\text{Exp}}$	$(\Delta S/h_1)/(S/h_1)$ (%)	$S/h_{1\text{relation}}$	$S/h_{1\text{Exp}}$	$(\Delta S/h_1)/(S/h_1)$ (%)
4,468	4,250	4,887	6,425	6,333	1,427
4,619	4,500	2,587	6,690	6,667	0,343
4,711	4,750	-0,829	6,913	7,000	-1,261
4,834	5,000	-3,437	4,960	4,750	4,243
4,989	5,250	-5,233	5,080	5,000	1,565
5,459	5,143	5,796	5,230	5,250	-0,389

5,644	5,429	3,816	4,278	4,000	6,507
5,793	5,714	1,361	4,441	4,286	3,489
5,944	6,000	-0,949	4,704	4,571	2,826
6,064	5,667	6,546	4,906	4,857	0,986
6,287	6,000	4,562	5,109	5,143	-0,654
6,467	6,333	2,071	5,281	5,429	-2,786
6,604	6,667	-0,953	4,257	4,000	6,035
6,741	7,000	-3,840	4,446	4,333	2,536
7,452	7,200	3,378	4,715	4,667	1,035
7,623	7,600	0,307	5,030	5,000	0,592
7,913	8,000	-1,105	5,310	5,333	-0,434
8,146	8,400	-3,113	5,596	5,667	-1,266
4,393	4,250	3,254	5,845	6,000	-2,660
4,571	4,500	1,546	6,097	6,333	-3,880

Tableau 2.4 (suite et fin) : Ecart relatifs entre S/h_1 expérimentale et S/h_1 d'ajustement dans le lit majeur.

S/h_1 relation	S/h_{1Exp}	$(\Delta S/h_1)/(S/h_1)$ (%)	S/h_1 relation	S/h_{1Exp}	$(\Delta S/h_1)/(S/h_1)$ (%)
4,660	4,750	-1,923	6,439	6,667	-3,542
4,751	5,000	-5,249	6,456	6,400	0,865
4,902	5,250	-7,090	6,875	6,800	1,084

CHAPITRE 2 Interprétation des Résultats Expérimentaux de la rentabilité du ressaut
hydraulique

4,872	4,571	6,168	7,248	7,200	0,662
5,118	4,857	5,089	7,519	7,600	-1,080
5,331	5,143	3,534	7,683	8,000	-4,128
5,512	5,429	1,506	8,126	8,400	-3,372
5,657	5,714	-1,008	5,378	5,143	4,374
5,915	6,000	-1,433	5,570	5,429	2,546
5,965	5,667	4,998	5,726	5,714	0,202
6,183	6,000	2,964	6,001	6,000	0,021
6,404	6,333	1,109	5,929	5,667	4,420
6,628	6,667	-0,583	6,254	6,000	4,064
6,809	7,000	-2,809	6,490	6,333	2,416
7,557	7,200	4,726	6,729	6,667	0,927
7,727	7,600	1,644	6,874	7,000	-1,837
8,013	8,000	0,160	7,019	6,800	3,127
8,244	8,400	-1,893	7,196	7,000	2,720
4,696	4,750	-1,157	7,314	7,200	1,558
4,785	5,000	-4,499	7,612	7,600	0,164
4,904	5,250	-7,048	7,854	8,000	-1,857
5,309	5,143	3,122	8,037	8,400	-4,516
5,521	5,429	1,681	9,004	9,000	0,044
5,665	5,714	-0,873	9,324	9,500	-1,892
5,809	6,000	-3,280	9,647	10,000	-3,659
6,164	6,000	2,660	9,974	10,500	-5,274

La figure (2.7) montre la variation de la hauteur relative S/h_1 expérimentale en fonction de $f(\varepsilon/b, F_1)$ du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée.

Cette figure indique la comparaison entre des mesures expérimentales de la hauteur relative S/h_1 avec leurs relations globales empiriques obtenues pour les deux lits du canal rectangulaire de section composée.

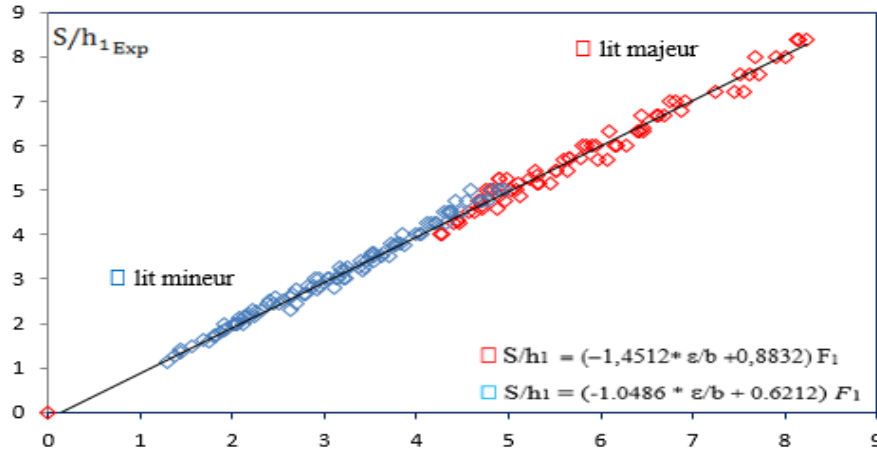


Figure 2.7: La variation de la hauteur relative S/h_1 expérimentale en fonction de $f(\varepsilon/b, F_1)$ pour les deux cas (□ lit mineur ; □ lit majeur).

On déduit à partir de cette figure que l'effet de réduction du seuil placé en aval de l'écoulement dans le canal rectangulaire composée est perceptible au lit mineur que celui au lit majeur.

II.2.2 Rendement du ressaut hydraulique

L'intérêt technique du ressaut hydraulique est pratiquement dû à la dissipation d'énergie cinétique qu'il permet de réaliser. L'équation généralisée de Bernoulli entre la section amont et aval immédiats du ressaut impose :

$$H_1 = h_1 + Q^2 / (2gA_1^2) = h_2 + Q^2 / (2gA_2^2) + \Delta H \quad (2.3)$$

Le rendement η du ressaut hydraulique est défini par :

$$\eta = \Delta H / H_1 \quad \Delta H = H_1 - H_2 \quad (2.4)$$

Avec H_1 : la charge amont, H_2 : la charge aval Le rendement varie entre les limites 0 et 1

$$(0 < \eta < 1). H_1 = \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_1, \quad H_2 = \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_2$$

On remplace H_1 et H_2 dans l'équation (3.9) :

$$\eta = 1 - \left[\left(\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \right) / \left(\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \right) \right] \quad (2.5)$$

On remplace $V_1 = Q/A_1$ et $V_2 = Q/A_2$ l'équation (3.11) devient :

$$\eta = 1 - \left[\left(\alpha_2 \frac{Q^2}{2gA_2^2} + h_2 \right) / \left(\alpha_1 \frac{Q^2}{2gA_1^2} + h_1 \right) \right] \quad (2.6)$$

L'aire de la section amont $A_1 = bh_1$

L'aire de la section aval $A_2 = B(h_2 - h) + bh$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1$$

Le nombre de Froude $F_1 = Q/\sqrt{b^2 h_1^3 g}$. L'expression du rendement s'écrit dans ce cas :

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

La variation du rendement du ressaut en fonction du nombre de Froude incident pour les deux position (lit mineur et lit majeur) est représentée dans les figures 2.8 et 2.9 respectivement.

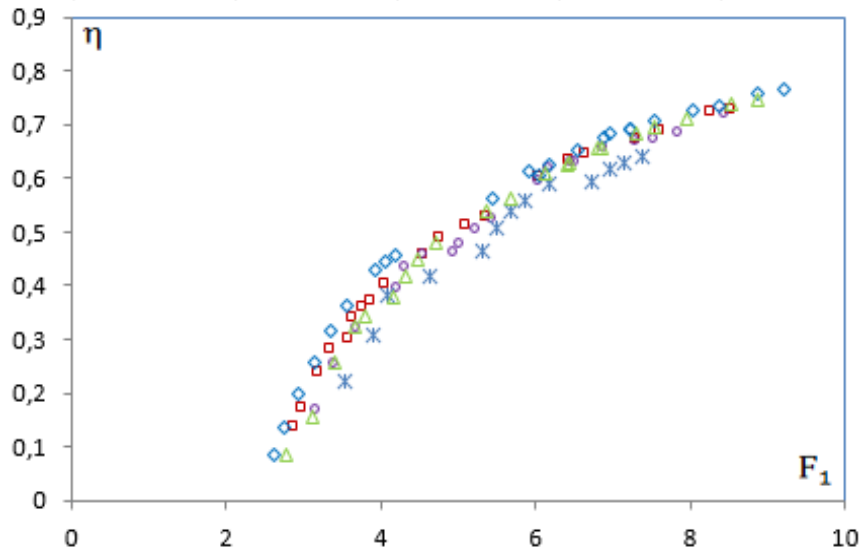


Figure 2.8: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . Les motifs représentent les points expérimentaux du ressaut en canal rectangulaire de la section composé

à fond rugueux, de rugosité relative ε/b dans le lit mineur : ($\diamond$)= 12 mm ; ($\square$)= 10 mm ; ($\triangle$)= 08 mm ; ($\circ$) = 06 mm et ($*$) =00 mm

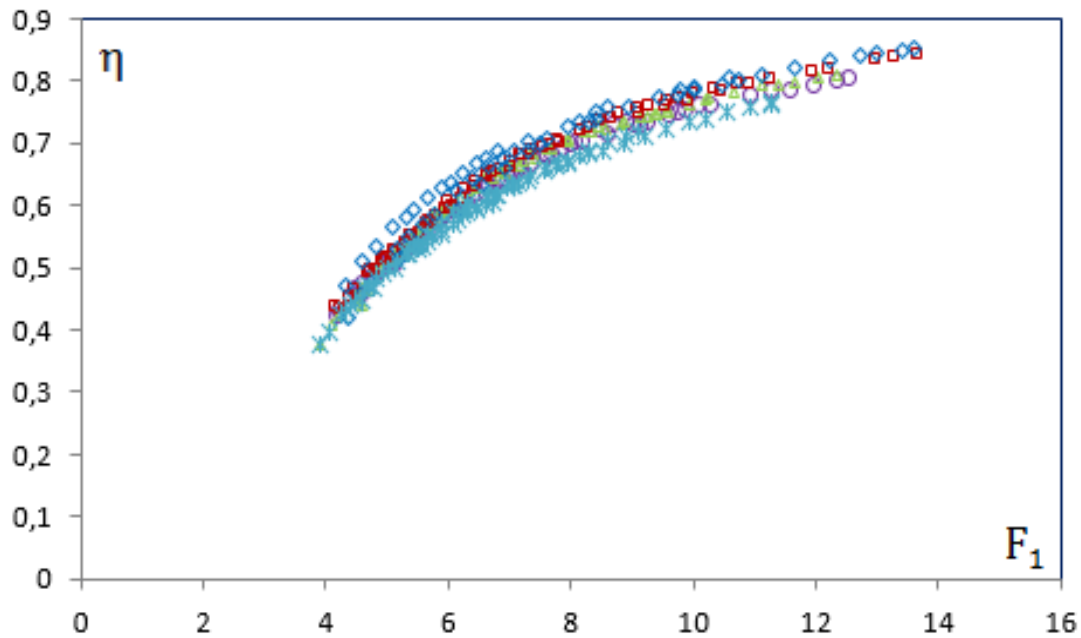


Figure 2.9: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . Les motifs colorés représentent les points expérimentaux du ressaut en canal rectangulaire de la section composé à fond rugueux, de rugosité relative ε/b dans le lit majeur : ($\diamond$) = 12 mm ; ($\square$)= 10 mm ; ($\triangle$)= 08 mm ; ($\circ$) = 06 mm et ($*$) =00 mm.

Les figures (2.8) et (2.9) montre que pour l'augmentation du nombre du Froude incident entraîne l'augmentation du rendement, par ailleurs pour le même nombre du Froude incident, le rendement augmente avec l'augmentation de la rugosité dans les deux cas, ainsi la dissipation de l'énergie est importante avec l'augmentation de la rugosité équivalente.

II.2.3 Profils de surface du ressaut hydraulique

L'expérimentation nous a permis de définir le profil de la surface libre du ressaut depuis son origine jusqu'à sa section finale dans un canal rectangulaire de la forme composée à fond rugueux.

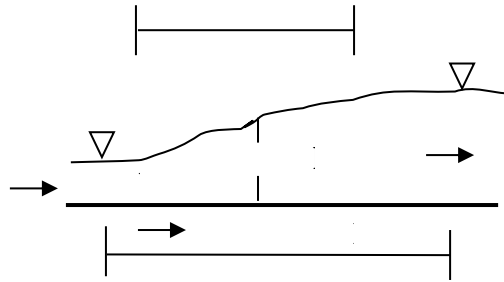


Figure 2.10: Profile de surface du ressaut.

Comme le montre le schéma simplifié de la Figure (2.10) concerné le lit mineur et lit majeur, la coordonnée longitudinale x est telle que $0 \leq x \leq L_j$, tandis que la profondeur $h(x)$ est telle que $h_1 \leq h(x) \leq h_2$; h_1 et h_2 sont les hauteurs conjuguées du ressaut.

Les paramètres x et $h(x)$ peuvent servir à composer les variables adimensionnelles y et X , en écrivant que $y = (h(x) - h_1) / (h_2 - h_1)$ et $X = x / L_j$ variables adimensionnelles y et X sont limitées telles que : $0 \leq X \leq 1$ et $0 \leq y \leq 1$.

La variation du rapport y en fonction du rapport X est représentée par la Figure (3.11) et la figure (2.12), ces figures montre les points de mesure expérimentales pour différentes rugosités.

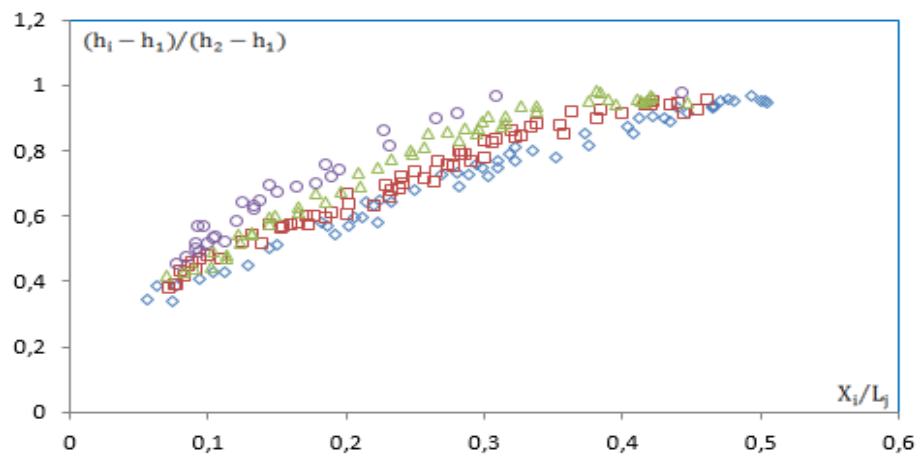


Figure 2.11: Profils du ressaut hydraulique pour le lit mineur dans un canal rectangulaire de la forme composée à fond rugueux pour quatre rugosités différentes : ($\diamond$) 06 mm ; ($\square$) 08 mm ; ($\triangle$) 10 mm et ($\circ$) 12 mm.

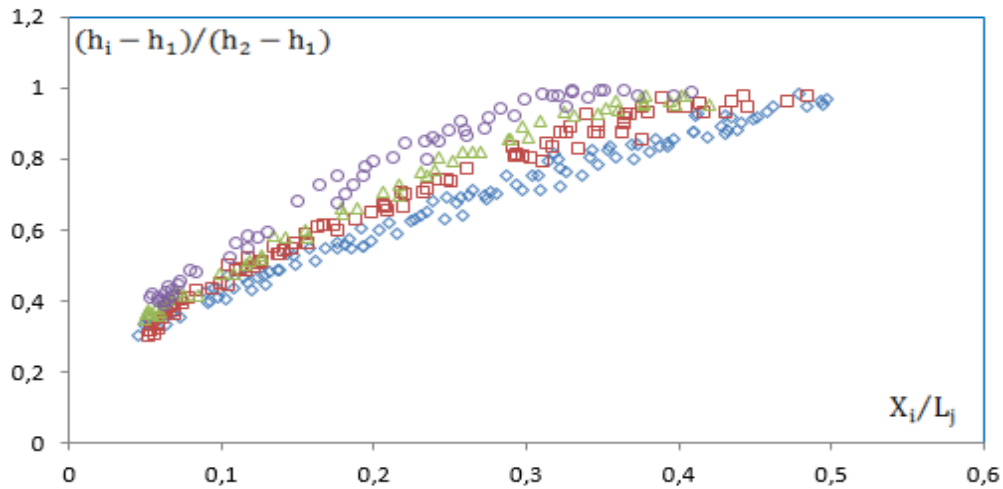


Figure 2.12: Profils du ressaut hydraulique le lit majeur dans un canal rectangulaire de la forme composée à fond rugueux pour quatre rugosités différentes : ($\diamond$) 06 mm ; ($\square$) 08 mm ; ($\triangle$) 10 mm et ($\circ$) 12 mm.

D'après les Figures(2.11) et (2.12) on constate quatre nuages de points distincts correspondant aux quatre rugosités testées. Ainsi, pour le même rapport x/L_j , la valeur y augmente avec l'augmentation de la rugosité absolue, ce qui montre clairement l'influence de la rugosité sur la diminution de la profondeur h_2 .

II.3. EXEMPLE D'APPLICATION

Nous présentons ici, un exemple d'application des relations adimensionnelles obtenues, pour le cas du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de la section composée du lit mineur rugueux, de rugosité absolue $\varepsilon=12$ mm

Soient :

- $Q=30$ l/s, le débit volume passant par le bassin d'amortissement de section rectangulaire composée avec lit mineur rugueux (la pente nulle).
- $h_1=4$ cm, la hauteur initiale du ressaut.

- Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident est :

$$F_1^2 = Q^2 / (gb^2h^3), \text{ soit } F_1 \cong 7.98$$

- La hauteur de seuil pour le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de la section composée de lit mineur rugueux S/h_1 est :

$$\text{Selon l'approche expérimentale } S/h_1 = (-1.4512 \cdot \varepsilon/b + 0.8832) F_1$$

$$S/h_1 = 6.12 \text{ donc } S = 24 \text{ cm.}$$

II.4. CONCLUSION

Ce chapitre résume l'ensemble des résultats de nos essais liés à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mine évoluent dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux.

Nous avons présenté les résultats expérimentaux qui permettent d'extraire des relations expérimentales explicites, nous avons basé **premièrement sur l'expérimentation** de la variation de la hauteur relative du seuil S/h_1 en fonction du Froude F_1 dans le lit mineur .

Aussi, **l'étude expérimentale s'est intéressée à la dissipation d'énergie cinétique.** Celle-ci **étant représentée par le rendement.** concernant le type du ressaut hydraulique abordé.

On déduit que ce type du ressaut dissipe mieux l'énergie quand la rugosité est importante. Le dernier volet de cette étude expérimentale **a abordé les différents profils du ressaut hydraulique** qui montre la compacité de l'ouvrage hydraulique tel que le bassin d'amortissement.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Notre étude concerne la contribution à l'étude de la rentabilité du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée avec lit mineur rugueux. Cette étude a été divisée en deux parties fondamentales :

❖ **Pour la première partie**, nous avons exposé des études menées par de nombreux chercheurs dans le domaine des écoulements brusquement variés tel que le ressaut hydraulique, nous avons exposé quelques travaux, à travers lesquels nous avons pu construire une idée sur notre sujet de recherche endopté.

A cet effet notre partie bibliographique est subdivisée en trois 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 « *Rajaratnam en 1968* », effectué dans un canal rectangulaire avec lit rugueux, des différents rugosités relanves (ε / h_1) out été conçues entre de 0,02 et 0,43 et le nombre de Froude incident varie entre 3 et 10. Des diverses conclusions sont ainsi retenues. Par conséquent, pour un ressaut qui se forme sur un fond rugueux, le rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 varie fonction du nombre de Froude incident F_1 et de la rugosité relative testées ε / h_1 . h^*_2 étant comme la hauteur conjuguée en aval du ressaut correspondant au ressaut hydraulique crée sur un lit lisse alors h_2/h^*_2 varie seulement avec la rugosité relative testée. Il a été déduit que la longueur du ressaut hydraulique avec fond rugueux est égale approximativement la moitié que son homologue à fond lisse, pour des diverses rugosités relatives dépassant 0.10, cela apparait un avantage très significatif du ressaut hydraulique avec lit rugueux.

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

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

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

En deuxième lieu travaux de Riguet(2019) concernant l'étude expérimentale du caractère du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire composé lisse.

Il a développé de relation adimensionnelles permettant de dimensionner les ouvrages hydrauliques tels que les bassins d'amortissement.

Pour le dixième chapitre de la bibliographique on a exposé les différentes relations établies par Kateb et al en (2006)

la deuxième partie de notre mémoire, nous avons traité du chapitre principal

- ✓ Pour le premier chapitre: d'intituler le protocole expérimental par lequel on a exposé tous les instruments et appareils permettant d'expérimenter le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire composé à fond rugueux avec la préparation des différents tapis rugueux
- ✓ Pour le deuxième chapitre : on a fait aux différentes nos séries expérimentales obtenues au laboratoire, nous avons effectué ce qui suit :

Une analyse expérimentale concernant la variation de la hauteur relative du seuil S/h_1 en fonction du Froude F_1 pour le lit (mineur) a été faite.

- Aussi, une étude expérimentale a été portée sur **la dissipation de l'énergie cinétique**. Ceci est montré par le rendement hydraulique. Par conséquent, la variation du rendement η avec le Froude F_1 montre que la dissipation d'énergie cinétique est importante par la création du ressaut hydraulique évoluant dans ce type de banc d'expérimentation, engendrée principalement par l'importance **de la rugosité imposée et testée**.

- Le dernier volet de cette étude est porté sur les profils du ressaut hydraulique illustrant la compacité de ce dernier.

Finalement, on peut conclure que ce type de ressaut hydraulique étudié présente une rentabilité du ressaut hydraulique en fonction de l'importance de la rugosité imposée.

Aussi , on recommandera aux étudiants chercheurs futurs de continuer les travaux théoriques et expérimentaux pour ce type de canal dans le but d'aboutir à des approches expérimentales utilisables au dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Références Bibliographiques

Références 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.

Debabeche, M., Kateb, S., Ghomri, A., "Etude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses ", Larhyss Journal, N005, pp.187-196, Juin 2006.

Djamaa, W., Ghomri. A., (2020)., Study of experimental approach of the relative length of the surface role of the hydraulic jump evolving in a rectangular channel of section composed with rough bottom; Journal of Fundamental and Applied Sciences ISSN 1112-9867.

Djamaa, W., Ghomri. A., Khechana. S., (2021)., Study of the experimental approach of the relative threshold of the hydraulic jump evolving in a rectangular channel of composed section with rough minor bed; Journal of Fundamental and Applied Sciences ISSN 1112-9867.

Djamaa, W., Lecheheb. S., Ghomri. A., (2020)., Séminaire international « Durabilité d'agriculture saharienne et l'utilisation de l'eau ». Communication poster intitulée : L'étude de l'effet d'une rugosité sur ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée du lit mineur rugueux ; Université d'El-Oued ; 02-03 Mars 2020.

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.

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.

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

K

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

Kateb, S., Etude théorique et expérimentale de quelques types de ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, Doctorat en science hydraulique, Université de Biskra, 2014.

Kateb, S., Debabeche, M., Zegait. RetBaouia K. (2018)., Approche expérimentale de la longueur du ressaut hydraulique dans un Canal Triangulaire A Parois Rugueuses ; journal of Advanced Research in science and Technologie JARST.

Khattaoui, M., Achour, B., (2012). Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé.

Revue scientifique et technique LJEE N°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

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 of the hydraulic jump in a straight compound rectangular channel; Journal of Fundamental and Applied Sciences ISSN 1112-9867.

Z

Ziani, S., Dissipation d'énergie par Ressaut Hydraulique dans une conduite circulaire avec banquettes. Mémoire de magistère en science hydrauliques, Département d'hydraulique, Université de Bejaia, Algérie, 2015.