



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar – El OUED

Faculté de Technologie

✓ *Département d'Hydraulique et de Génie Civil*

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

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

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

THEME

**Contribution à l'étude expérimentale de la
variation des hauteurs conjuguées du ressaut
hydraulique évoluent en canal rectangulaire
composé forcé par seuil épais**

Dirigé par :

Dr. RIGUET Ferhat

Dr. BESSER Djamel

Présenté par :

MEHAOUAT Abderrahmane

Promotion : Mai 2025

إهداء

إلى من كانوا السند والنبض والدعاء إلى أمي وأبي في كل
خطوة خطوتها نحو النجاح، كانت دعواتكما زادي، وصبركما قوتي
أبي... كنت دائماً القدوة التي ألتجأ إليها حين تضعف عزيمتي
أمي... كنت الحظ الذي يرمم كل تعب، والنبض الذي لا يجبو
تخرجي اليوم هو حصاد تعبكما، وفرحتي الكبرى لا تكتمل إلا بدموع
الفخر في عينيكما.، وإلى كل الأصدقاء الكرام،
فرحتي اليوم لا تكتمل إلا بوجودكم، فهذا التخرج ثمرة حبكم، وصبركم، ودعمكم
شكراً من القلب، فأنتم سر النجاح وبهجته

مماوات محمد الرحمان



Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes superviseurs, **RIGUET Ferhat et GHOMRI Ali**, pour leur soutien précieux, leurs conseils avisés et leur présence tout au long de la préparation de ce mémoire. Leur expertise et leur accompagnement ont été essentiels à la réalisation de ce travail.

Je remercie également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'avancement de cette recherche. Que ce soit par leurs encouragements, leurs conseils, ou leur aide technique, chacune de ces interventions a été d'une grande valeur.

À tous, je vous adresse mes remerciements les plus sincères.

Résumé

Les ouvrages hydrauliques tels que les barrages sont équipés d'une structure à leur sommet qui les empêche d'être submergés lors des avers.

L'écoulement à travers ce dernier crée un écoulement torrentiel au pied de l'ouvrage, ce qui peut menacer sa stabilité dans le temps. Afin de maintenir la stabilité de l'ouvrage, un bassin de stabilisation doit être construit derrière celle-ci, où l'énergie potentielle cinétique peut être absorbée et le régime d'écoulement passe du régime torrentiel au régime fluvial ou calme, et ce phénomène est appelé le ressaut hydraulique. Le bassin de tranquillisation peut prendre plusieurs formes géométriques, rectangulaire, triangulaire, trapézoïdale, de pente nulle, positive ou négative, rugueux ou lisse, nous nous intéressons à cette étude des dimensions du bassin de sédation notamment la hauteur.

Les mots clés : Ressaut hydraulique Forcé type A, Canal rectangulaire composé, écoulement brusquement varié.

Abstract

Hydraulic structures such as dams are equipped with a structure at their top that prevents them from being submerged during heavy rainfall.

The flow through this spillway creates a torrential flow at the base of the structure, which can threaten its stability over time. To maintain the stability of the structure, a stilling basin must be constructed downstream of it, where the potential and kinetic energy can be absorbed, and the flow regime transitions from torrential to fluvial or calm. This phenomenon is known as the hydraulic jump. The stilling basin can take various geometric forms rectangular, triangular, trapezoidal with zero, positive, or negative slopes, and with either rough or smooth surfaces. This study focuses on the dimensions of the stilling basin, particularly its height.

Key words: Forced hydraulic jump type A, Compound rectangular channel, suddenly varied flow.

ملخص:

الهيكل الهيدروليكية مثل السدود مزودة بهيكل في أعلاها يمنع غمرها أثناء هطول الأمطار الغزيرة. بسبب الجريان عبر هذا المفيض تدفقاً جارياً عند قاعدة المنشأة، مما قد يُهدد استقرارها مع مرور الوقت. وللحفاظ على استقرار المنشأة، يجب إنشاء حوض تهدئة خلفها (أسفل منها)، حيث يمكن امتصاص الطاقة الكامنة والحركية، ويتحول نظام الجريان من النظام الجارف إلى النظام الهادئ أو النهري، ويُعرف هذا الظاهرة باسم الارتداد الهيدروليكي. يمكن أن يتخذ حوض التهدئة أشكالاً هندسية مختلفة: مستطيلة، مثلثة، شبه منحرفة، ذات ميل صفري أو إيجابي أو سلبى، وبأسطح خشنة أو ملساء. وتركز هذه الدراسة على أبعاد حوض التهدئة، وبشكل خاص على ارتفاعه.

الكلمات المفتاحية: الففزة الهيدروليكية - قناة مستطيلة مركبة - تدفق قوي ومفاجئ .

Tableau de matière :

Résumé	V
Abstract	VI
ملخص	VII
Tableau de matière	VIII
Liste des Figures	XI
Liste des photos	XV
Liste des Tableaux	XVI
Introduction générale	02
Chapitre 1 : Ecoulement brusquement varié (ressaut hydraulique)	
1.1. INTRODUCTION:	05
1.2. Définition du ressaut hydraulique:	05
1.3. Ressaut hydraulique classique:	06
1.4. Classification de ressaut:	06
1.5. Profondeurs conjuguées :	08
1.6. Longueurs caractéristiques du ressaut :	08
1.6.1. Longueur du rouleau:	08
1.6.2. Longueur du ressaut :	09
1.7. Perte d'énergie dans le ressaut hydraulique :	09
1.8. Rendement du ressaut :	10
1.9. Bassin d'amortissement :	11
1.10. Applications du ressaut hydraulique:	12
1.11. CONCLUSION	12
Chapitre 2: Ressaut hydraulique forcé par seuil mince en canal composé	
2.1. INTRODUCTION:	14
2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 :	14

2.3. Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	18
2.4. CONCLUSION	24
Chapitre III : Ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi épaisse évoluant en canal rectangulaire de section composée	
3. 1. Introduction	26
3. 1.1 Détermination expérimentale de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en lit composé	26
3.1.2 Description des essais	26
3.2. Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du débit relatif Q^*	27
3.2.1 premier cas : ($\beta=b/B=1$)	27
3.2.2 Deuxième cas : ($\beta=b/B<1$)	30
3.3. Hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil en fonction du débit relatif Q^*	34
3.3.1 Premier cas ($\beta = 1, b = B$)	34
3.3.2 Deuxième cas ($\beta=b/B<1$)($b=20\text{cm}, B=60\text{cm}$)	36
3.3.3. Hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil en fonction du débit relatif Q^*	39
3.3.4. CONCLUSION	41
3. 4. Longueur relative L_j / h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^*	41
3.4.1 Premier cas ($\beta = 1, b = B$)	41
3.4.2 Deuxième cas ($\beta=b/B<1$)	44
3.5. Longueur relative L_r / h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^*	48
3.5.1 Premier cas ($\beta = 1, b = B$) section rectangulaire	48
3.5.2 Deuxième cas ($\beta=b/B<1$) (canal rectangulaire de section composée)	50
Chapitre 4 : Dispositif expérimental et instrumentation	
4.1 INTRODUCTION	55
4.2 Description du canal :	55
4.3 Les seuils à paroi épaisse :	58
4.4. Procédure de mesure des débits :	60

Tableau de matière

4.5. Limnimétrie :	60
4.6. Conclusion	61
Chapitre 5: Etude Expérimentale	
5.1. INTRODUCTION	63
5.2 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1	63
5.3. Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	66
5.4 Conclusion	70
IV.4. Conclusion	71
Conclusion générale	72
Liste des Références	/

Liste des figures:

Numéro	Titre	Page
Figure.1.1	Ressaut hydraulique	05
Figure.1.2	Ressaut hydraulique au pied d'un barrage-déversoir	06
Figure.1.3	Classification des ressauts	07
Figure.1.4	Dissipation d'énergie.	09
Figure.1.5	Schéma de principe d'un bassin d'amortissement	11
Figure.2.1	Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude $F1$ pour le lit mineur. (\square) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement	14
Figure 2.2	Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude $F1$ pour le lit majeur. (\square) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement	15
Figure.2.3	montre clairement un décalage entre les valeurs de Y du ressaut forcé par seuil mince, pour les mêmes nombres de Froude $F1$.	16
Figure.2.4	Variation du rapport $s/h1$ en fonction du nombre de Froude $F1$ pour les deux lits du canal composé. (+) points de mesures expérimentales en lit mineur ; Pour $h0/h2 > 1$.	18
Figure.2.5	Variation du rapport $s/h1$ en fonction du nombre de Froude $F1$ pour le lit majeur du canal composé. (\square) points de mesures expérimentales en lit majeur.	19
Figure.2.6	Variation du rapport $S = s/h1$ de la hauteur relative du seuil du ressaut forcé en fonction de nombre de Froude respectivement pour $h1/B = (0.06 ; 0.058 ; 0,05 ; 0,0416 ; 0,033)$. (\circ) points expérimentaux. (—) courbe d'ajustement.	20
Figure.2.7	Variation du paramètre ' b ' en fonction de $h1/B$	21
Figure 2.8	Variation de la hauteur relative $s/h1$ du seuil en fonction de la relation $f(F1, h1/B)$. (\circ) Points expérimentaux. (\square) Première bissectrice d'équation : $s/h1 = f(F1, h1/B)$.	23
Figure 3.1	Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi épaisse en canal rectangulaire de section composée	26
Figure 3.2	Variation du rapport des hauteurs y du ressaut hydraulique en fonction du débit relatif Q^* les motifs différents colorés représentent les points de mesures expérimentales.	28
Figure 3.3	Variation du coefficient $b1$ en fonction de la hauteur relative amont $y1$.	29
Figure 3.4	Variation du coefficient $b1$ en fonction de la hauteur relative amont $y1$.	30
Figure 3.5	Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^* les motifs différents colorés représentent les points de mesures expérimentales pour les cinq valeurs	31

Liste des figures

Figure 3.7	Variation de la hauteur relative du seuil $S = s / h_1$ en fonction du débit relatif Q^* Pour cinq valeurs distinctes de y_1 . Les motifs colorés représentent les points de mesures expérimentales.	34
Figure 3.8	Variation du coefficient b_3 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	35
Figure 3.9	Variation de la hauteur relative S du seuil épais en fonction de $f(Q^*, y_1)$. (▪) Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée pour le lit mineur.	35
Figure 3.10	Ressaut contrôlé en canal rectangulaire de forme composée en lit majeur. Variation de la hauteur relative du seuil S épais en fonction du débit relatif Q^* , pour quatre valeurs	36
Figure 3.11	Variation du coefficient a_4 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	37
Figure 3.12	Variation du coefficient b , en fonction de la hauteur relative amont y_1 . L'ajustement des couples de valeurs b_4 et y_1 par les méthodes de moindres carrés donne l'expression suivante:	38
Figure 3.13	Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction de $f(Q^*, y_1)$.	38
Figure 3.14	Variation du rapport du seuil relatif épais $S = s/h_1$ en fonction du débit relatif Q^* .	39
Figure 3.15	Variation du seuil épais relatif expérimentale $S = s / h_1$ en fonction des relations globales obtenues $S = (y_1, Q^*)$. (,) Points des mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée.	41
Figure 3.16	Variation de la longueur relative L_j / h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 .	42
Figure 3.17	Variation du coefficient a_5 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	43
Figure 3.18	Variation du coefficient b_5 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	43
Figure 3.19	Variation de la longueur relative L_j / h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$. () Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée.	44
Figure 3.20	Variation de la longueur relative L_j / h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour le lit majeur Pour cinq valeurs distinctes de y_1 . Les motifs coloré représentent les points expérimentaux.	45
Figure 3.21	Variation du coefficient a_6 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	46
Figure 3.22	Variation du coefficient b_6 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	46
Figure 3.23	Variation de la longueur relative L_j / h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$. (■) Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé par seuil épais en canal rectangulaire de section composée.	47
Figure 3.24	Variation du seuil épais relatif expérimentale $L_j = l_j / h_1$ en fonction des relations globales obtenues $L_j = (y_1, Q^*)$. (,) Points des mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal	47

Liste des figures

	rectangulaire de section composée.	
Figure 3.25	Variation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 .	48
Figure 3.26	Variation du coefficient a_7 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	49
Figure 3.27	Variation du coefficient b_7 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	49
Figure 3.28	Variation de la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$ () Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé par seuil épais en canal rectangulaire de section composée	50
Figure 3.29	Variation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 .	51
Figure 3.30	Variation du coefficient a_8 en fonction de la hauteur relative amont y_1	52
Figure 3.31	Variation du coefficient b_8 en fonction de la hauteur relative amont y_1 Pour la valeur de b_8 elle ne varie pas en fonction de y_1 , ainsi elle prend une valeur	52
Figure 4. 1	Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composé	56
Figure 4.2	Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique	61
Figure 5.1	Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour le lit mineur. (○) points expérimentaux, (...) Courbes d'ajustement.	63
Figure 5.2	Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour le lit majeur. (○) points expérimentaux, (...) Courbes d'ajustement.	64
Figure 5.3	montre clairement un décalage entre les valeurs de Y du ressaut forcé par seuil mince, pour les mêmes nombres de Froude F_1 .	66
Figure 5.4	Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour les deux lits du canal composé. (+) points de mesures expérimentales en lit mineur	66
Figure 5.5	Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour le lit majeur du canal composé.(○) points de mesures expérimentales en lit majeur	67

Liste des figures

Figure 5.6	Variation du rapport $S = s/h_1$ de la hauteur relative du seuil du ressaut forcé en fonction de nombre de Froude respectivement	69
Figure 5.7	Variation du paramètre 'b' en fonction de h_1/B .	70

Liste des photos:

Numéro	Titre	Page
Photo 4.1	Photographie du model expérimentale du canal	56
Photo 4.2	Pompe centrifuge axial	57
Photo4.3	Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit	57
Photo4.4	Photographie d'une boite en charge	58
Photo 4.5	Photographie des seuils épais testés	59
Photo 4.6	Photographie de support du seuil	59
Photo4.7	Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit	60

Liste des tableaux:

Numéro	Titre	Page
Tableau 2.1	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$.	17
Tableau 2.2	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $s/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$.	21
Tableau 2.3	Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant s/h_1 au nombre de Froude F_1 pour différentes hauteurs h_1 des ouvertures.	22
Tableau 3.1	récapitulation des résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du Q^* pour chaque ouverture h_1 .	29
Tableau 3.2	les résultats expérimentaux du couple de valeur (a_2, b_2) avec les équation d'ajustement pour différentes ouvertures y_1	31
Tableau 3.3	les résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du Q^* pour chaque ouverture y_1 dans lit mineur et lit majeur .	33
Tableau 3.4	regroupe les valeurs des coefficients a_4 et b_4 .	37
Tableau 3.5	regroupe les valeurs des coefficients de a_3, b_4, a_4 et b_4 .	40
Tableau 3.6	regroupe les valeurs des coefficients a_5 et b_5 .	42
Tableau 3.7	récapitulation des valeur de a_6 et b_6 .	45
Tableau 3.8	regroupe les valeurs des coefficients a_7 et b_7 .	48
Tableau 3.9	regroupe les valeurs des coefficients a_8 et b_8 .	51
Tableau 5.1	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$.	65
Tableau 5.2	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $s/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$.	68
Tableau 5.3	Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement	69

Introduction

générale

Introduction générale:

Le contrôle des écoulements à surface libre dans les canaux constitue une problématique centrale en hydraulique, en particulier dans le domaine de la gestion des ouvrages hydrauliques tels que les barrages, les canaux d'irrigation, ou les stations de traitement des eaux. Parmi les phénomènes hydrauliques les plus étudiés figurent le ressaut hydraulique, qui se manifeste par un passage brusque d'un régime d'écoulement supercritique à un régime subcritique. Ce phénomène s'accompagne d'une dissipation importante de l'énergie cinétique, ce qui le rend particulièrement utile pour la protection des structures contre l'érosion et l'affouillement.

Le ressaut hydraulique forcé constitue une variante de ce phénomène, dans laquelle une obstruction (comme un seuil) est utilisée pour imposer artificiellement la formation du ressaut à un endroit précis. Cette technique permet d'optimiser la dissipation d'énergie et de mieux contrôler le comportement de l'écoulement. Il existe plusieurs types de ressauts forcés, et l'un des plus courants dans les dispositifs expérimentaux est le ressaut forcé de type A.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude expérimentale du ressaut hydraulique forcé de type A, par un seuil à paroi épaisse, évoluant dans un canal rectangulaire à section composée. L'objectif principal est de contribuer à la compréhension de la variation des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de différents paramètres hydrauliques, notamment la hauteur initiale de l'écoulement, la géométrie du canal, la hauteur du seuil, et le débit relatif.

Pour ce faire, une série d'expériences a été menée dans un canal en laboratoire, équipé de dispositifs de mesure permettant de déterminer les caractéristiques hydrauliques essentielles. L'analyse porte en particulier sur le rapport des hauteurs conjuguées ($Y = h_2/h_1$), et l'influence du seuil à paroi épaisse, dans le but d'établir des lois de comportement reliant ces grandeurs aux conditions initiales d'écoulement, comme le nombre de Froude ou le débit relatif.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Le premier chapitre présente les généralités théoriques sur le ressaut hydraulique et ses différentes formes, avec un accent sur les écoulements à surface libre.
- Le deuxième chapitre expose les résultats expérimentaux relatifs au ressaut hydraulique forcé par un seuil mince, servant de base comparative.
- Le troisième chapitre étudie le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi épaisse évoluant en canal rectangulaire composé.

Ces chapitres constituent des études antérieures.

- Le quatrième chapitre décrit en détail le dispositif expérimental et les méthodes de mesure employées.

- Le cinquième chapitre est consacré à l'étude approfondie du ressaut hydraulique forcé par un seuil à paroi épaisse, avec analyse et discussion des résultats obtenus.

Ce travail vise à fournir des résultats pratiques utiles pour les ingénieurs hydrauliciens, en particulier dans la conception des dispositifs de dissipation d'énergie dans les canaux à géométrie complexe.

Première partie
Etude bibliographique

Chapitre 1 :
Ecoulement
brusquement varié
(ressaut hydraulique)

1.1. INTRODUCTION:

Un écoulement à variation brusque se manifeste lorsqu'il y a un changement soudain dans les conditions d'écoulement d'un fluide au sein d'un canal ou d'une conduite. Ce phénomène survient notamment lorsque le fluide passe rapidement d'un conduit de grand diamètre à un autre de diamètre plus réduit.

Dans ce type de situation, plusieurs transformations interviennent simultanément, telles que des variations de la vitesse, de la pression et de la profondeur de l'eau, pouvant engendrer des ondes de choc ainsi que des turbulences dans le fluide.

1.2. Définition du ressaut hydraulique:

Le ressaut hydraulique (fig.1.1) est une surélévation brusque de la surface libre d'un courant survenant lorsqu'un régime torrentiel devient fluvial sur une courte distance.

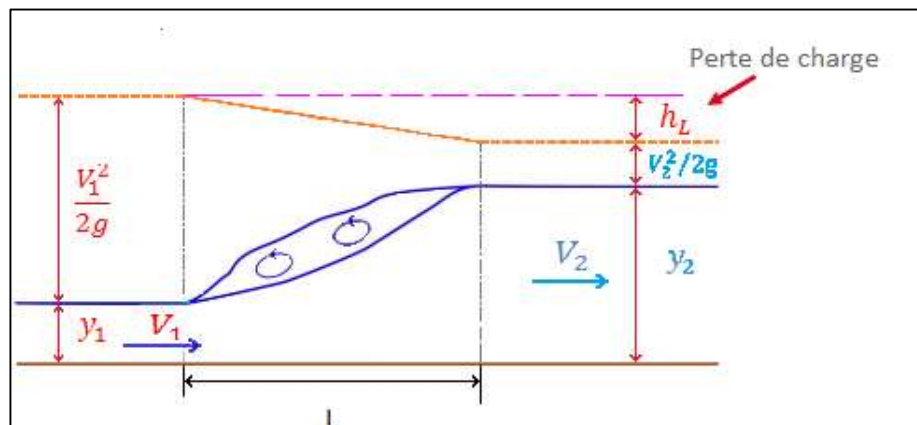


Fig.1.1: Ressaut hydraulique

Le ressaut hydraulique survient dans plusieurs configurations, telles que : à la base d'un barrage-déversoir (fig. 1.2), en aval d'un écoulement passant sous une vanne de fond, ou encore dans un canal à forte pente débouchant sur un cours d'eau. La figure 1.2, où la ligne d'énergie est tracée en pointillé, met en évidence que le ressaut hydraulique entraîne une perte d'énergie due aux turbulences, désignée par (h_L) .

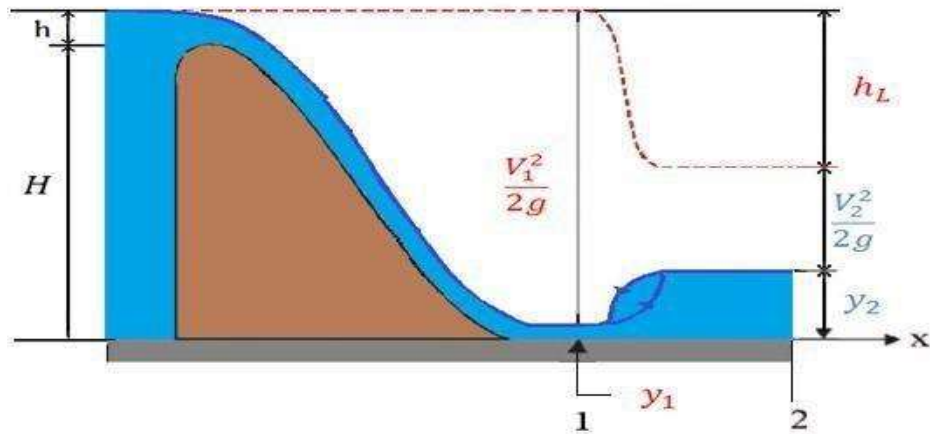


Fig.1.2: Ressaut hydraulique au pied d'un barrage-déversoir

1.3. Ressaut hydraulique classique:

Le ressaut hydraulique classique se manifeste généralement dans un canal rectangulaire à pente nulle ou légèrement inclinée. Sa simplicité en fait le profil le plus couramment utilisé en pratique. De nombreuses études, en particulier expérimentales, ont été menées à son sujet, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de ce phénomène.

1.4. Classification de ressaut:

Le critère principal pour la classification des ressauts hydrauliques est le nombre de Froude à l'amont (F_1), qui représente le rapport entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation des perturbations au sein du fluide.

- Lorsque $F_1 \leq 1$, l'écoulement est dit **subcritique ou critique**, et aucun ressaut ne se forme.
- Pour des valeurs de F_1 comprises entre 1 et 1,7, selon Andersen (1978), la différence de hauteur entre les profondeurs conjuguées en amont et en aval est minimale. Le ressaut qui en résulte se manifeste par de faibles ondulations à la surface libre, avec un aspect proche de celui d'un régime critique. On parle alors de **ressaut ondulé** (fig. 1.3 a).

D'après la classification proposée par Bradley et Peterka (1957), on distingue quatre types de ressaut classique pour des valeurs de $F_1 > 1,7$:

1. Pré-ressaut ($1,7 < F_1 < 2,5$) :

À ce stade, des tourbillons superficiels commencent à apparaître, bien que la surface libre reste relativement plane et que la distribution des vitesses soit encore régulière. Le rendement énergétique demeure cependant très faible (fig. 1.3 b).

2. Ressaut oscillant ($2,5 < F_1 < 4,5$) :

L'écoulement devient instable et caractérisé par une turbulence marquée, localisée soit près du fond, soit à la surface. Ce type de ressaut présente des mouvements pulsatoires (fig. 1.3 c).

3. Ressaut stable ($4,5 < F_1 < 9$) :

Il s'agit d'un ressaut bien formé et spatialement défini. Il est couramment utilisé dans les bassins de dissipation d'énergie en raison de son efficacité, avec un rendement pouvant atteindre entre 45 % et 70 % (fig. 1.3 d).

4. Ressaut turbulent ou clapoteux ($F_1 > 9$) :

À ces valeurs élevées de Froude, des masses d'eau se retournent sous elles-mêmes au début du ressaut, chutant ensuite vers l'amont rapide de manière intermittente. Cela génère de nouvelles vagues en aval, et la surface libre devient très irrégulière (fig. 1.3 e).

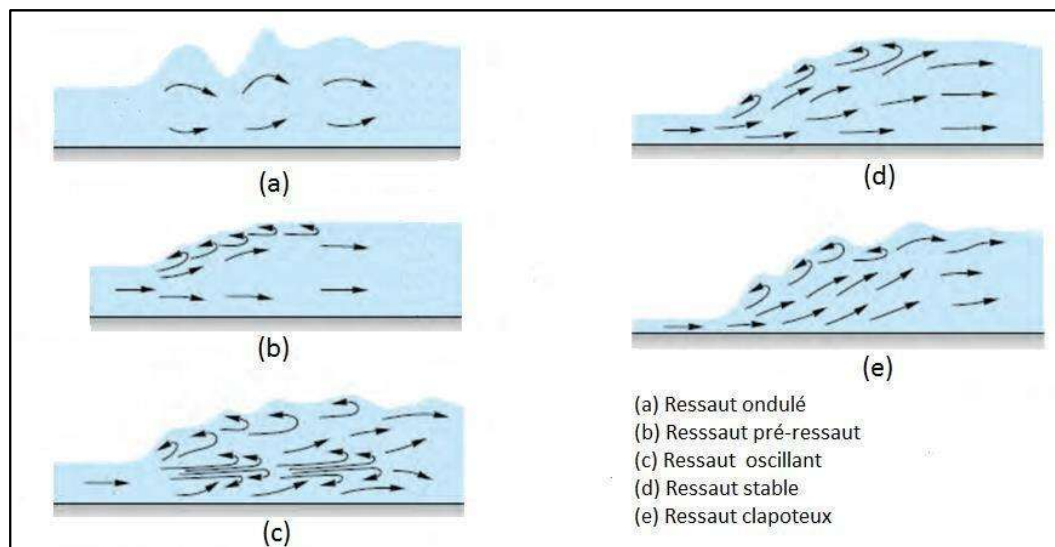


Fig.1.3 Classification des ressauts

1.5. Profondeurs conjuguées :

On appelle profondeurs conjuguées les profondeurs y_1 , et y_2 observées respectivement en amont et en aval du ressaut hydraulique (fig.1.1).

Pour trouver la relation entre les deux profondeurs conjuguées y_1 , et y_2 pour un canal rectangulaire, l'application de l'équation de la quantité de mouvement pour un volume de contrôle compris entre les sections 1 et 2 (fig.1.1) :

On obtient la relation (1.1a) permettent de calculer une des profondeurs conjuguées (y_1 , ou y_2) quand on connaît l'autre.

$$y_1 y_2 \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right) = \frac{q^2}{g} \quad (1.1a)$$

Où q est le débit unitaire exprimée en $m^3 /s/m$.

L'expression (1.1b) s'écrit encore

$$y_1 y_2 \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right) = y_c^2 \quad (1.1b)$$

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{g b^2 y_1^3} \quad (1.2)$$

Et sachant que $V_1 = \frac{Q}{A_1}$

L'équation e de Bélanger (1928) liant le rapport Y de sauteurs conjugués du ressaut au nombre de Froude F_1

$$Y = \frac{Y_1}{Y_2} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1 \right] \quad (1.3)$$

1.6. Longueurs caractéristiques du ressaut :

Les caractéristiques du ressaut, à savoir la longueur de son rouleau L_r et sa portée longitudinale L_j n'ont pu être évaluées avec précision que par voie expérimentale.

1.6.1. Longueur du rouleau:

Zone de recirculation du fluide, le rouleau se caractérise par un écoulement rétrograde en surface. Sa limite aval est définie comme le point de la surface où la composante horizontale de la vitesse s'annule (Hager et al., 1990).

Les campagnes de mesures ont conduit à l'établissement de la loi expérimentale suivante, qui permet d'estimer la longueur du rouleau L_r (Hager et al., 1990).

$$\frac{L_r}{h_1} = -12 + 160 \tan h \frac{F_{\tau_1}}{20} \text{ pour } \frac{h_1}{b} < 0.1 \quad (1.5)$$

$$\frac{L_r}{h_1} = -12 + 160 \tan h \frac{F_{\tau_1}}{12.5} \text{ pour } 0.1 < \frac{h_1}{b} < 0.7 \quad (1.6)$$

Les auteurs ont proposé une relation plus simple pour le nombre de Froude compris entre 2,5 et 8:

$$\frac{L_r}{h_1} = 8F_{\tau_1} - 12 \text{ pour } 2.5 < F_{\tau_1} < 8.0 \quad (1.7)$$

1.6.2. Longueur du ressaut :

La longueur du ressaut L_j constitue la seconde grandeur caractéristique. Diverses formules ont été développées pour estimer la localisation de la section finale du ressaut.

Hager et al. (1990) ont proposé une relation permettant d'évaluer la longueur L_j du ressaut.

$$\frac{L_r}{h_1} = 220 \tan h \frac{(F_{\tau_1} - 1)}{22} \quad (1.8)$$

Selon Carlier (1980), on a la formule de Smetana (1933)

$$L_j = 6(y_2 - y_1) \quad (1.9)$$

1.7. Perte d'énergie dans le ressaut hydraulique :

Le calcul de la perte d'énergie dans un ressaut hydraulique repose sur l'application de l'équation de Bernoulli entre les sections 1 et 2, telles qu'illustrées dans la figure (1.1).

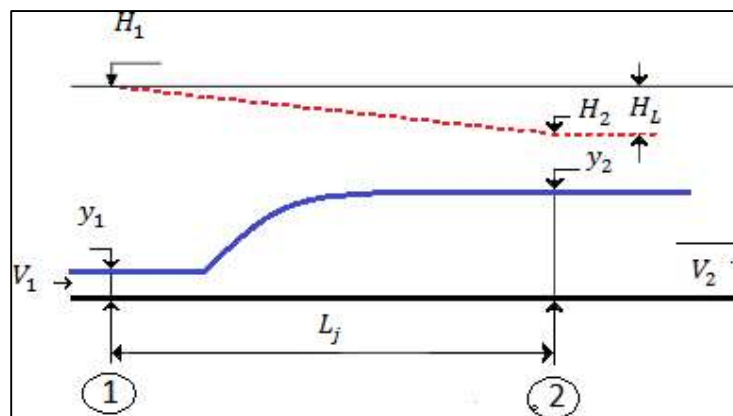


Fig.1.4 Dissipation d'énergie.

En se référant au plan 0-0, la perte de charge totale dans la section initiale du ressaut s'écrit :

$$h_1 = H_1 - H_2 = Y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} - \left(Y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (1.10)$$

Les vitesses moyennes aux sections amont et aval du ressaut sont respectivement désignées par V_1 et V_2 . Le coefficient de correction de l'énergie cinétique α étant supposé égal à 1, et compte tenu du régime permanent de l'écoulement, l'équation de continuité peut être utilisée pour relier les grandeurs hydrauliques aux deux sections, nous donne

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (1.11)$$

Où

$$A_1 = by_1 \quad \text{et} \quad A_2 = by_2 \quad (1.12)$$

En tenant compte des relations (1.11), (1.12), la relation (1.10) s'écrit :

$$h_L = Y_1 - Y_2 + \left(\frac{Q^2}{2gby_1} - \frac{Q^2}{2gby_2} \right) \quad (1.13)$$

Comme le débit unitaire, $q = \frac{Q}{b}$ l'équation (1.13) devient :

$$h_L = Y_1 - Y_2 + \frac{q^2}{2g} \left(\frac{1}{y_1^2} - \frac{1}{y_2^2} \right) \quad (1.14)$$

L'expression suivante (1.14) du débit unitaire peut être déduite de l'expression de la quantité de mouvement définie par la relation (1.1).

$$\frac{q^2}{2g} \left(\frac{y_1 y_2^2 + y_2 y_1^2}{4} \right) \quad (1.15)$$

Ainsi, l'équation (1.15) s'écrit sous sa forme définitive :

$$h_L = \frac{(y_2 - y_1)}{4y_1 y_2} \quad (1.16)$$

1.8. Rendement du ressaut :

Le rendement η du ressaut est défini par le rapport de la perte de charge ΔH qu'il occasionne à la charge totale dans sa section initiale :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} \quad (1.17)$$

$$\Delta H = H_L = H_1 - H_2$$

H_1 et H_2 désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut (fig.1.4).

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (1.18)$$

Le rapport $\frac{H_2}{H_1}$ est appelé efficacité du ressaut

$$\text{Nous avons } H_1 = y_1 \left[1 + \frac{F_1^2}{2} \right] \quad H_2 = y_2 \left[y + \frac{F_1^2}{2y^2} \right] \quad (1.19)$$

En remplaçant H_1 et H_2 par leurs valeurs dans l'expression du rendement du ressaut, on obtient :

$$\eta = 1 - \left[\frac{y + \frac{F_1^2}{2y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \right] \quad (1.20)$$

1.9. Bassin d'amortissement :

Les vitesses de l'écoulement en aval du ressaut (en régime fluvial) sont inférieures à celles observées en amont (en régime torrentiel). Cette caractéristique permet d'utiliser le ressaut comme un dispositif de dissipation d'énergie, en réduisant la vitesse de la nappe d'eau (voir figure 1.5).

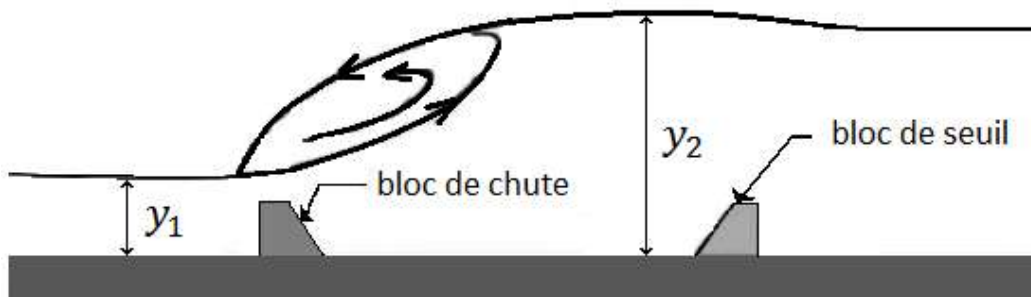


Fig.1.5 Schéma de principe d'un bassin d'amortissement

Pour contenir le ressaut hydraulique dans une zone précise et prévenir l'affouillement de l'ouvrage ainsi que l'érosion des berges, un bassin d'amortissement est aménagé avec des caractéristiques bien définies. La conception de ce bassin dépend principalement de la valeur du nombre de Froude.

1.10. Applications du ressaut hydraulique :

- Dans les écoulements à surface libre, le ressaut hydraulique est utilisé pour : Dissiper de l'énergie dans les écoulements sous les barrages, les déversoirs et autres structures hydrauliques
- Maintenir un haut niveau d'eau dans les canaux de.
- Mixer des produits chimiques utilisés pour la purification ou traitement d'eau usée
- Utiliser dans les applications industrielles et les processus de fabrication.

1.11. CONCLUSION:

En conclusion, les écoulements à variations brusques représentent des phénomènes complexes qui surviennent lorsqu'un changement soudain affecte les conditions d'écoulement d'un fluide dans un canal ou une conduite. Ces modifications peuvent provoquer d'importantes variations de vitesse, de pression et de profondeur, ainsi que l'apparition d'ondes de choc et de turbulences.

Une bonne compréhension de ces écoulements est essentielle dans de nombreux domaines de l'ingénierie, en particulier en hydraulique.

Chapitre 2 :
Ressaut hydraulique
forcé par seuil mince
en canal composé

2.1. INTRODUCTION:

Cette étude porte sur la variation des hauteurs conjuguées d'un ressaut hydraulique forcé de type A, généré par un seuil mince dans un canal rectangulaire. L'expérimentation a été réalisée pour cinq hauteurs initiales h_1 : 2, 2,5, 3, 3,5 et 4 cm. Elle a permis d'explorer une plage pratique de nombres de Froude incident comprise entre 3 et 13.

2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 :

Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, noté Y , est défini comme le quotient de la hauteur d'eau en aval du ressaut hydraulique h_2 par la hauteur initiale h_1 (soit $Y=h_2/h_1$).

Les représentations graphiques des données expérimentales (figures 5.1 à 5.2) illustrent de manière claire l'évolution de ce rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les cinq hauteurs initiales considérées : 2, 2,5, 3, 3,5 et 4 cm.

Pour le lit mineur

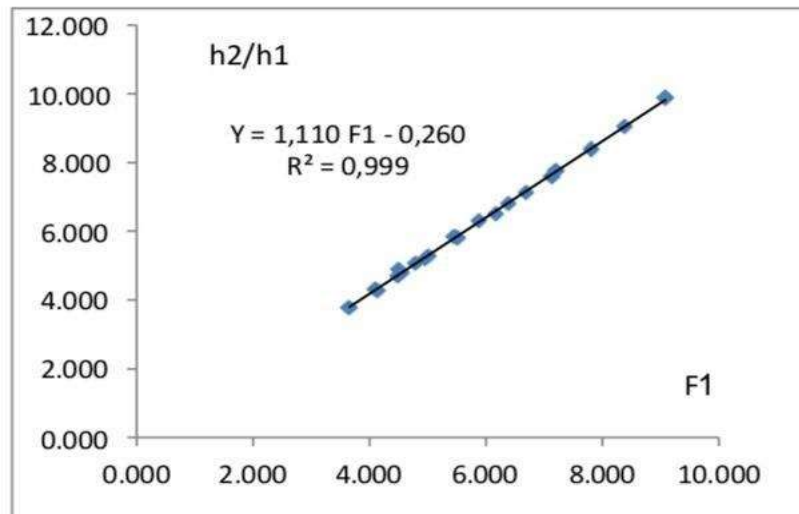


Fig.2.1: Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour le lit mineur. (□) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement

Cette figure met en évidence que le rapport Y des hauteurs conjuguées augmente progressivement avec l'élévation du nombre de Froude F_1 .

L'ajustement des données expérimentales a révélé que la relation entre Y et F_1 suit une tendance linéaire, exprimée par une fonction du type : $Y=f(F_1)$.

$$Y = 1.110 F_1 - 0.260 \quad R^2 = 0.999 \quad (2.1)$$

$$3.64 < F_1 < 9.85$$

Pour le lit majeur

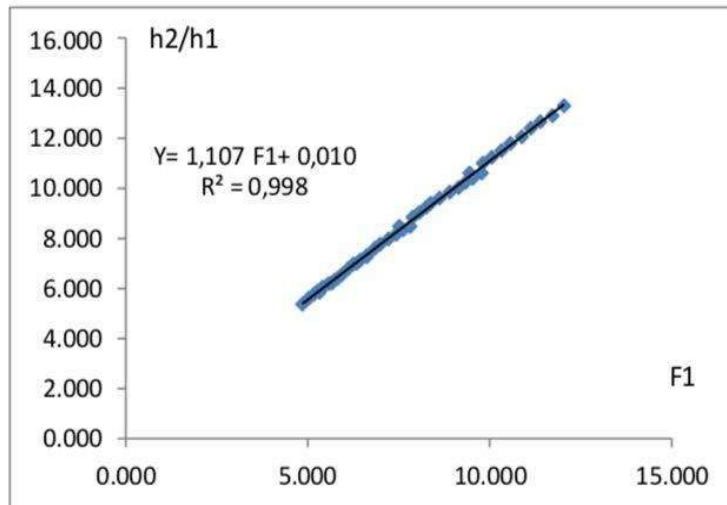


Fig.2.2 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour le lit majeur.

(□) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement

Cette figure illustre que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident entraîne une élévation de la hauteur conjuguée dans le lit majeur.

Par ailleurs, l'ajustement des données expérimentales a permis d'établir une relation linéaire, décrite par l'équation suivante :

$$Y = 1.107 F_1 + 0.110 \quad ; \quad R^2 = 0.998 \quad (2.2)$$

$$4.85 < F_1 < 12.04$$

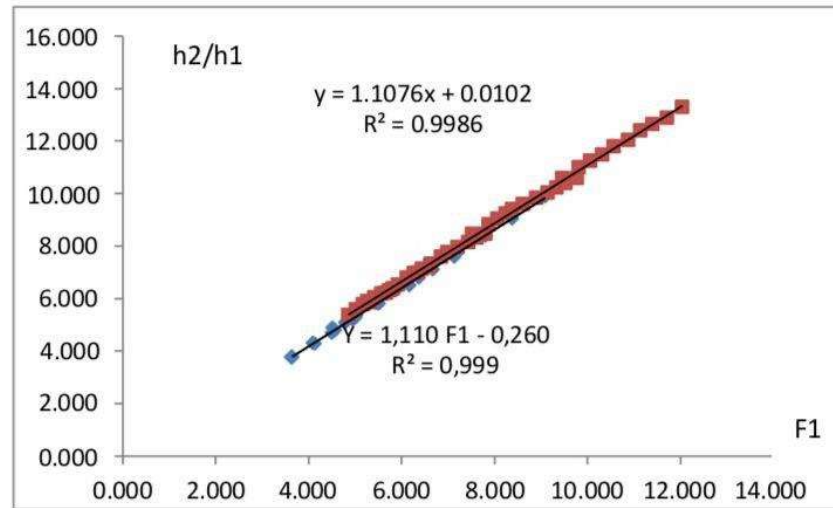
Comparaison

Fig.2.3 : montre clairement un décalage entre les valeurs de Y du ressaut forcé par seuil mince, pour les mêmes nombres de Froude F_1 .

L'étude comparatif entre le lit mineur et majeur représenté par la figure (2.3) montre clairement un décalage entre les valeurs de Y du ressaut forcé par seuil mince, pour les mêmes nombres de Froude F_1 , pour les deux lits du canal.

En effet, le rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut forcé par seuil dans le lit mineur est nettement inférieur à celui du ressaut forcé par seuil dans le lit majeur du canal.

Les valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F_1)$ pour les deux cas, sont regroupées dans le tableau (Tableau.2.1) :

Tableau.2.1. Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
YA	F1	YA	F1	YA	F1
3.775	3.645	5.375	4.850	8.467	7.806
4.325	4.095	5.600	5.021	8.840	7.874
4.286	4.134	5.775	5.169	9.040	8.057
4.900	4.515	5.900	5.268	9.240	8.242
4.700	4.499	5.857	5.314	9.400	8.381
4.800	4.562	6.050	5.418	9.600	8.615
5.080	4.792	6.200	5.570	9.840	8.898
5.200	4.947	6.229	5.661	10.040	9.137
5.286	5.003	6.325	5.723	10.240	9.329
5.833	5.477	6.400	5.808	10.600	9.450
5.850	5.444	6.543	5.926	10.400	9.523
5.800	5.504	6.800	6.104	10.600	9.767
6.333	5.886	6.971	6.255	11.000	9.816
6.520	6.164	7.000	6.340	11.250	10.062
6.800	6.376	7.143	6.436	11.500	10.311
7.120	6.675	7.257	6.620	11.800	10.561
7.600	7.134	7.333	6.625	12.050	10.877
7.760	7.200	7.600	6.842	12.400	11.132
8.400	7.806	7.767	6.987	12.650	11.389
9.050	8.381	7.967	7.207	12.900	11.713
9.900	9.089	8.167	7.430	13.300	12.040
		8.480	7.512		
		8.333	7.617		

2.3. Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

Pour le lit mineur

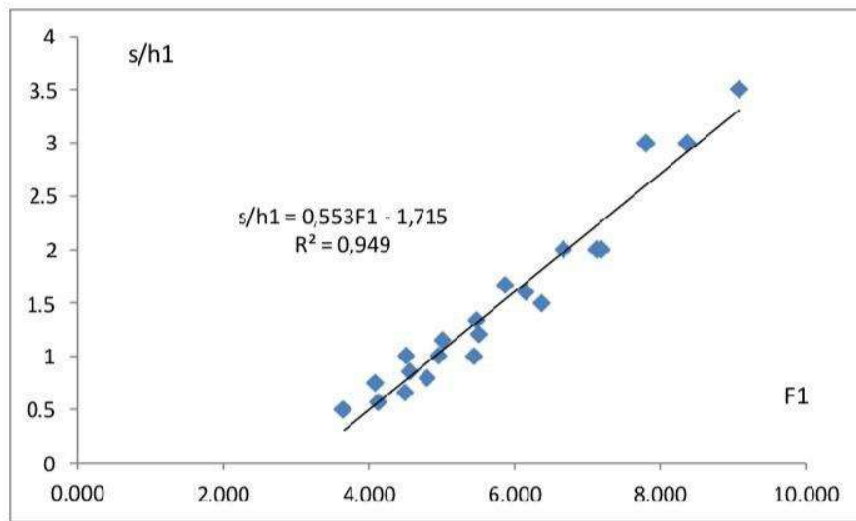


Fig.2.4 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour les deux lits du canal composé. (+) points de mesures expérimentales en lit mineur ; Pour $h_0/h_2 > 1$.

La figure ci-dessus montre que l'ajustement des points de mesure expérimentale dans le lit mineur donne une courbe unique de type linéaire.

$$S/h_1 = 0.553 F_1 + 1.715 ; R^2 = 0.949 \quad (2.3)$$

$$4.85 < F_1 < 12.04$$

Pour le lit majeur

La représentation graphique des points expérimentaux, illustrée par la **figure 2.5**, met en évidence la **variation du rapport de seuil relatif** $S=s/h_1$ du ressaut hydraulique forcé en fonction du **nombre de Froude** F_1 , pour les cinq hauteurs d'eau amont h_1 , aussi bien dans le lit mineur que dans le lit majeur.

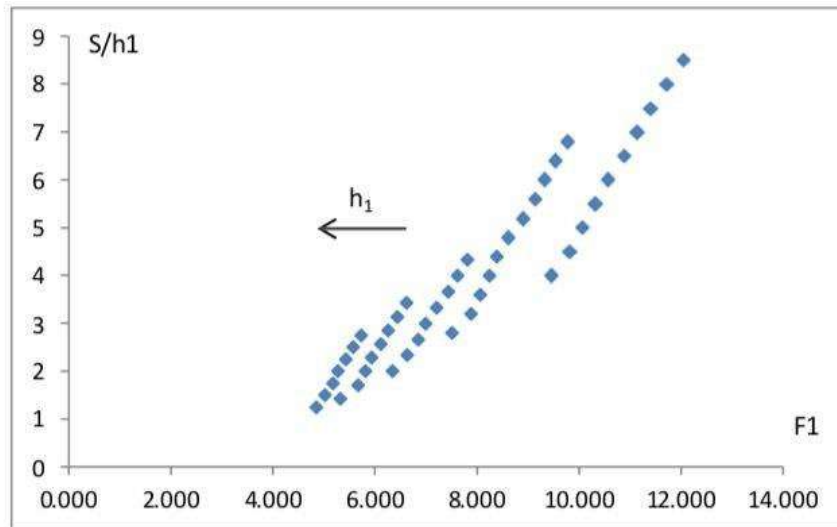


Fig.2.5. Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour le lit majeur du canal composé. (□) points de mesures expérimentales en lit majeur.

En constate de cette figure que l'augmentation du seuil relatif S entraîne celle du nombre de Froude F_1 et que l'influence de la hauteur amont h_1 est perceptible dans la section composée.

Les fig.2.5 (a, b, c, d, e) montrent la variation de la hauteur relative du seuil

$S = s/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 pour les cinq ouvertures, tels que : $h_1/B = 0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066$.

Les figures ci-dessous montrent les ajustements des points de mesure expérimentale pour les différentes ouvertures h_1 en lit majeur.

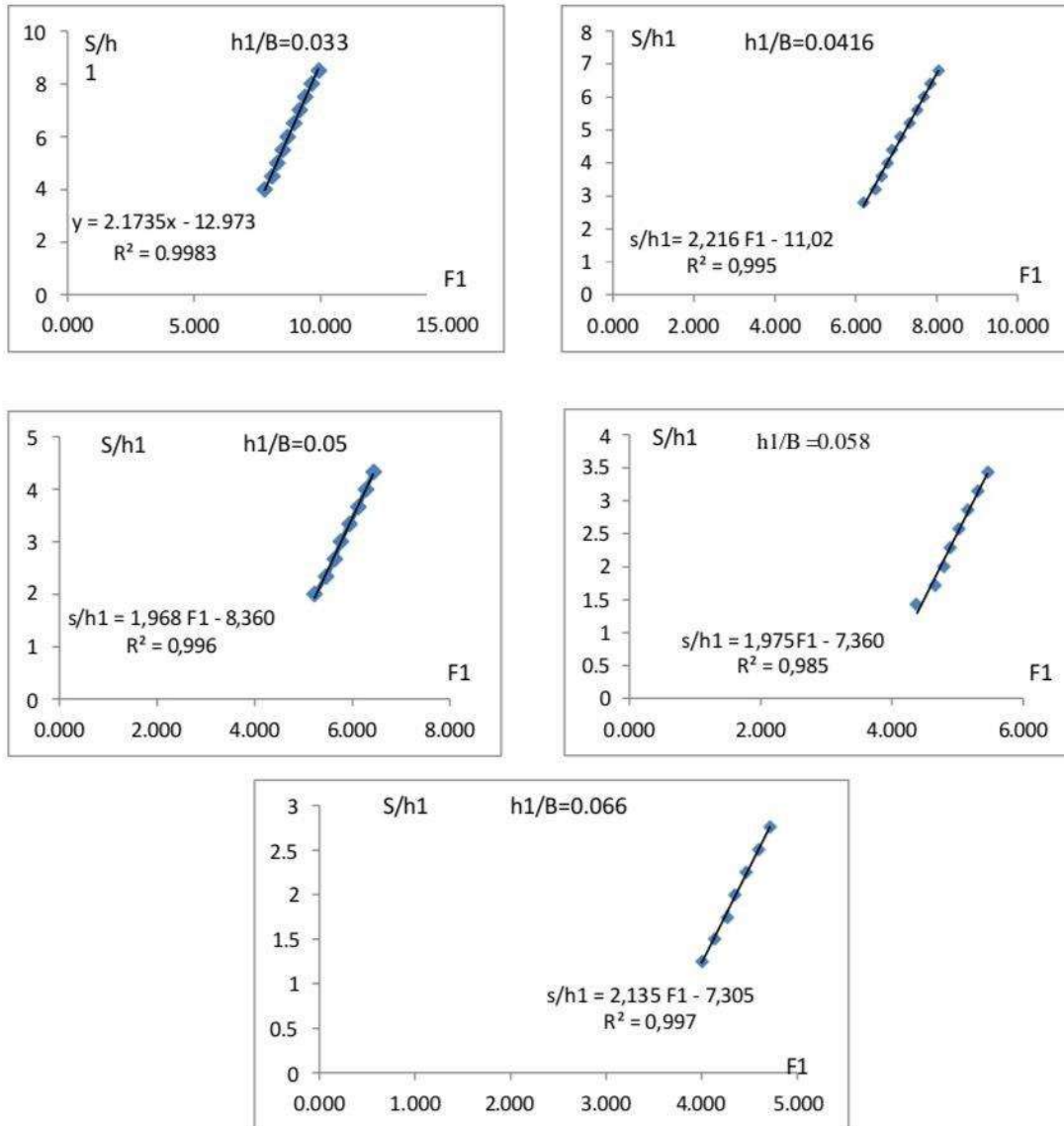


Fig.2.6. (a, b, c, d, e). Variation du rapport $S = s/h_1$ de la hauteur relative du seuil du ressaut forcé en fonction de nombre de Froude respectivement pour $h_1/B = (0.06 ; 0.058 ; 0.05 ; 0.0416 ; 0.033)$. (○) points expérimentaux. (—) courbe d'ajustement.

Les Fig.2.6 (a, b, c, d, e), montrent que l'ajustement des mesures expérimentales de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1 suit une loi de type linéaire de la forme $s/h_1 = a(F_1) + b$.

Les données ayant servi au traçage des (fig.2.5) et (fig.2.6) (a, b, c, d, e) sont groupées au tableau 2.2.

Tableau.2.2. Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $s/h_1 = f(F_1)$
pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1
3.645	0.5	4.850	1.25	7.617	4
4.095	0.75	5.021	1.5	7.806	4.333333
4.134	0.571429	5.169	1.75	7.874	3.2
4.515	1	5.268	2	8.057	3.6
4.499	0.666667	5.314	1.428571	8.242	4
4.562	0.857143	5.418	2.25	8.381	4.4
4.792	0.8	5.570	2.5	8.615	4.8
4.947	1	5.661	1.714286	8.898	5.2
5.003	1.142857	5.723	2.75	9.137	5.6
5.477	1.333333	5.808	2	9.329	6
5.444	1	5.926	2.285714	9.450	4
5.504	1.2	6.104	2.571429	9.523	6.4
5.886	1.666667	6.255	2.857143	9.767	6.8
6.164	1.6	6.340	2	9.816	4.5
6.376	1.5	6.436	3.142857	10.062	5
6.675	2	6.620	3.428571	10.311	5.5
7.134	2	6.625	2.333333	10.561	6
7.200	2	6.842	2.666667	10.877	6.5
7.806	3	6.987	3	11.132	7
8.381	3	7.207	3.333333	11.389	7.5
9.089	3.5	7.430	3.666667	11.713	8
		7.512	2.8	12.040	8.5

Le (Tableau.2.2) regroupe les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport $S = s/h_1$ des hauteurs relatives du seuil au nombre de Froude F_1 , pour différentes hauteurs h_1 des ouvertures.

Tableau.2.3. Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant s/h_1 au nombre de Froude F_1 pour différentes hauteurs h_1 des ouvertures.

h_1/B	a	b	Équations des droites	Coefficients de corrélation R^2
0,033	2.17	-	$S = 2.173 F_1 - 12,97$	0,998
	3	12,97		
0,041	2.21	- 11,02	$S = 2.216 F_1 - 11,02$	0,995
	6			
0,050	1.96	-8,36	$S = 1.968 F_1 - 8,36$	0,996
	8			
0,058	1,97	- 7,360	$S = 1.975 F_1 - 7.360$	0,985
	5			
0,066	2.13	- 7,305	$S = 2.135 F_1 - 7,305$	0,997
	5			

Le (Tableau.2.3) montre que les valeurs des paramètres 'a' sont presque égales , et leur moyenne arithmétique est $a = 2.093$, tandis que l'ajustement statistique des couples de valeurs (b, h_1/B) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type logarithmique d'équation :

$$b = 8.842 \ln (h_1/B) + 17,41 \quad R^2 = 0,950$$

Comme la montre la figure ci-dessous

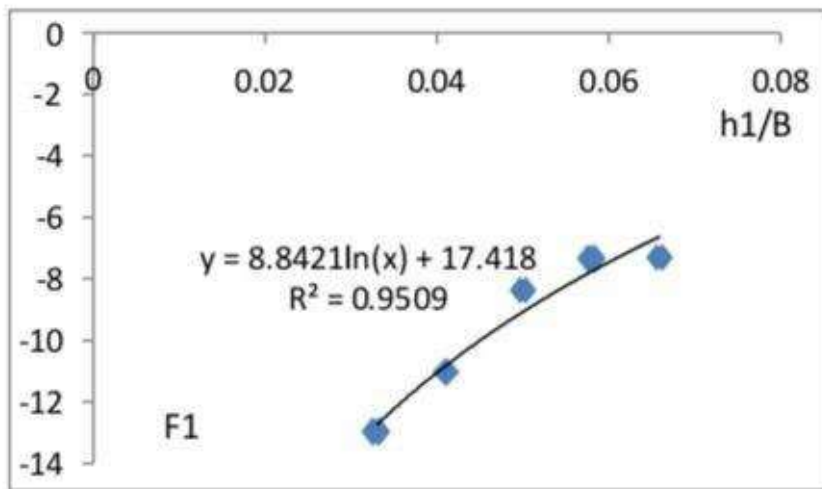


Fig.2.7 : Variation du paramètre 'b' en fonction de h_1/B

effet, en remplaçant les coefficients a et b par leurs expressions dans la relation $s/h_1 = aF_1 + b$, l'équation liant le rapport des hauteurs relatif du seuil s/h_1 au nombre de Froude F_1 et à la hauteur relative amont y_1 devient :

$$S/h = 2.093 F_1 + (8.842 h_1/B + 17.41) \quad (5.4)$$

$$0,033 < y_1 < 0,066$$

La figure (2.8) indique que la relation $S = f(F_1, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces derniers tournent en majorités autour de la première bissectrice, ce qui fiabilise la relation globale obtenue.

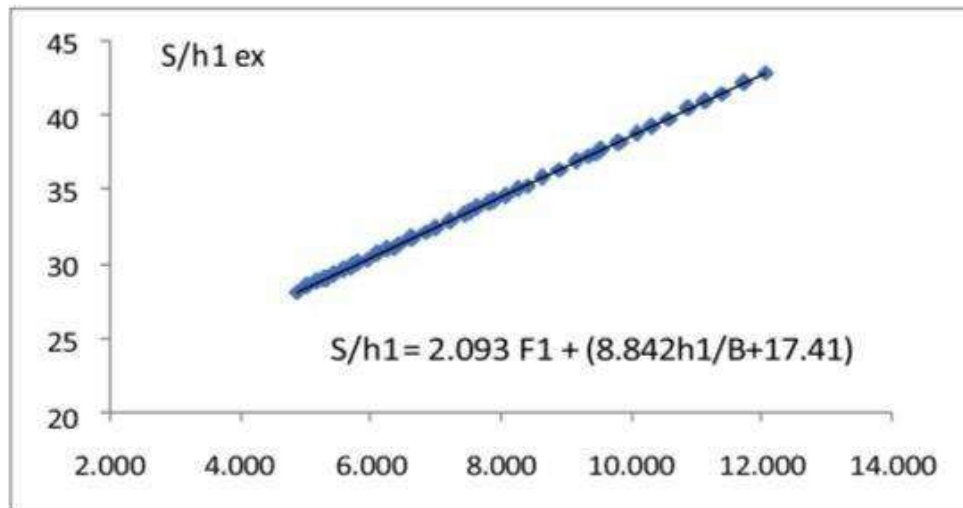


Fig.2.8: Variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction de la relation $f(F_1, h_1/B)$.

(o) Points expérimentaux. (□) Première bissectrice d'équation : $s/h_1 = f(F_1, h_1/B)$.

Parallèlement à ce que nous avons fait dans le ressaut contrôlé par seuil, on peut déduire une relation empirique liant la hauteur relative du seuil S et le rapport des hauteurs conjuguées Y_A du ressaut forcé par seuil dans chaque section du canal composé.

La figure ci-dessous résume la variation de Y_A en fonction de S dans les deux sections du canal rectangulaire de forme composé.

Cette tendance indique une corrélation directe entre l'intensité du régime torrentiel à l'amont et la hauteur de la nappe en aval du ressaut

2.4 Conclusion

Cette seconde partie de notre étude a porté sur l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique forcé de type A induit par un seuil mince dans un canal rectangulaire composé à pente nulle (canal prismatique).

L'exploitation des résultats expérimentaux a permis de proposer des lois empiriques globales fiables. En particulier :

- L'étude statistique de la variation du rapport des hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 a montré que la relation est bien approximée par une loi linéaire.
- Il a été observé que le rapport Y est plus faible dans le lit mineur que dans le lit majeur, et ce, pour les trois types de ressaut étudiés.
- De plus, la comparaison avec le ressaut contrôlé a révélé que les valeurs de Y pour le ressaut forcé sont nettement inférieures. Enfin, l'effet de la marche positive (seuil) est clairement perceptible dans les deux configurations (lit mineur et lit majeur), et ce, quelle que soit la valeur du nombre de Froude dans la plage considérée.

Ces résultats confirment l'importance de la géométrie du canal et de la présence d'un seuil dans le contrôle de l'énergie et des caractéristiques du ressaut hydraulique.

Chapitre 3 :
Ressaut hydraulique
contrôlé par seuil à
paroi épaisse évoluant
en canal rectangulaire
de section composée

3. 1. INTRODUCTION

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi épaisse dans un canal rectangulaire en lit composé à pente nulle. L'expérimentation a été menée sous cinq ouvertures h_1 : 2; 2.5; 3; 3.5 et 4cm. Pour une gamme pratique du débit relatif Q^* .

3. 1.1 Détermination expérimentale de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en lit composé

Les caractéristiques adimensionnelles essentielles, intervenant au phénomène du ressaut dans un canal rectangulaire en lit composé sont:

- le débit relatif Q^* ;
- le rapport $Y = h_2 / h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut;
- Hauteur relative $S=s / h_1$ du seuil;
- Longueur relative L_j / h_1 du ressaut;
- Longueur relative du rouleau de surface L_r / h_1 du ressaut;

La figure (3.1) montre clairement les différents paramètres composant le ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais.

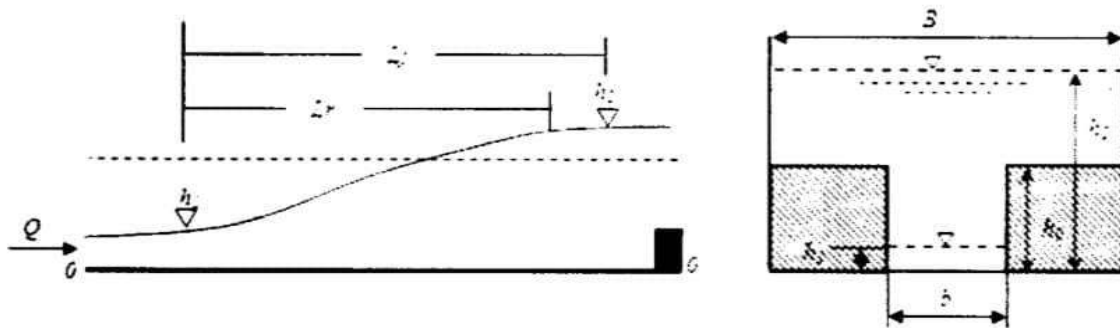


Figure 3.1: Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi épaisse en canal rectangulaire de section composée

3.1.2 Description des essais

Un échantillon constitué de plusieurs points de mesures expérimentales, pour chacun des paramètres intervenant au phénomène, a permis également pour ce type de ressaut, d'aboutir à des résultats significatifs. Ces paramètres sont : le débit Q ; la hauteur initiale h_1 ; la hauteur finale h_2 et la hauteur du seuil s . Ceux-ci permettent de composer les produits

adimensionnels suivants: le débit relatif Q^* de l'écoulement incident, le rapport $Y=h_2/h_1$ du seuil épais.

Le nombre de Froude F_1 est tel que:

$$Fr^2 = \frac{Q^2}{gh_1^3b^2} \quad Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gb^5}}$$

Ainsi et après la formation du ressaut contrôlé figure (2.1), nous effectuerons, pour une hauteur initiale h_1 et une position x de seuil fixées, les opérations suivantes:

1. La lecture de la hauteur déversant h_q du déversoir rectangulaire.
2. le calcul du débit volume correspondant, par application de la relation du débitmètre rectangulaire (Hachemi. Rachedi.2006):

$$Q=2.379B\sqrt{2g\beta} (1+0.16496\beta^{20716})^{3/2}h_q^{3/2}$$

Avec:

Q : le débit en (m^3/s). b : le lit mineur(m)

$\beta=b/B$: Rapport de l'élargissement. B : le lit majeur(m).

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

h_q : La hauteur de la lame déversant en (m).

3. Calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par application de la relation citée ci-dessus.
4. Mesure de la hauteur finale h_1 du ressaut.
5. calcul du débit relatif Q^* .

3.2. Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du débit relatif Q^*

3.2.1 premier cas : ($\beta=b/B=1$)

Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y est le rapport de la hauteur d'eau aval du ressaut hydraulique h_1 sur la hauteur initiale du ressaut hydraulique h_1 ($Y=h_2/h_1$).

La représentation graphique de la figure (5.2) illustre clairement la variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y en fonction du débit relatif Q^* , pour les cinq ouvertures h_1 :2;2.5;3;3.5 et 4cm .

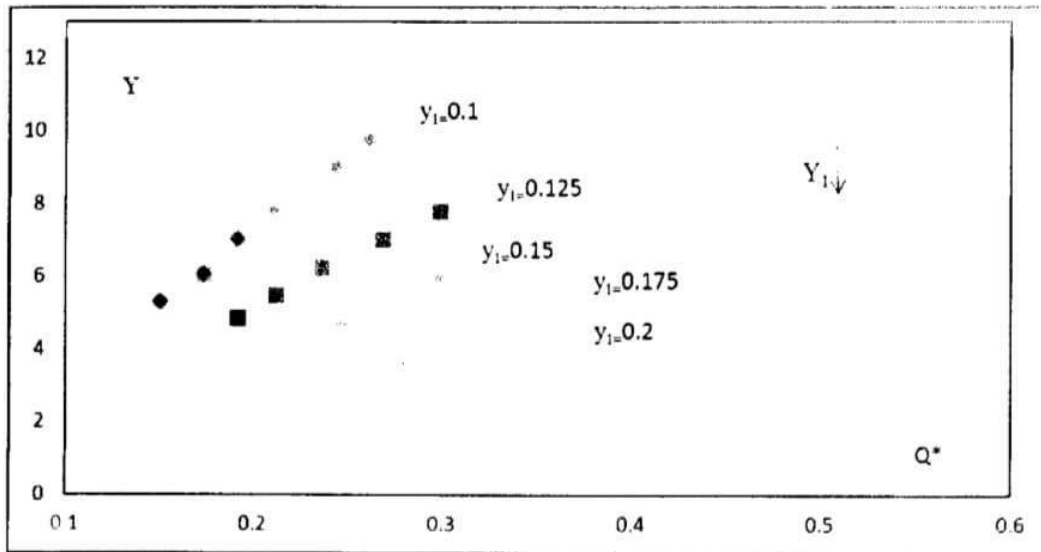


Figure 3.2: Variation du rapport des hauteurs y du ressaut hydraulique en fonction du débit relatif Q^* les motifs différents colorés représentent les points de mesures expérimentales.

En remarque en premier lieu que l'augmentation du débit relatif Q^* entraîne celle du rapport des hauteurs Y et que l'influence de la hauteur amont h_1 est perceptible. On constate que pour le même nombre de débit relatif Q^* , Y diminue avec l'augmentation de y_1 .

La figure (3.2) illustre cinq allures, correspondant chacune à une valeur bien connue de y_1 . Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés du ressaut contrôlé par seuil à parois épaisse.

L'analyse des points de mesures expérimentales, montre que pour chaque valeur de y_1 , un ajustement de type linéaire est possible de la forme: $Y = a_1 Q^* + b_1$

Le tableau (3.1) regroupe les valeurs des coefficients de a_1 et b_1 issus de l'ajustement des moindres carrés.

Tableau (3.1): récapitulation des résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du Q^* pour chaque ouverture h_1 .

h_1 (cm)	$y_1 = h_1/b$	a_1	b_1	Equation d'ajustement	R^2
2	0,100	40,63	-0,848	$Y = 40,63Q^* - 0,848$	0,996
2,5	0,125	27,26	-0,311	$Y = 27,26Q^* - 0,311$	0,996
3	0,150	23,73	-0,101	$Y = 23,73Q^* - 0,101$	0,998
3,5	0,175	16,81	-0,41	$Y = 16,81Q^* - 0,410$	0,995
4	0,200	13,8	-0,256	$Y = 13,80Q^* - 0,256$	0,996

Le tableau (3.1) montre la diminution des coefficients a_1 , et l'augmentation des valeurs de b_1 , avec l'augmentation de la hauteur relative amont y_1 . L'ajustement statistique des couples des valeurs (y_1, a_1) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type puissance d'équation: $a_1 = 1,196 \cdot (h_1/b)^{-1,52}$ avec

$$R^2 = 0,984.$$

Celle-ci est illustrée par la figure ci-dessous:

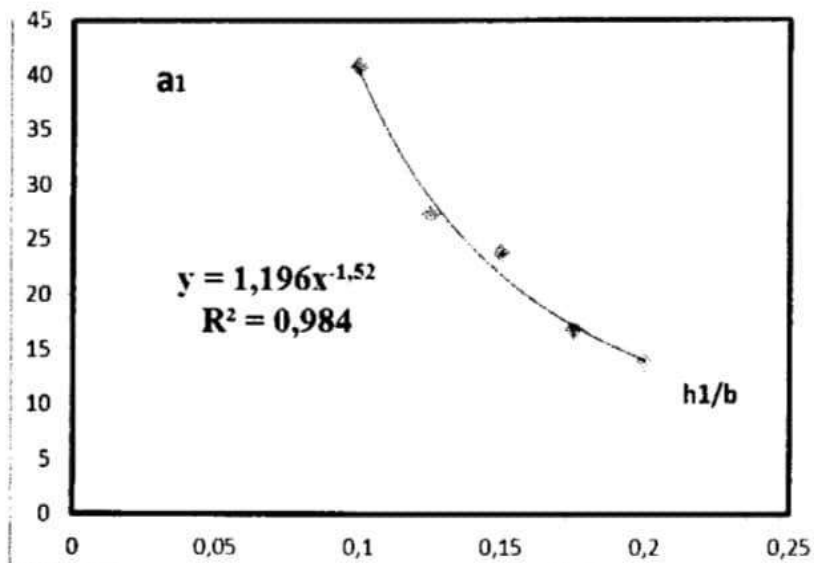


Figure (3.3): Variation du coefficient b_1 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

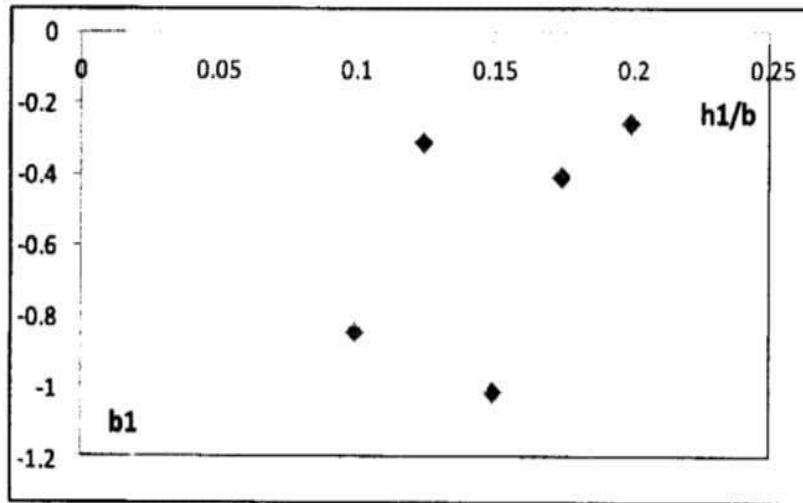


Figure (3.4): Variation du coefficient b_1 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

Pour la valeur de b_2 elle ne varie pas en fonction de y_1 , ainsi elle prend une valeur moyenne de $b_2 = - (0.848 + 0.311 + 1.019 + 0.41 + 0.256) / 5 = - 2.6392$.

En effet, en remplaçant les coefficients a_1 , et b_1 , par leur expressions dans la relation global.

$Y = a_1 Q^* + b_1$, l'équation liant le rapport des hauteurs $Y = h_2 / h_1$ au nombre de débit relatif Q^* et à la hauteur relative amont y_1 devient: $Y = 1,196*(h_1/b)^{-1.52} Q^* - 2.6392$ pour $0, 1 < y_1 < 0.2$.

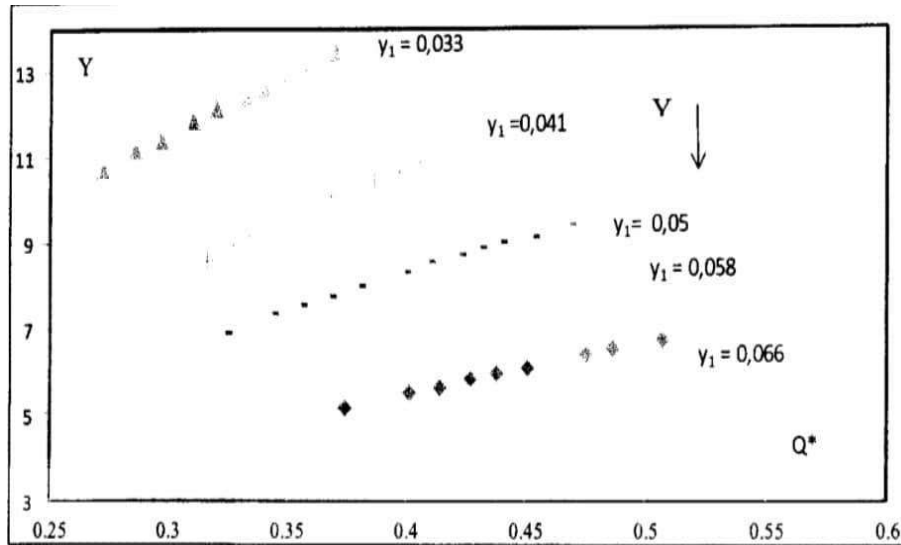
3.2.2 Deuxième cas : ($\beta = b/B < 1$)

Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y est le rapport de la hauteur d'eau aval du ressaut hydraulique h_2 sur la hauteur initiale du ressaut hydraulique h_1 ($Y = h_2/h_1$).

La représentation graphique des points expérimentaux ci-dessous montre clairement la variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y en fonction du débit relatif Q^* , pour les cinq ouvertures h_1 : 2; 2.5; 3; 3.5 et 4cm .

En remarque en premier lieu que l'augmentation du débit relatif Q^* entraîne celle de hauteur relative aval Y et que l'influence de la hauteur amont h_1 est perceptible. On constate que pour le même nombre de débit relatif Q^* , Y diminue avec l'augmentation de y_1 .

La figure (3.5) indique cinq cinq allures, correspondant chacune à une valeur bien déterminée de y_1 .



Figure(3.5): Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^* les motifs différents colorés représentent les points de mesures expérimentales pour les cinq valeurs de y_1 : 0,033; 0,041;0,05; 0,058 et 0,066.

La figure (3.5) indique cinq allures, correspondant chacune à une valeur bien déterminée de y_1 . Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés du ressaut contrôlé par seuil épais dans le canal rectangulaire de lit majeur.

L'analyse des points de mesures expérimentales, montre que pour chaque valeur de y_1 , un ajustement de type linéaire est de la forme: $Y = a_2 Q^* + b_2$

Le tableau (3.2) regroupe les valeurs des coefficients de a_2 et b_2

Tableau (3.2): les résultats expérimentaux du couple de valeur (a_2 , B_2) avec les équation d'ajustement pour différentes ouvertures y_1

h_1 (cm)	$y_1 = h_1 / B$	a_2	B_2	Equation d'ajustement	R^2
2	0.0333	27.5	3.265	$Y = 27.5Q^* + 3.265$	0,997
2.5	0.0410	24.58	0.957	$Y = 24.58 Q^* + 0.957$	0,991
3	0.0500	17.4	1.35	$Y = 17.4Q^* + 1.35$	0,995
3.5	0.0583	16.4	0.015	$Y = 16.4Q^* + 0.015$	0,997
4	0.0660	12.34	0.53	$Y = 12.34Q^* - 0.53$	0,997

Le tableau (3.2) montre la diminution progressive des coefficients et b_2 avec l'augmentation de la hauteur relative amont y_1 L'ajustement statistique des couples des

valeurs (y_1, a_2) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type puissance d'équation: $a_2 = 0.581 * (h_1 / B)^{-1.15}$ avec $R^2 = 0.947$.

valeurs de y_1 : 0,1; 0,125; 0,15; 0,175, 0,2. 0,033; 0,041, 0,05 0,058 et 0,066 respectivement le lit mineur et le lit majeur.

En remarque en premier lieu que l'augmentation du débit relatif Q^* entraîne celle de la hauteur relative aval Y et que l'influence de la hauteur amont h_1 , est remarquable pour le lit mineur et celui majeur. On constate également que pour le même nombre de débit relatif Q^* . Y diminue avec l'augmentation de y_1 pour les deux lits.

L'analyse des points de mesures expérimentales, montre que pour chaque valeur de y_1 un ajustement de type linéaire est de la forme: $Y = A Q^* + B$, pour le lit mineur et le lit majeur.

Les résultats des ajustements obtenus sont mentionnés dans le tableau (3.3).

Le tableau (3.3) regroupe les valeurs des coefficients de a_1, b_1, a_2 et b_2

Tableau (3.3): les résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du Q^* pour chaque ouverture y_1 dans lit mineur et lit majeur .

h_1 (cm)	$y_1 = h_1$ / b lit mineur	$y_1 = h_1$ / B lit majeur	a_1	b_1	a_2	b_2	Equation d'ajustement lit mineur	R^2	Equation d'ajustement lit majeur	R^2
2	0.1	0.0333	40.63	-0.848	27.5	3.265	$Y=40,63Q^*-$ 0.848	0,996	$Y =27.5Q^*$ $+3.265$	0,997
2.5	0.125	0.0410	27.26	-0.311	24.58	0.957	$Y=27.26Q^*-$ 0.311	0,996	$Y =24.58 Q^*$ $+0.957$	0,991
3	0.15	0.0500	23.73	- 0.1019	17.4	1.35	$Y=23.73Q^*-$ 0.1019	0,998	$Y =17.4Q^*$ $+1.35$	0,995
3.5	0.175	0.0583	16.81	-0.41	16.4	0.015	$Y=16.81Q^*-$ 0.41	0,995	$Y =16.4Q^*$ $+0.015$	0,997
4	0.20	0.0660	13.8	-0.256	12.34	0.53	$Y=13.8Q^*-$ 0.256	0,996	$Y =12.34Q^*$ -0.53	0,997

L'exploitation de tous ces résultats qui sont récapitulés dans le tableau (3.3)

On constate que la majorité des toutes les mesures expérimentales tourne autour de la première bissectrice justifiant la fiabilité de l'expérimentation réalisée auprès du laboratoire LARHYSS de Biskra. Par conséquent on jugera d'exploiter ces deux approches expérimentales obtenues au dimensionnement des ouvrages annexes tel que les bassins d'amortissement.

Aussi le plus remarquable est que l'effet de réduction des profondeurs Y du ressaut hydraulique est très perceptible dans le lit mineur que le lit majeur. Par conséquent l'effet de réduction des hauteurs de la section composées est d'effet négatif.

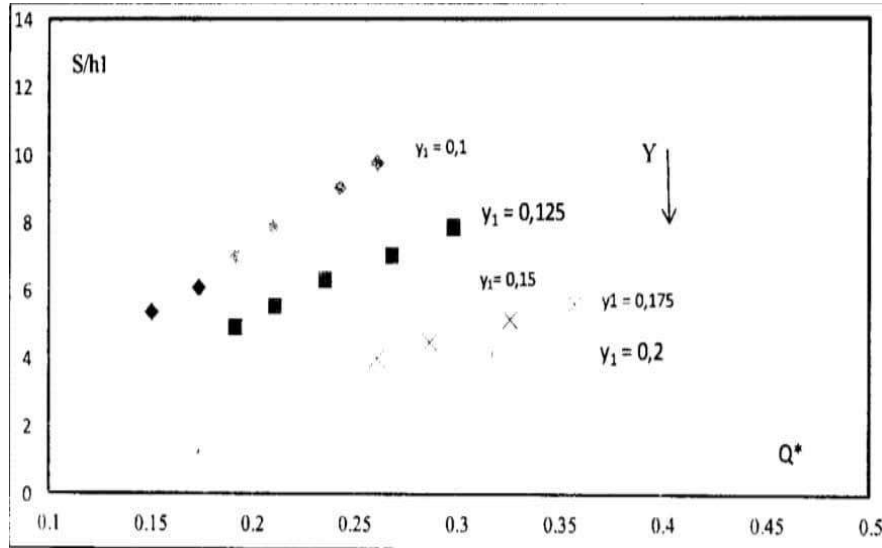
$$Y = 1,196*(h_1 / b)^{-1,52} Q^* -2.6392 \quad (3.1)$$

$$Y = 0.581(h_1 / B)^{-1,15} Q^* +20,28e^{-54,5(h_1/B)} \quad (3.2)$$

3.3. Hauteur relative $S = s / h_1$ du seuil en fonction du débit relatif Q^*

3.3.1 Premier cas($\beta = 1, b = B$)

La figure (3.7) montre lisiblement la représentation graphique de la variation de la hauteur relative $S = s / h_1$ du seuil en fonction du débit relatif Q^* du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal rectangulaire de forme composée du lit mineur pour cinq valeurs de y_1



Figure(3.7): Variation de la hauteur relative du seuil $S = s / h_1$ en fonction du débit relatif Q^* Pour cinq valeurs distinctes De y_1 . Les motifs colorés représentent les points de mesures expérimentales.

Cette figure montre que les points de mesures du ressaut contrôlé par seuil à paroi épais dans le lit mineur sont distincts, pour les cinq valeurs de y_1 . En outre, l'augmentation du débit relatif Q^* entraîne l'augmentation de la hauteur relative S du seuil. On constate que pour la même valeur de Q^* , $S = s / h_1$ augmente avec la diminution de y_1 . L'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut hydraulique en canal rectangulaire de forme composée, montre que pour chaque valeur de y_1 une courbe de type linéaire est possible de la forme $S = a_3 Q^* + b_3$ comme le montre bien la figure ci-dessous.

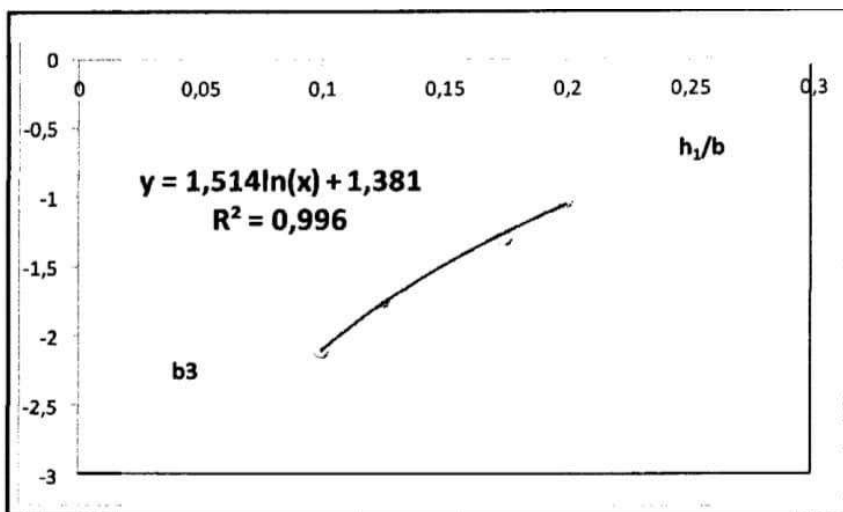


Figure (3.8): Variation du coefficient b_3 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

$S = a_3 Q^* + b_3$, le débit relatif Q^* la hauteur relative S du seuil et la hauteur relative amont:
 $S = 89.668e^{-13.07(h_1/b)} Q^* + 1.514 \ln(x) + 1.381$ avec $0, 1 \leq y \leq 0, 20$.

La figure (3.9) montre que la relation obtenue $S = f(Q^*, y_1)$ ajust de bonne corrélation de la les points de mesures expérimentaux. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice dans le lit mineur.

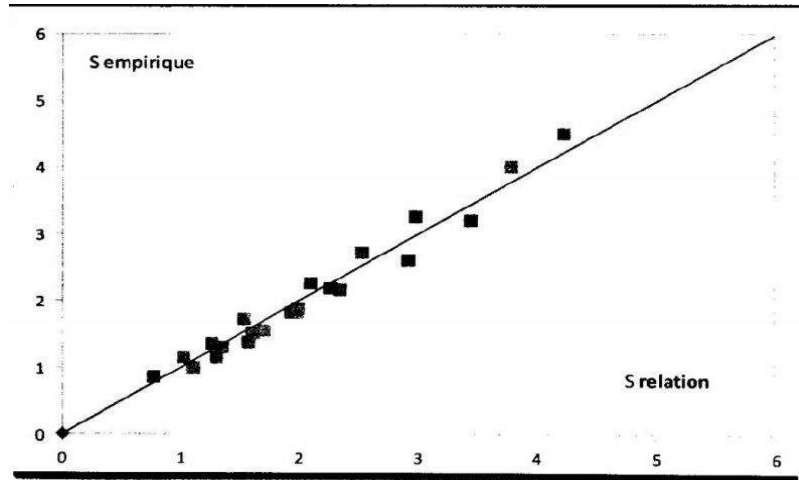


Figure (3.9): Variation de la hauteur relative S du seuil épais en fonction de $f(Q^*, y_1)$. (▪)
 Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée pour le lit mineur.

Première bissectrice d'équation :

$$S \text{ relation} = 89.668e^{-13.07(h_1/b)} Q^* + 1.514 \ln(h/b) + 1.381 \quad (3.3)$$

3.3.2 Deuxième cas ($\beta = b/B < 1$) ($b = 20\text{cm}, B = 60\text{cm}$)

La figure (3.10) illustre graphiquement la variation de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil en fonction du débit relatif Q du ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais en canal rectangulaire de forme composée dans le lit majeur pour cinq valeurs distincts de y_1 .

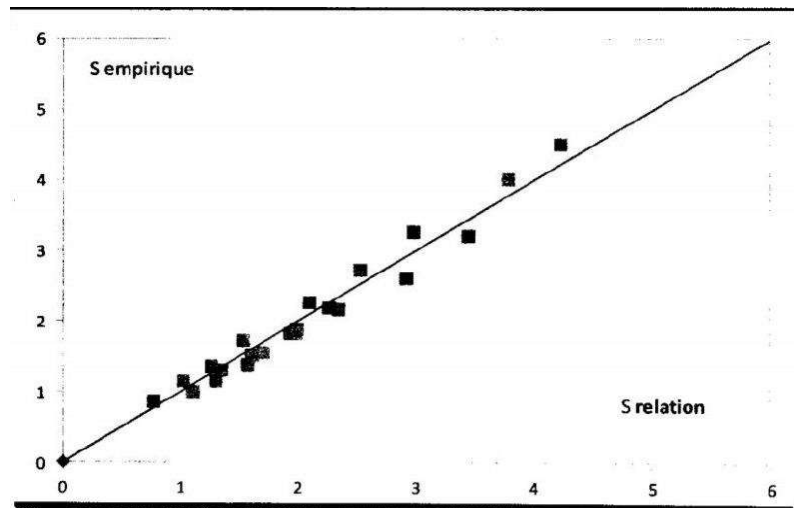


Figure (3.10): Ressaut contrôlé en canal rectangulaire de forme composée en lit majeur. Variation de la hauteur relative du seuil S épais en fonction du débit relatif Q^* , pour quatre valeurs différentes de y_1 : 0,033; 0,041; 0,05; 0,058 et 0,066. (-)

La figure ci-dessus montre que les mesures expérimentales obtenues du ressaut contrôlé. Par seuil à paroi épaisse dans le lit majeur présente cinq allures différentes, pour différentes ouvertures de y_1 . En outre, l'augmentation du débit relatif Q^* entraîne l'augmentation de la hauteur relative S du seuil. On remarque que pour la même valeur de Q^* , la valeur du seuil relative augmente avec la diminution de y_1 .

L'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut hydraulique indique clairement que pour chaque valeur de y_1 une courbe de type linéaire est de la forme $S=a_4Q^*+b_4$ comme le montre la figure (3.10).

Les résultats obtenus de l'ajustement sont mentionnées dans le tableau ci-dessous

Le tableau (3.4) regroupe les valeurs des coefficients a_4 et b_4 .

h_1 (cm)	$y_1 = h_1 / B$	a_4	b_4	Equation d'ajustement	R^2
2	0.033	53.63	-9.73	$S = 53.63Q^* - 9.73$	0,997
2.5	0.041	44.62	-10.5	$S = 44.62 Q^* - 10.5$	0,991
3	0.050	29.62	-7.146	$S = 29.62Q^* - 7.146$	0,995
3.5	0.058	26.36	-7.703	$S = 26.36Q^* - 7.703$	0,998
4	0.066	19.09	-5.613	$S = 19.09Q^* - 5.613$	0,996

L'ajustement statistique des couples de valeurs (a_4, y_1) et (b_4, y_1) par la méthode des moindres carrés donne deux relations successivement de type linéaire et polynomiale comme le montre les figures (3.11) et (3.12):

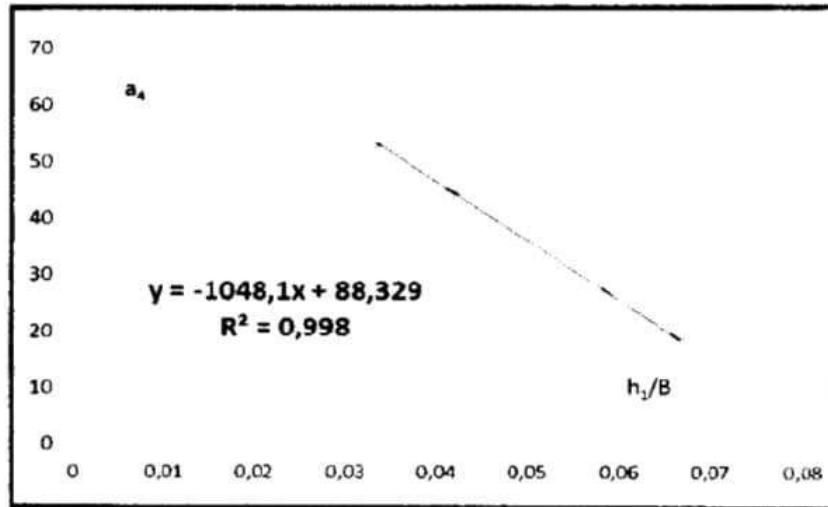


Figure (3.11): Variation du coefficient a_4 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

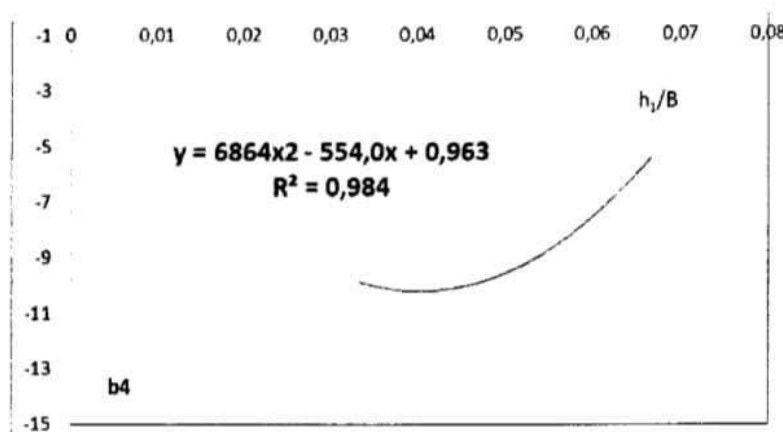


Figure (3.12): Variation du coefficient b_4 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

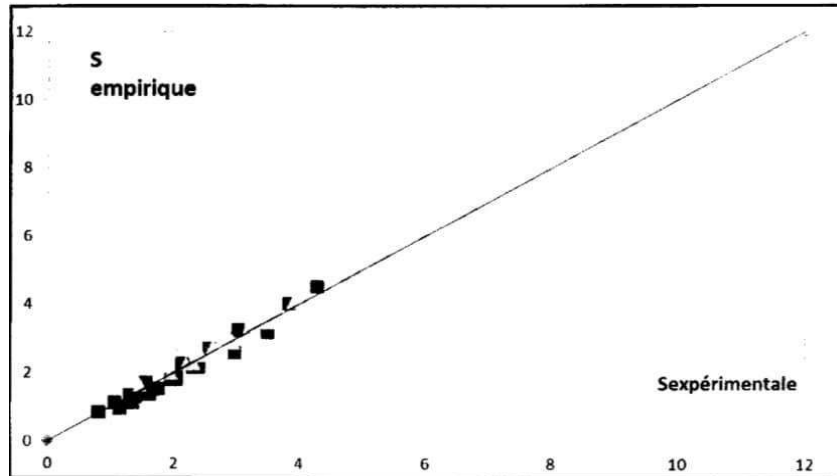
L'ajustement des couples de valeurs b_4 et y_1 par les méthodes de moindres carrés donne l'expression suivante:

$$b_4 = 6864(h_1/B)^2 - 554(h_1/B) - 0.963$$

En effet, en remplaçant les coefficients de a_4 et b_4 par leurs expressions dans la relation liant le débit relatif Q^* , la hauteur relative S du seuil et la hauteur relative amont y_1 devient:

S relation= $(-1048.1.(h_1/B)+88.329)Q^*+6864(h_1/B)^2-554(b/B)+0.963$, Avec $0,033 \leq y \leq 0,066$.

La figure (3.13) indique que la relation trouvée $S=f(Q^*, y_1)$ ajuste avec une très bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces points suivent en majorités la première bissectrice ce qui par conséquent explique la fiabilité des mesures obtenues au laboratoire.



Figure(3.13): Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction de $f(Q^*, y_1)$.

Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé par seuil épais en canal rectangulaire de section composée du lit majeur. Première bissectrice d'équation: (—)

$$S \text{ relation} = (-1048.1 \cdot (h_1/B) + 88.329)Q^* + 6864(h_1/B)^2 - 554(h_1/B) + 0.963 \quad (3.4)$$

3.3.3. Hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil en fonction du débit relatif Q^*

La représentation graphique des points expérimentaux dans la figure (3.14) montre la variation du rapport du seuil relatif $S = s/h_1$ du ressaut hydraulique en fonction du débit relatif Q^* , pour les cinq ouvertures dans la section composée du lit mineur et celui majeur successivement $y_1: 0.1; 0.125; 0.150; 0.175; 0.2$ et $0.033; 0.041; 0.050; 0.058; 0.066$.

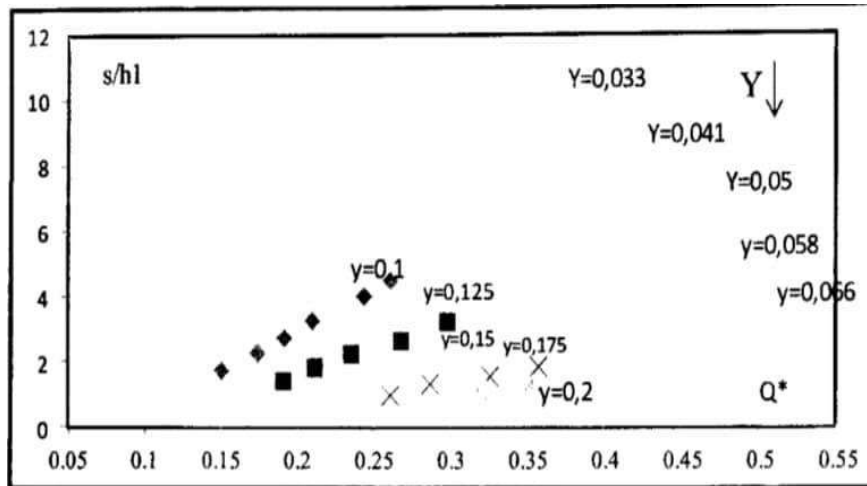


Figure (3.14): Variation du rapport du seuil relatif épais $S = s/h_1$ en fonction du débit relatif Q^* . Les motifs colorés différents représentent les points de mesures expérimentales pour les cinq valeurs de y_1 : 0,1; 0,125; 0,15; 0,175; 0,2 et 0,033; 0,041; 0,05; 0,058; 0,066.

Respectivement pour le lit mineur et le lit majeur.

En premier lieu on constate que l'augmentation du seuil relatif S entraîne celle du débit relatif Q^* et que l'influence de la hauteur amont h_1 est perceptible dans la section composée.

La figure ci-dessus montre que pour le même nombre de débit relatif Q^* , S diminue avec l'augmentation de y_1 pour les deux lits. En second lieu La figure (3.14) indique cinq allures, correspondant chacune à une valeur bien déterminée de y_1 pour les deux lits. Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés du ressaut contrôlé dans le canal rectangulaire de forme composée.

L'analyse des points de mesures expérimentales, montre que pour chaque valeur de y_1 , un ajustement de type linéaire est très possible de la forme: $Y = AQ^* + B$, pour le lit mineur et le lit majeur.

Les résultats des ajustements obtenus sont mentionnés dans le tableau (3.5).

Le tableau (3.5) regroupe les valeurs des coefficients de a_3 , b_3 , a_4 et b_4 .

h_1 (cm)	$y_1 = h_1 / b$	$y_1 = h_1 / B$	a_3	b_3	a_4	b_4	Equation d'ajustement	R^2	Equation d'ajustement	R^2
2	0.1	0.0333	25.26	- 2.113	53.63	-9.73	$Y=25.26 \times -2.113$	0,998	$Y = 53.63Q^* - 9.73$	0,997
2.5	0.125	0.0410	16.45	- 1.748	44.62	-10.5	$Y=16.45 \times -1.748$	0,993	$Y = 44.62Q^* - 10.5$	0,997
3	0.15	0.0500	13.05	- 1.756	29.62	- 7.146	$Y=13.05 \times -1.756$	0,992	$Y = 29.62Q^* - 7.146$	0,995
3.5	0.175	0.0583	8.796	- 1.296	26.36	- 7.703	$Y=8.796 \times -1.296$	0,988	$Y = 26.36Q^* - 7.703$	0,998
4	0.20	0.0660	6.747	- 1.033	19.09	- 5.613	$Y=6.747 \times -1.033$	0,998	$Y = 19.09Q^* - 5.613$	0,996

Tableau (3.5): récapitulation des résultats expérimentaux des seuils relatifs S en fonction du débit relatif Q^* pour chaque ouverture y_1 dans le lit mineur et celui majeur.

Ce tableau récapitule tous les résultats des expérimental obtenus pour le lit mineur et celui majeur.

La figure (3.15) montre que la majorité de toutes les mesures expérimentales tourne autour de la première bissectrice pour la section composée justifiant la fiabilité des mesures expérimentales obtenues au laboratoire LARHYSS de Biskra, Par conséquent on pourrait utiliser ces deux approches expérimentales adimensionnelles à caractères générales obtenues au dimensionnement des ouvrages hydraulique.

3.3.4. CONCLUSION

On constate que d'après la première bissectrice de tout les mesure expérimental contrôle et la formation du ressaut hydraulique par seuil a paroi épaisse se réduire facilement de le lit mineur que celui le lit majeur ce qui en final la dissipation rapide de l'énergie cinétique.

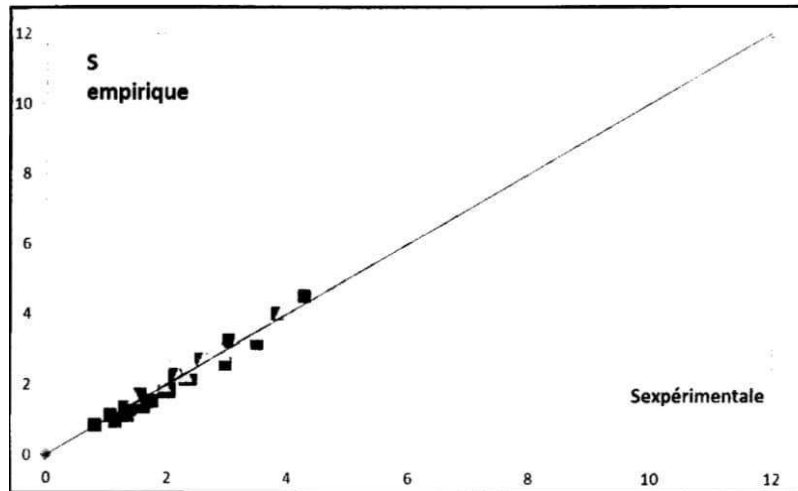


Figure (3.15): Variation du seuil épais relatif expérimentale $S = s / h_1$ en fonction des relations globales obtenues $S = (y_1, Q^*)$. (,) Points des mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée.

$$S \text{ relations} = 89.668e^{-13.07(h_1/b)} Q^* + 1.514 \ln(x) + 1.381 \quad (3.5)$$

Et l'équation globale dans le lit majeur

$$S \text{ relation} = (-1048.1 \cdot (h_1/B) + 88.329) Q^* + 6864(h_1/B)^2 - 554(h_1/B) + 0.963 \quad (3.6)$$

3. 4. Longueur relative L_j / h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^*

3.4.1 Premier cas ($\beta = 1, b = B$)

La figure (3.16) montre la représentation graphique de la variation de la longueur relative du ressaut hydraulique en fonction du débit relatif Q^* du ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais en canal rectangulaire de forme composée pour quatre valeurs de y_1 .

Cette figure montre que les points de mesures du ressaut contrôlé par seuil à paroi épais sont distincts, pour les cinq valeurs de y_1 . En outre, l'augmentation du débit relatif Q^* entraîne l'augmentation de la longueur relative L_j / h_1 du ressaut hydraulique. On constate également que pour une même valeur de Q^* , L_j / h_1 augmente avec la diminution de y_1 . L'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de forme composée, montre que pour chaque valeur de y_1 une courbe de type linéaire est possible de la forme $L_j / h_1 = a_5 Q^* + b_5$ comme le montre bien la figure dessous.

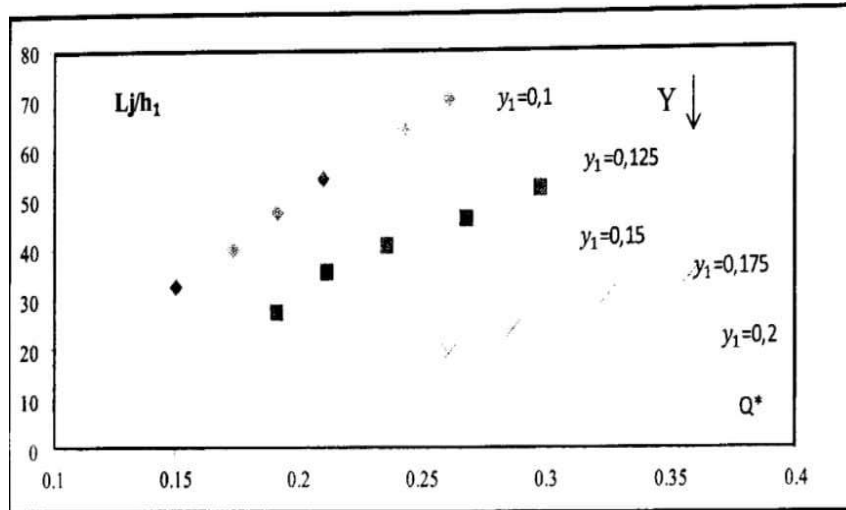


Figure (3.16): Variation de la longueur relative L_j / h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 .

Le **tableau (3.6)** regroupe les valeurs des coefficients a_5 et b_5 .

$h_1(\text{cm})$	$y_1 = h_1 / B$	a_5	b_5	R^2
2	0.1	338.8	-18.14	0,997
2.5	0.125	219.1	-12.67	0,971
3	0.15	216	-27.32	0,983
3.5	0.175	160.2	-22.47	0,989
4	0.20	134.9	-20.66	0,998

Le tableau (3.6) montre clairement que le coefficient a_5 diminue progressivement avec l'augmentation de la hauteur relative amont y_1 . L'ajustement statistique des couples de valeurs (a_5, y_1) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type puissance :

$$a_5 = 18.21 (h_1 / h)^{-1,25} \text{ avec } R^2 = 0,949.$$

Celle-ci est schématisée par la figure ci-dessous

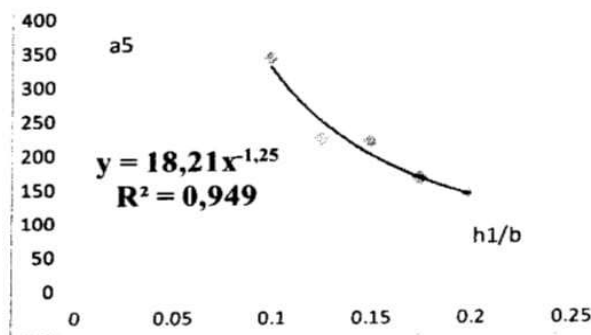


Figure (3.17): Variation du coefficient a_5 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

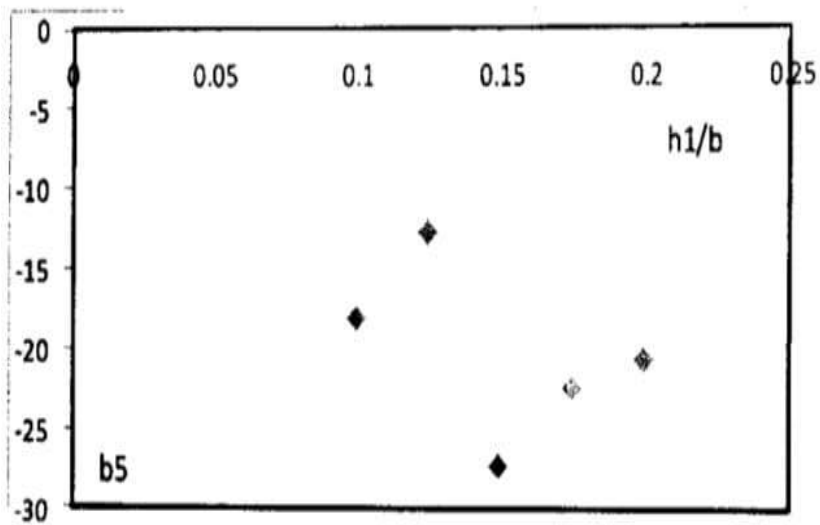


Figure (3.18): Variation du coefficient b_5 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

D'après les figure ci-dessus on consulte répartition aléatoire des coefficient b_5 , la coefficient b_5 ou varié par la fonction de y_1 . La coefficient b_5 prend le moyenne b_5

$$b_5 = (-18.14 + 12.67 + 27.32 + 22.47 + 20.66) / 5 = -20.252$$

En effet, en remplaçant les coefficients de a_5 et b_5 par leurs expressions dans la relation

$Lj/h_1 = a_5 Q^* + b_5$, avec $a_5 = 18.21 (h_1 / b)^{-1.25}$, $b_5 = -20.252$ le débit relatif Q^* , la longueur relative Lj/h_1 du ressaut et la hauteur relative amont y_1 devient :

$$Lj/h_1 = 18.21 (h_1 / b)^{-1.25} Q^* - 20.252, \text{ avec } 0.1 < y_1 < 0.2$$

La figure (3.19) montre également que la relation trouvée $Lj/h_1 = (Q^*, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice. Ainsi la relation globale obtenue est justifiée.

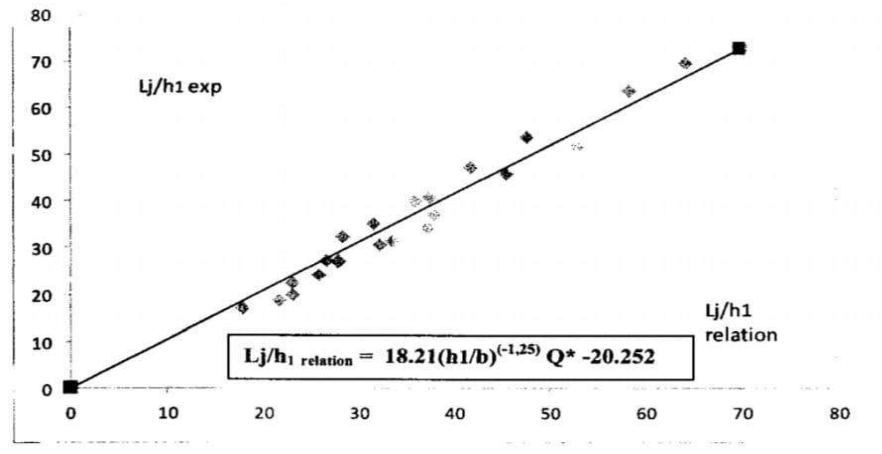


Figure (3.19): Variation de la longueur relative L_j / h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$. (●) Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée.

(—) Première bissectrice d'équation $L_j / h_1 \text{ relation} = 18.21 (h_1 / b)^{-1.25} Q^* - 20.252$

3.4.2 Deuxième cas ($\beta = b/B < 1$)

La figure (V.20) montre la représentation graphique de la variation de la longueur relative du ressaut hydraulique en fonction du débit relatif Q^* du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal rectangulaire de forme composée pour cinq valeurs de y_1 .

Cette figure montre que les points de mesures du ressaut contrôlé par seuil à paroi épais sont distincts, pour les quatre valeurs de y_1 . En outre, l'augmentation du débit relatif Q^* entraîne l'augmentation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut hydraulique. On constate aussi que pour une même valeur de Q^* , L_j/h_1 augmente avec la diminution de y_1 . L'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de forme composée, montre que pour chaque valeur de y_1 une courbe de type linéaire est possible de la forme $L_j/h_1 = a_6 Q^* + b_6$ comme le montre bien la figure dessous.

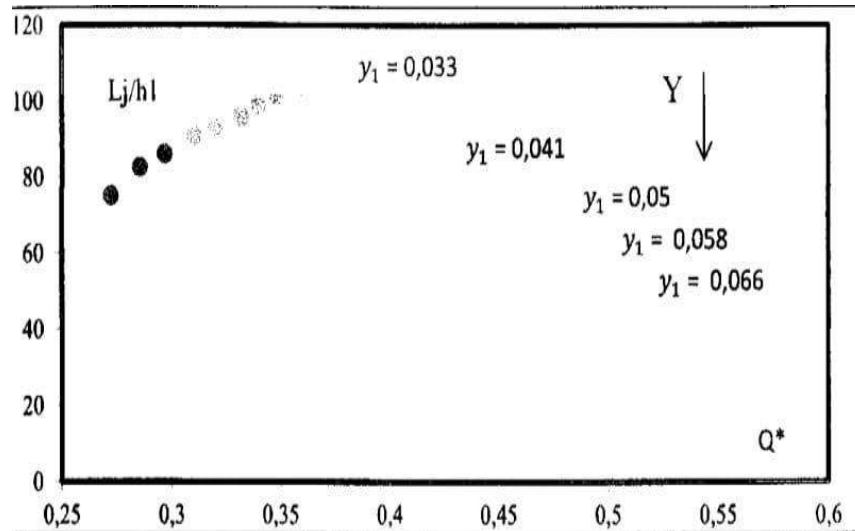


Figure (3.20): Variation de la longueur relative L_j / h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour le lit majeur Pour cinq valeurs distinctes de y_1 . Les motifs coloré représentent les points expérimentaux.

Le tableau (3.7) récapitulation des valeur de a_6 et b_6 .

h_1 (cm)	$y_1 = h_1 / B$	a_6	b_6	R^2
2	0.0333	315.6	-8.529	0,988
2.5	0.0410	240.6	-16.13	0,989
3	0.0500	177	-12.05	0,988
3.5	0.0583	178.8	-26.83	0,996
4	0.0660	139.3	-20.54	0,992

Le tableau montre clairement que le coefficient a_6 diminue progressivement avec l'augmentation de la hauteur relative amont y_1 . L'ajustement statistique des couples de valeurs (a_6, y_1) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type puissance :

$$a_6 = 7.045 (h_1 / B) - 1.11 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0,985$$

Celle-ci est schématisée par la figure ci-dessous

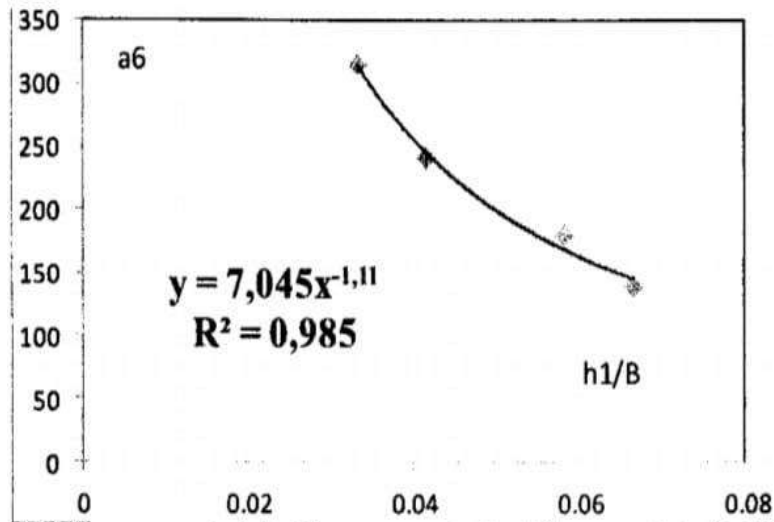


Figure (3.21): Variation du coefficient a_6 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

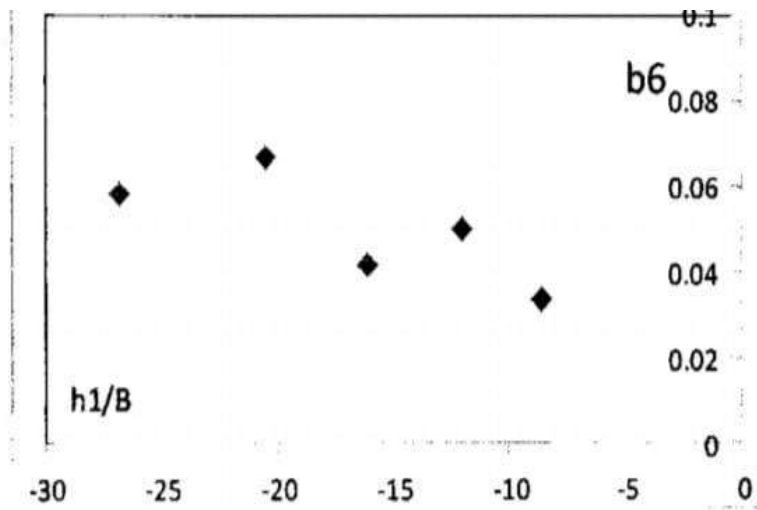


Figure (3.22): Variation du coefficient b_6 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

Pour la valeur de b_6 elle ne varie pas en fonction de y_1 , ainsi elle prend une valeur moyenne de $b_6 = -(8.529 + 16.13 + 12.05 + 26.83 + 20.54) / 5 = -16.8158$

En effet, en remplaçant les coefficients de a_6 et b_6 par leurs expressions dans la relation $L_j / h_1 = a_6 Q^* + b_6$, avec $a_6 = 7.045 * (h_1 / B)^{-1.11}$, $b_6 = -16.8158$, le débit relatif Q^* , la longueur relative L_j / h_1 du ressaut et la hauteur relative amont y_1 devient: $L_j / h_1 = 7.045 * (h_1 / B)^{-1.11} Q^* - 16.8158$ avec $0.033 < y_1 < 0.066$

La figure (3.23) montre également que la relation trouvée $L_j / h_1 = (Q^*, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice.

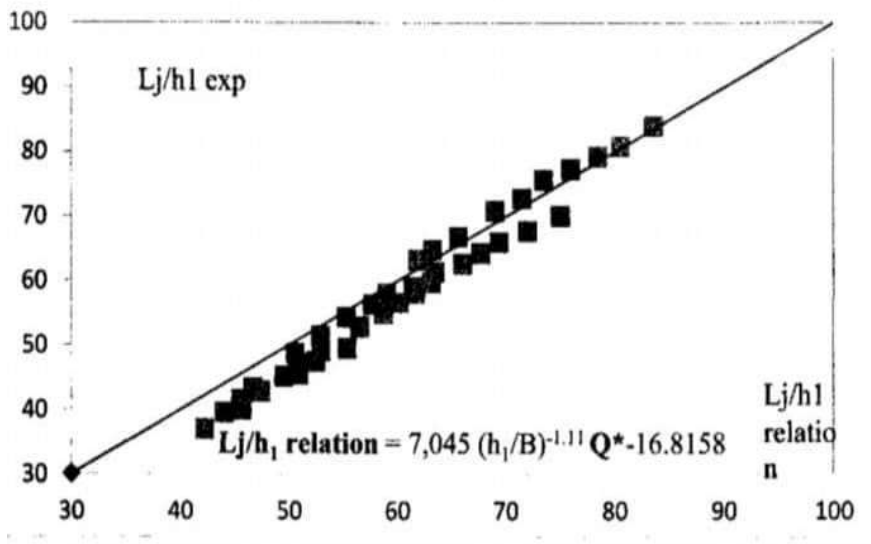


Figure (3.23): Variation de la longueur relative L_j / h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$. (■) Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé par seuil épais en canal rectangulaire de section composée.

(-) Première bissectrice d'équation : $L_j / h_1 \text{ relation} = 7,045 (h_1/B)^{-1.11} Q^* - 16.8158$

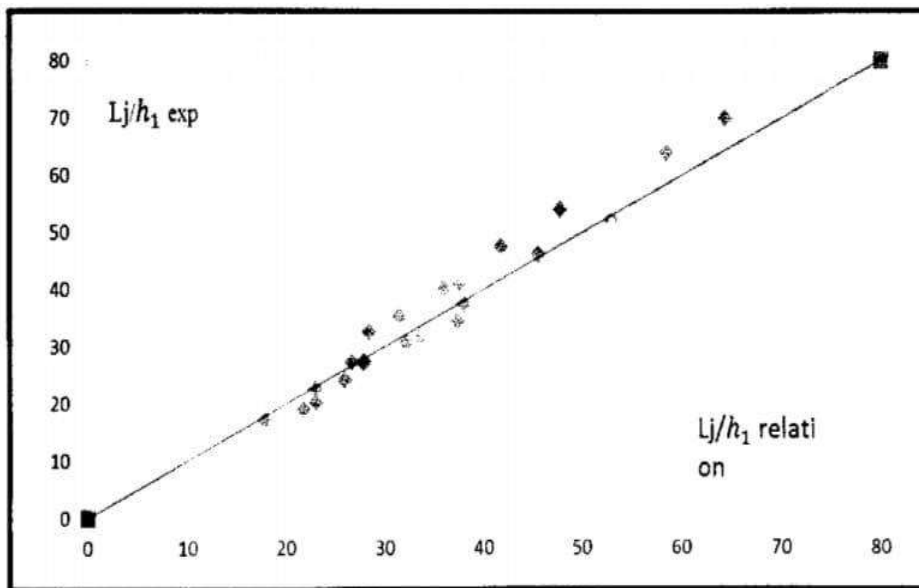


Figure (3.24): Variation du seuil épais relatif expérimentale $L_j = l_j / h_1$ en fonction des relations globales obtenues $L_j = f(y_1, Q^*)$. (,) Points des mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée.

3.5. Longueur relative L_r / h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^*

3.5.1 Premier cas ($\beta = 1$, $b = B$) section rectangulaire

La figure (3.25) présente la représentation graphique de l'évolution de la longueur relative du rouleau de surface et du débit relatif Q^* du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil épais dans un canal rectangulaire de forme composée, pour cinq valeurs différentes de la profondeur initiale y_1 .

La figure illustre que les points de mesure du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi épaisse sont bien distincts pour chacune des cinq valeurs de y_1 . De plus, on observe qu'une augmentation du débit relatif Q^* entraîne une augmentation de la longueur relative L_r/h_L du ressaut. Il est également constaté que, pour une même valeur de Q^* , la longueur relative L_r/h_L augmente lorsque y_1 diminue. L'analyse des données expérimentales du ressaut dans un canal rectangulaire de forme composée révèle que, pour chaque valeur de y_1 , une relation linéaire du type $L_r/h_1 = a_7 Q^* + b_7$ peut être établie, comme le montre clairement la figure ci-dessous.

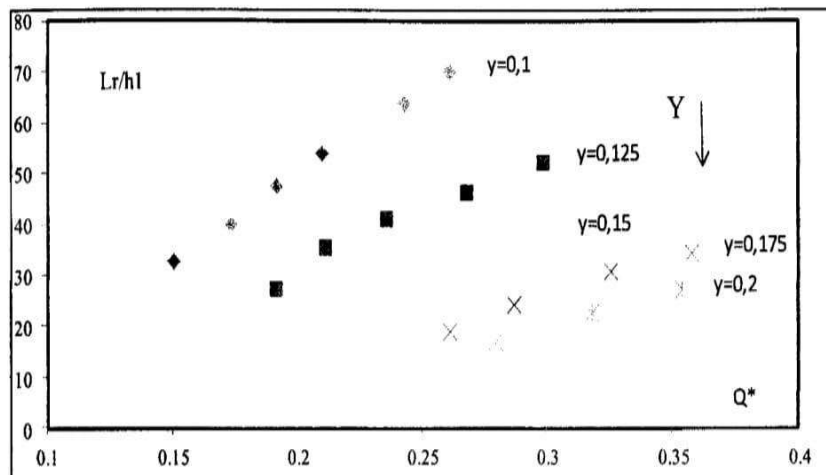


Figure (3.25): Variation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 .

Le tableau (3.8) regroupe les valeurs des coefficients a_7 et b_7 .

h_1 (cm)	$y_1 = h_1 / B$	a_7	b_7	R^2
2	0.1	251.1	-19.44	0,998
2.5	0.125	168.3	-12.84	0,970
3	0.15	165.1	-23.34	0,994
3.5	0.175	125.6	20.94	0,998
4	0.20	104.6	-18.63	0,994

Le tableau (3.8) montre clairement que le coefficient a_7 diminue progressivement avec l'augmentation de la hauteur relative amont y_1 . L'ajustement statistique des couples de valeurs (a_7, y_1) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type puissance: $a_7 = 14,08x^{-1,25}$ avec $R^2 = 0,948$

Celle-ci est schématisée par la figure ci-dessous

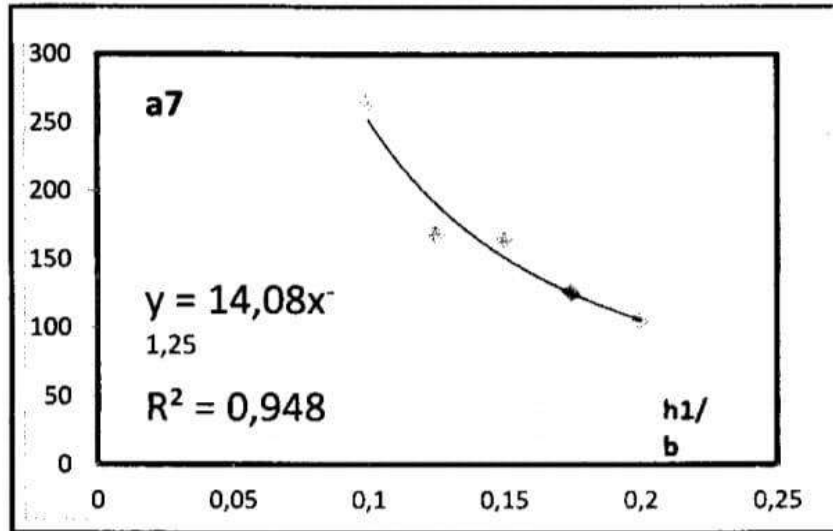


Figure (3.26): Variation du coefficient a_7 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

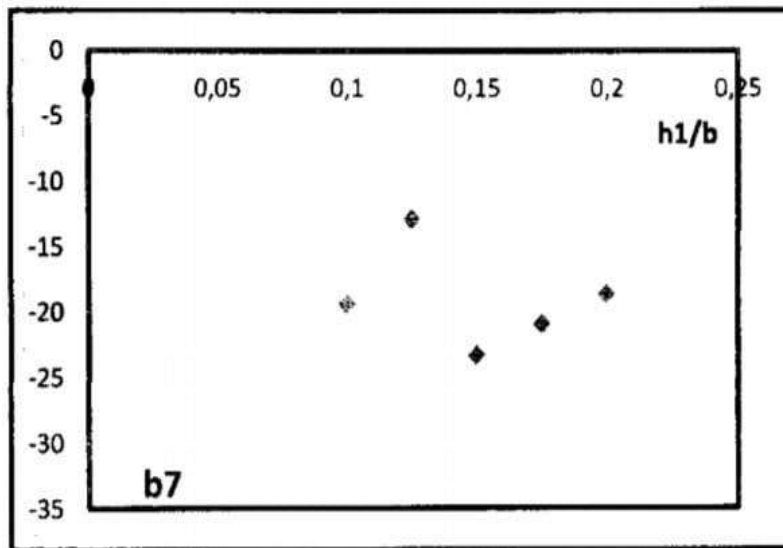


Figure (3.27): Variation du coefficient b_7 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

Pour la valeur de b_7 on remarque qu'elle ne varie pas en fonction de y_1 , ainsi elle prend la valeur moyenne $b_7 = (- (19,44 + 12,87 + 20,94 + 18,63 + 23,34)) / 5 = -19.044$

En effet, en remplaçant les coefficients de a_6 et b_6 par leurs expressions dans la relation $Lr / h_1 = a_7 Q^* + b_7$, avec $a_7 = 14,08(h_1 / b) - 1,25$. $b_7 = -19.044$, le débit relatif Q^* . la longueur

relative du rouleau de surface L_r / h_1 du ressaut et la hauteur relative amont y_1 devient: $L_r/h_1 = 14,8 (h_1 / b) - 1,25 Q^* - 19,044$, avec $0,1 < y_1 < 0,2$

La figure (3.28) montre que la relation trouvée $L_r/h_1 = f(Q^*, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures. Ces points tournent en totalité autour de la première bissectrice ce qui justifie l'applicabilité de la relation globale obtenue au dimensionnement du bassin d'amortisseur.

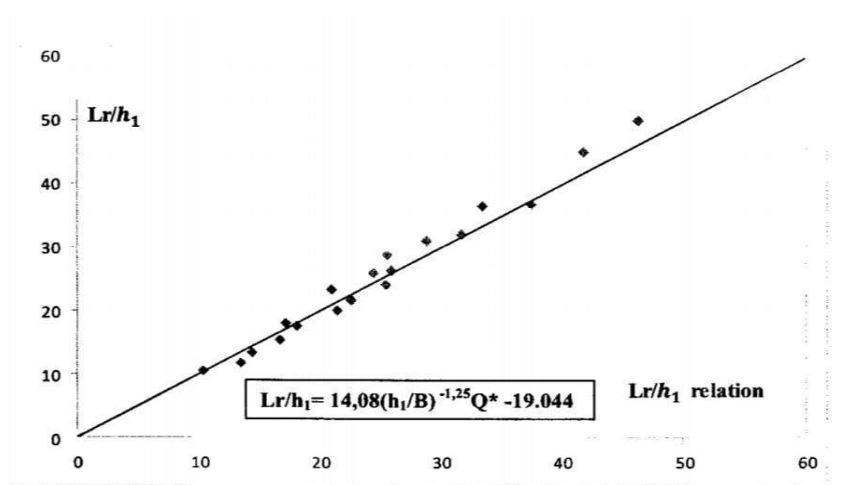


Figure (3.28): Variation de la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$ () Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé par seuil épais en canal rectangulaire de section composée.

(-) Première bissectrice d'équation: $L_r/h_1 = 14,08(h_1/b_1) - 1,25Q^* - 19,04$

3.5.2 Deuxième cas ($\beta = b/B < 1$) (canal rectangulaire de section composée)

La figure (3.29) illustre la variation de la longueur relative du rouleau de surface en fonction du débit relatif Q^* pour un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil épais, dans un canal rectangulaire de forme composée, et ce, pour cinq valeurs différentes de y_1 . On y observe que les points de mesure correspondant aux différentes valeurs de y_1 sont bien distincts. Par ailleurs, l'augmentation du débit relatif Q^* s'accompagne d'une augmentation de la longueur relative L_j / h_1 du ressaut. Il est aussi noté que, pour une même valeur de Q^* , la longueur relative L_r / h_1 croît lorsque y_1 diminue. L'analyse des résultats expérimentaux indique qu'il est possible d'ajuster, pour chaque valeur de y_1 , une courbe linéaire de la forme $L_r / h_1 = a_8 Q^* + b_8$, comme l'illustre clairement la figure.

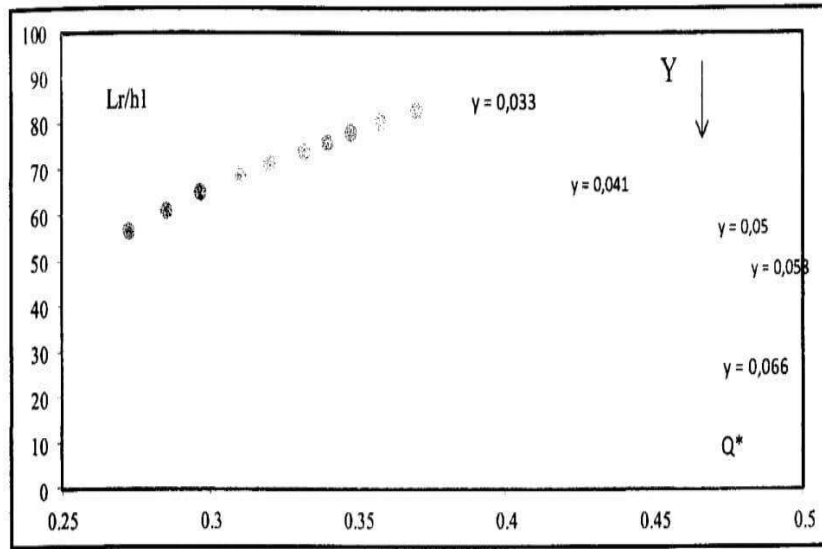


Figure (3.29): Variation de la longueur relative Lr/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 .

Le tableau (3.9) regroupe les valeurs des coefficients a_8 et b_8 .

h_1 (cm)	$y_1 = h_1 / B$	a_6	b_6	R^2
2	0.0333	266.8	-14.82	0,992
2.5	0.0410	204.3	-21.33	0,989
3	0.0500	153.5	-16.54	0,989
3.5	0.0583	146.5	-27.27	0,999
4	0.0660	111.6	-20.60	0,994

Le tableau (3.9) montre clairement que le coefficient a_7 diminue progressivement avec l'augmentation de la hauteur relative amont y_1 . L'ajustement statistique des couples de valeurs (a_8, y_1) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type puissance:

$$a_8 = 4,409 (h_1 / b)^{-1,20} \text{ avec } R^2 = 0,975$$

Celle-ci est schématisée par la figure ci-dessous

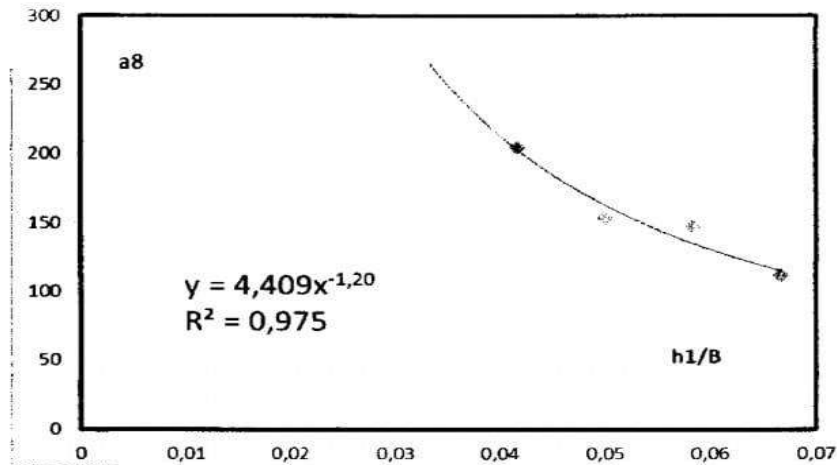


Figure (3.30): Variation du coefficient a_8 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

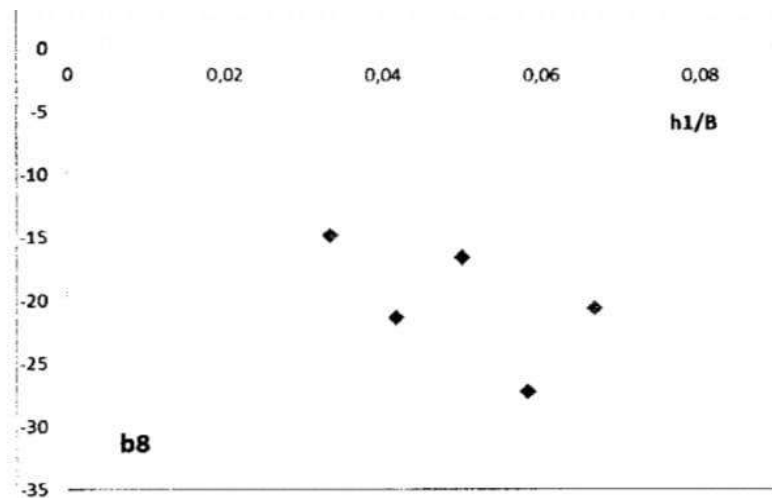


Figure (3.31): Variation du coefficient b_8 en fonction de la hauteur relative amont y_1 Pour la valeur de b_8 elle ne varie pas en fonction de y_1 , ainsi elle prend une valeur moyenne de $b_8 = -$

$$(14, 82 + 21, 33 + 16, 54 + 27, 27 + 20, 6) / 5 = - 20.112$$

Pour la valeur de b_8 elle varie aussi en fonction de y_1 , l'ajustement par la méthode des moindres carrés est de type linéaire entre a_7 et de la hauteur relative amont h_1/B . La figure ci-dessous montre cette variation du couple $(b_8, h_1/B)$.

En effet, en remplaçant les coefficients de a_8 et b_8 par leurs expressions dans la relation $Lr / h_1 = a_8 Q^* + b_8$, avec $a_8 = 4,409(h_1 / B)^{-1,20}$, $b_8 = - 20.112$ le débit relatif Q^* , la longueur relative du rouleau de surface Lr/h_1 du ressaut et la hauteur relative amont y_1 devient:

$$Lr / h_1 = 4,409(h_1/B)^{-1,20} Q^* - 20.112 \text{ avec } 33 < y_1 < 66$$

- ✓ Pour $\beta = b / B = 1$ S relation = $89,66e^{-13,0(h/b)} Q^* + 1.514 \ln (h_1 / b) + 1.381$ avec $0, 1 \leq y_1 \leq 0, 2$

- Lit majeur
- ✓ Pour $\beta = b / B < 1$, S relation = $(-1048.1(h_1/B)+88.329)Q^*+6864(h_1/B)^2-554(h_1/B)+0.963$ Avec $0,0335 \leq y_1 \leq 0,066$

C/ le rapport de la longueur relatif du ressaut L_j/h_1 en fonction du débit relatif Q^* , deux cas ont été entamés:

- Lit mineur
- ✓ Pour $\beta = b / B = 1$, L_j / h_1 relation = $18.21 * (h_1 / B)^{(-1,25)} Q^* - 20.252$, Avec $0,10 < y_1 < 0,20$.
- Lit majeur
- ✓ Pour $\beta = b / B < 1$ L_j/h_1 relation = $7,045 (h_1/B)^{-1.11} Q^* - 16.8158$, Avec $0,033 < y_1 < 0,066$

D/ le rapport de la longueur relatif du rouleau de surface L_r/h_1 en fonction du débit relatif Q^* , deux cas ont été traités:

- Lit mineur
- ✓ Pour $\beta = b / B = 1$ L_r/h_1 relation = $14,08(h_1/B)^{-1,25} Q^* - 19.044$. avec $0,10 < y_1 < 0,20$.
- Lit majeur
- ✓ Pour $\beta = b / B < 1$ L_r/h_1 relation = $4,409(h_1/B)^{-1.2} Q^* - 20.112$ avec $0,033 \leq y_1 \leq 0,066$.

Deuxième partie

Etude expérimental

Chapitre 4 :
Dispositif
expérimental et
instrumentation

4.1 INTRODUCTION

Avant d'aborder l'étude expérimentale, nous allons exposer une description détaillée du modèle expérimental, et faire la description des essais des différents appareillages des mesures utilisées.

4.2 Description du canal :

Les expériences ont été conduites dans un canal à surface libre représenté sur la (fig.3.1) et la (photo.3.2), Il s'agit d'un canal de 12 m de longueur, ayant une hauteur de 0,6m, et des parois latérales en verre. Il est constitué d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure par une conduite circulaire en PVC d'un diamètre de 115 mm. L'ensemble fonctionne en circuit fermé. L'écoulement est assuré par une pompe (photo.3.3) qui alimente un convergent en charge (permettant de générer un écoulement à grande vitesse) (photo.3.4), débouchant dans le canal de mesure. On dispose ici d'un canal horizontal de section rectangulaire composée, de longueur 5 m et de hauteur $h_0 = 20$ cm et la largeur de lit mineur $b = 20$ cm de lit majeur $B = 60$ cm.

Il est relié à sa partie aval à un second canal de section droite rectangulaire dont le fond présente une pente nulle. Un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle est inséré avec contraction latérale dans le circuit d'écoulement (photo.3.5), permettant la mesure du débit.

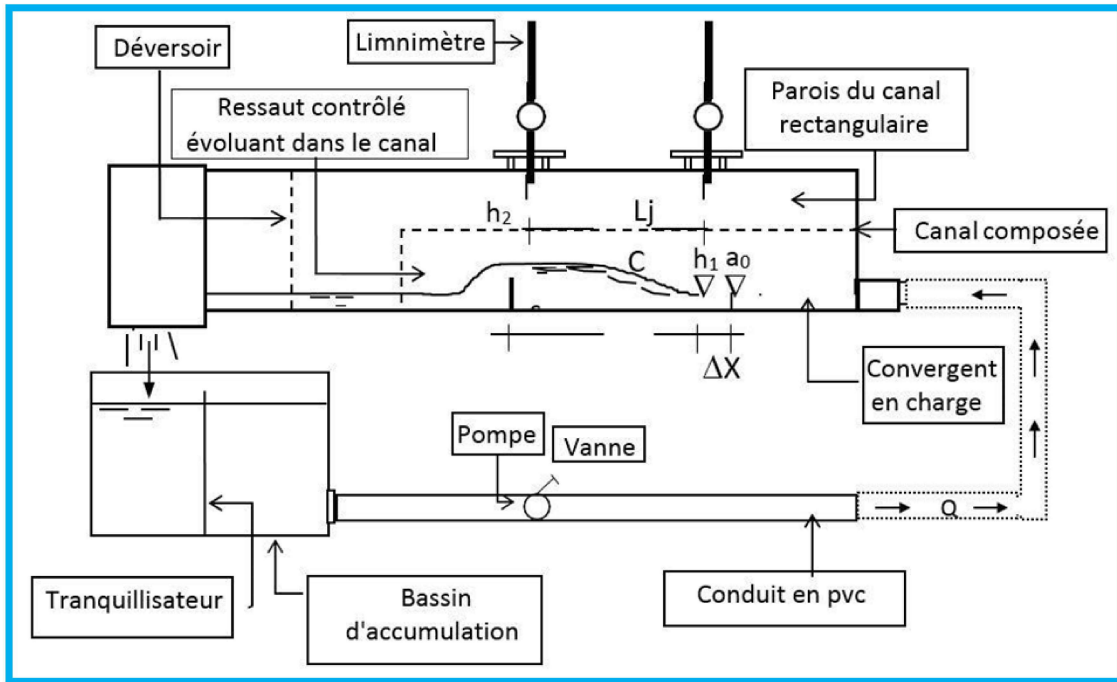


Fig. 4.1 : Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composé



Photo. 4.1 : Photographie du modèle expérimental du canal



Photo. 4.2 : Pompe centrifuge axiale



Photo.4.3: Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit



Photo. 4.4 : Photographie d'une boîte en charge

4.3 Les seuils à paroi épaisse :

Les seuils utilisés dans notre dispositif expérimental, sont façonnées de fer en forme rectangulaire de longueur 20 cm de différentes hauteurs (photo.4.5) . Dans le but d'obtenir un nombre important de points de mesures :

$s = 3.4 \text{ cm} ; 4.5 \text{ cm} ; 5.4 \text{ cm} ; 6.5 \text{ cm} ; 8 \text{ cm} ; 9 \text{ cm} ; 10.1 \text{ cm} ; 10.9 \text{ cm} ; 12.1 \text{ cm} ; 13.9 \text{ cm} ; 15 \text{ cm} ; 16.2 \text{ cm} ; 17 \text{ cm} ; 17.9 \text{ cm} ; 18.9 \text{ cm}$ et 20,3



Photo 4.5 : Photographie des seuils épais testés



Photo. 4.6 : Photographie de support du seuil.



Photo.4.7 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit

4.4. Procédure de mesure des débits :

En ce qui concerne les mesures des débits Q , nous avons utilisé le débit mètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de Hachemi Rachedi . (2006).

En effet, lors du passage du débit Q à travers les deux parois du débitmètre, la hauteur h de v 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 entrant la hauteur h dans l'équation (3.1) du déversoir.

$$Q = 0.3794B\sqrt{2g\beta}(1 + 0.16496.\beta^{(2.0716)})^{32}h_{dey}^{\frac{3}{2}}$$

Q : Le débit spécifique en (m³/s).

$\beta = b/B$: paramètre géométrique . $\beta = b/B=0.4$

b : Largeur de l'échancrure (m) . $b=0,24$ cm. B : la largeur du canal (m). $B=0,6$ m.

H de v : hauteur de la lame déversant en (m).

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

4.5. Limnimétrie :

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à l'ouverture due à la section de sortie du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été évaluées par un limnimètre. L'instrument est formé d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnométrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau (fig.3.2).

La lecture sur le limnimètre s'effectue en deux étapes : on procède d'abord à la lecture de la graduation sur la règle, située immédiatement en haut de zéro du vernier, puis on effectue la lecture du nombre de cinquantième en face de la division qui coïncide ou qui est la plus rapprochée d'une division de la règle.

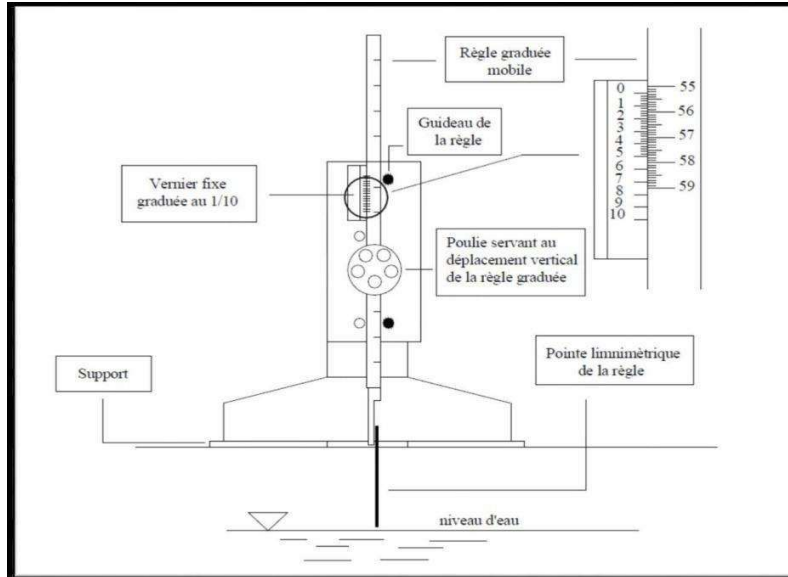


Fig.4.2 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.

4.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré les différents instruments qui nous a permis de réaliser l'expérimentation et présenté la procédure d'utilisation de chaque appareil de mesure. La mesure de débit a été effectuée à l'aide d'un déversoir rectangulaire sans hauteur de lame avec contraction latérale Hachemi Rachdi. (2006).

Chapitre 5 :
Etude
Expérimentale

5.1. INTRODUCTION

Cette étude porte sur la variation des hauteurs amont et aval du ressaut hydraulique forcé de type A, généré par un seuil épais dans un canal rectangulaire. Les expérimentations ont été réalisées pour cinq hauteurs initiales h_1 : 2, 2,5, 3, 3,5 et 4 cm. Cela a permis d'obtenir une plage pratique du nombre de Froude incident, comprise entre 3 et 13.

5.2 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, noté Y , est défini comme le rapport entre la hauteur d'eau en aval du ressaut hydraulique h_2 et la hauteur initiale en amont h_1 , soit $Y=h_2/h_1$. Les courbes expérimentales présentées dans les figures 5.1 à 5.2 illustrent de manière claire l'évolution de ce rapport Y en fonction du nombre de Froude incident F_1 , pour les cinq hauteurs initiales considérées : 2, 2,5, 3, 3,5 et 4 cm.

Pour le lit mineur

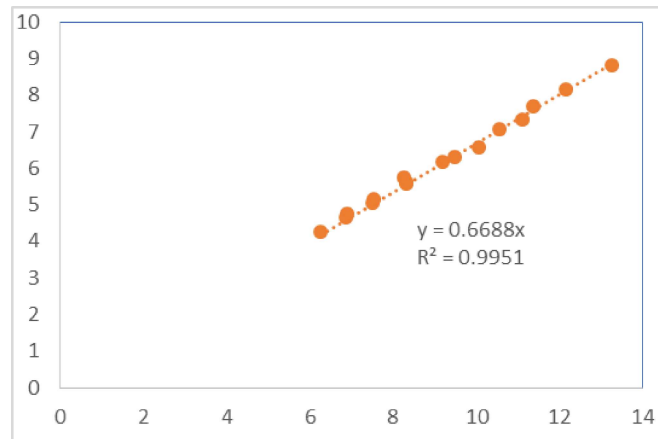


Fig.5.1: Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour le lit mineur. (○) points expérimentaux, (...) Courbes d'ajustement.

Cette figure montre que le rapport Y des hauteurs conjuguées augmente progressivement avec l'augmentation du nombre de Froude F_1 .

L'ajustement des valeurs expérimentales, a montré que la loi de variation de Y en fonction de F_1 est de type linéaire, telle que : $Y = f(F)$.

$$Y = 0.6688 F_1 ; R^2 = 0.9998 \quad (5.1)$$

$$4.25 < F_1 < 8.8$$

Pour le lit majeur

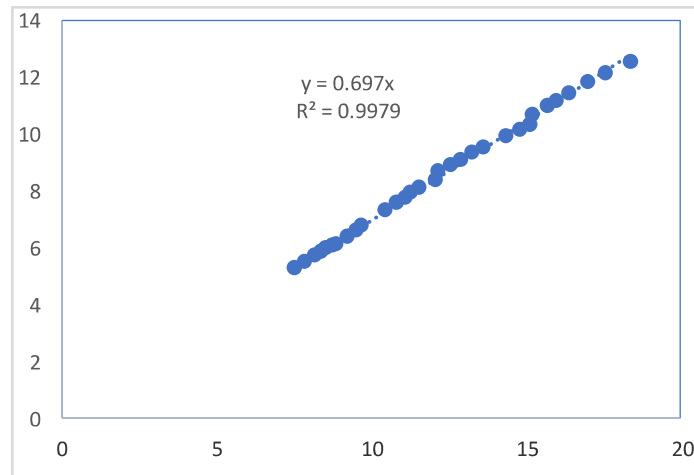


Fig.5.2 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude $F1$ pour le lit majeur.

(\circ) points expérimentaux, (...) Courbes d'ajustement.

Cette figure met en évidence que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident entraîne une élévation de la hauteur conjuguée dans le lit majeur. Par ailleurs, l'ajustement des données expérimentales a permis d'établir une relation linéaire dont l'équation est la suivante :

$$Y = 0.697 F_1 \quad ; \quad R^2 = 0.9999 \quad (5.2)$$

$$5.275 < F_1 < 12.55$$

Comparaison

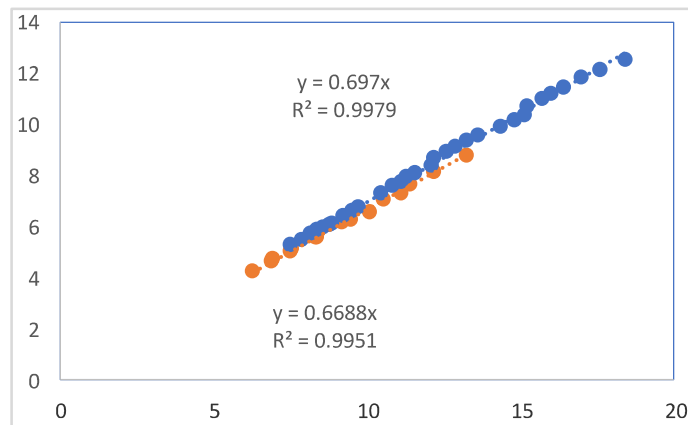


Fig.5.3 : montre clairement un décalage entre les valeurs de Y du ressaut forcé par seuil mince, pour les mêmes nombres de Froude $F1$.

La comparaison entre le lit mineur et le lit majeur, illustrée par la figure 5.3, met clairement en évidence un décalage entre les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut hydraulique forcé par seuil mince, pour des nombres de Froude F_1 identiques dans les deux configurations. En effet, le rapport Y observé dans le lit mineur est significativement inférieur à celui mesuré dans le lit majeur. Les valeurs expérimentales utilisées pour tracer les courbes $Y=f(F_1)$ dans les deux cas sont rassemblées dans le tableau 5.1.

Tableau.5.1. Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
YA	F1	YA	F1	YA	F1
4.25	6.25873867	5.275	7.515752116	8.1	11.57125735
4.628571429	6.872385948	5.5	7.861123881	8.4	12.10299197
4.75	6.91467748	5.725	8.172433353	8.68	12.16256364
5.033333333	7.515752116	5.875	8.369038412	8.92	12.59434588
5.142857143	7.559321626	5.975	8.567195249	8.666666667	12.64263088
5.714285714	8.267732653	6.1	8.766891804	9.12	12.88497755
5.6	8.321711215	6.114285714	8.858691255	9.36	13.25136149
5.566666667	8.342734479	6.25	9.049031328	9.56	13.62115378
6.166666667	9.1980033	6.4	9.229060132	9.92	14.3708397
6.28	9.481902427	6.628571429	9.510136368	10.15	14.3708397
6.55	10.08065223	6.771428571	9.699076056	10.16	14.82703589
7.04	10.55472282	6.833333333	9.801934521	10.36	15.13379613
7.3	11.10533638	6.942857143	9.98479857	10.7	15.23008733
7.68	11.3841234	7.114285714	10.27327293	11	15.71458526
8.15	12.16256364	7.333333333	10.47520763	11.2	16.00770238
8.8	13.25136149	7.6	10.81739378	11.45	16.40132352
		7.766666667	11.10533638	11.85	16.99769943
		7.933333333	11.27930835	12.15	17.60113345
				12.55	18.41655077

5.3. Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

Pour le lit mineur

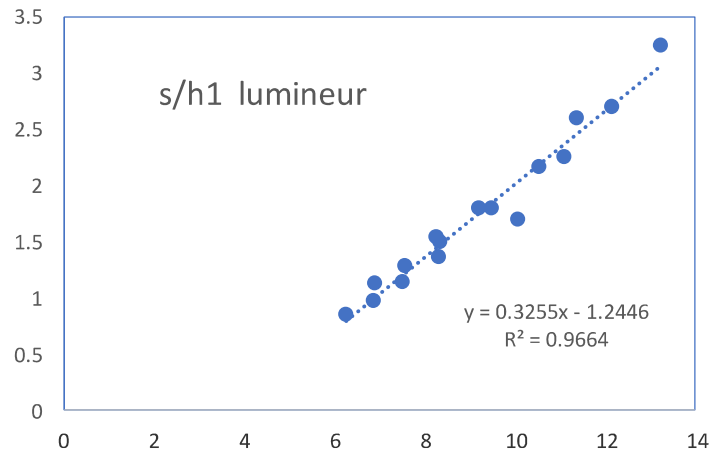


Fig.5.4 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour les deux lits du canal composé. (+) points de mesures expérimentales en lit mineur ; Pour $h_0/h_2 > 1$.

La figure ci-dessus montre que l'ajustement des points de mesure expérimentale dans le lit mineur donne une courbe unique de type linéaire.

$$S/h_1 = 0.3255 F_1 - 1.2446 \quad ; \quad R^2 = 0.9664 \quad (5.3)$$

Pour le lit majeur

La représentation graphique des points expérimentaux dans la figure 5.5, montre la variation du rapport du seuil relatif $S=s/h_1$ du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les cinq ouvertures dans le lit majeur.

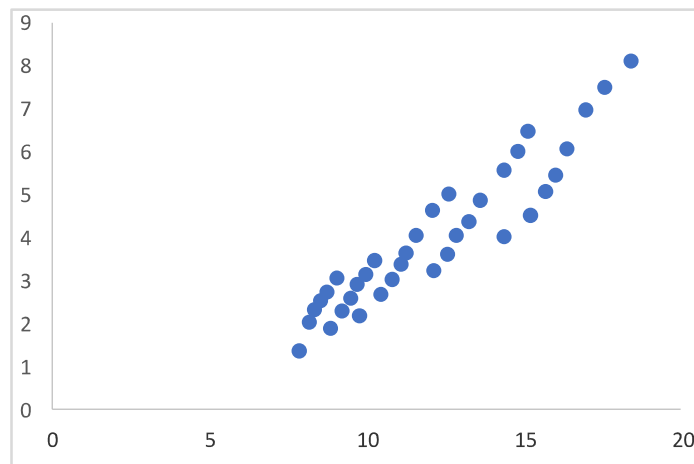


Fig.5.5. Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour le lit majeur du canal composé. (○) points de mesures expérimentales en lit majeur

En constate de cette figure que l'augmentation du seuil relatif S entraîne celle du nombre de Froude $F1$ et que l'influence de la hauteur amont $h1$ est perceptible dans la section composée.

Les fig.5.5 (a, b, c, d, e) montrent la variation de la hauteur relative du seuil $S = s/h1$ en fonction du nombre de Froude $F1$ pour les cinq ouvertures, tels que : $h1/B = 0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066$.

Les figures ci-dessous montrent les ajustements des points de mesure expérimentale pour les différentes ouvertures $h1$ en lit majeur.

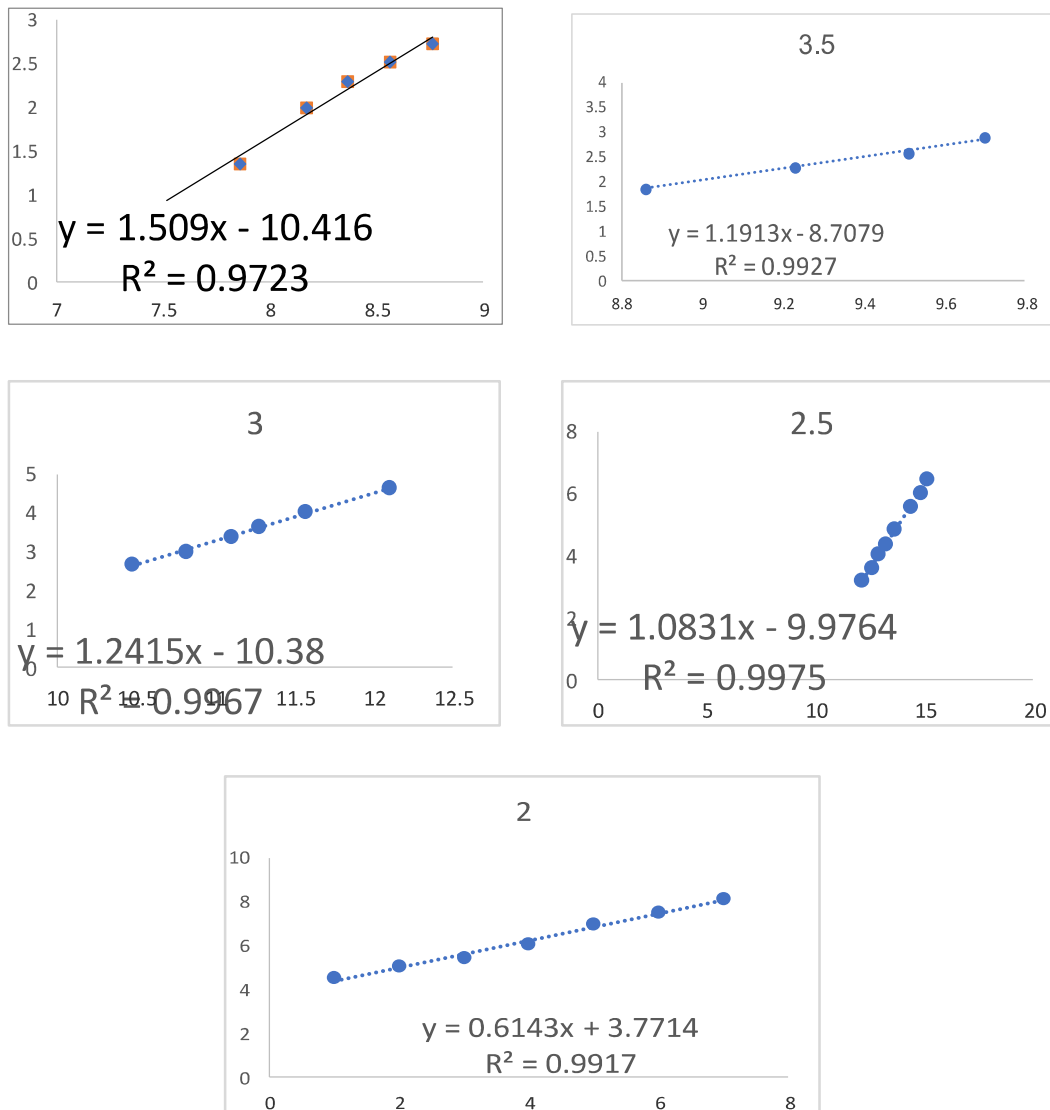


Fig.5.6. (a, b, c, d, e). Variation du rapport $S = s/h1$ de la hauteur relative du seuil du ressaut forcé en fonction de nombre de Froude respectivement pour $h1/B= (0.06 ; 0.058 ; 0,05 ; 0,0416 ; 0,033)$. (o) points expérimentaux. (...) courbe d'ajustement.

Les Fig.5.6 (a, b, c, d, e), montrent que l'ajustement des mesures expérimentales de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1 suit une loi de type linéaire de la forme $s/h_1 = a(F_1) + b$.

Les données ayant servi au traçage des (fig.5.5) et (fig.5.6) (a, b, c, d, e) sont groupées au tableau 5.2.

Tableau.2.2. Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $s/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
F1	s/h1	F1	s/h1	F1	s/h1
6.25873867	0.85	7.515752116	1.35	11.57125735	4.033333333
6.872385948	0.971428571	7.861123881	1.35	12.10299197	4.633333333
6.91467748	1.125	8.172433353	2	12.16256364	3.2
7.515752116	1.133333333	8.369038412	2.3	12.59434588	3.6
7.559321626	1.285714286	8.567195249	2.525	12.64263088	5
8.267732653	1.542857143	8.766891804	2.725	12.88497755	4.04
8.321711215	1.36	8.858691255	1.857142857	13.25136149	4.36
8.342734479	1.5	9.049031328	3.025	13.62115378	4.84
9.1980033	1.8	9.229060132	2.285714286	14.3708397	5.56
9.481902427	1.8	9.510136368	2.571428571	14.3708397	4
10.08065223	1.7	9.699076056	2.885714286	14.82703589	6
10.55472282	2.16	9.801934521	2.166666667	15.13379613	6.48
11.10533638	2.25	9.98479857	3.114285714	15.23008733	4.5
11.3841234	2.6	10.27327293	3.457142857	15.71458526	5.05
12.16256364	2.7	10.47520763	2.666666667	16.00770238	5.45
13.25136149	3.25	10.81739378	3	16.40132352	6.05
		11.10533638	3.366666667	16.99769943	6.95
		11.27930835	3.633333333	17.60113345	7.5
				18.41655077	8.1

Le (Tableau.5.2) regroupe les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport $S = s/h_1$ des hauteurs relatives du seuil au nombre de Froude F_1 , pour différentes hauteurs h_1 des ouvertures.

Tableau.5.3. Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement

B	h1	h1/B	a	b
60	2	0,033	0.614	3.77
60	2.5	0,041	1.0831	-9.97
60	3	0.05	1.2415	-10.38
60	3.5	0.058	1.19	-8.7079
60	4	0.066	1.509	-10.416
				-9.8685

Le (Tableau.5.3) montre que les valeurs des paramètres 'a' donne une relation, $a = 0.6658h1/B^{0.5070}$, les valeurs des paramètres 'b' sont presque égales $b = -9.8685$

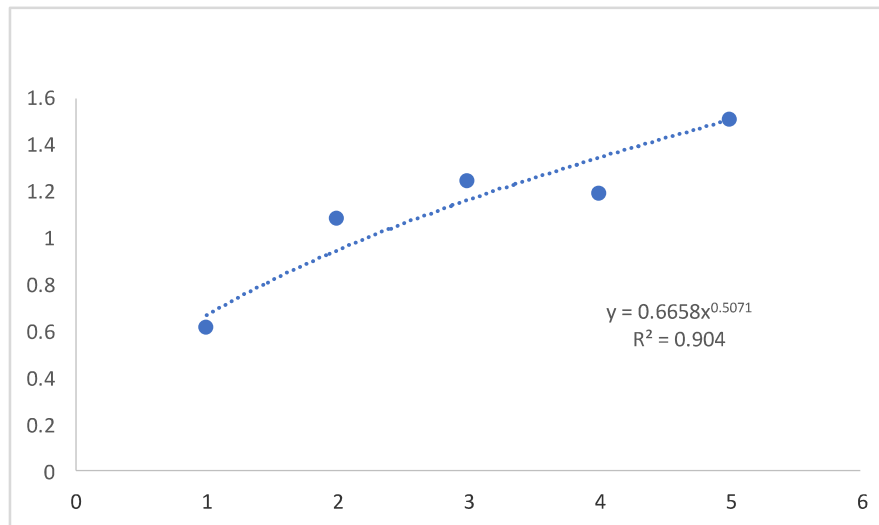


Fig.5.7 : Variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction de la relation $f(F_1, h_1/b)$. (o) Point expérimentaux. (...) Première bissectrice d'équation $S/h_1 = f(F_1, h/B)$.

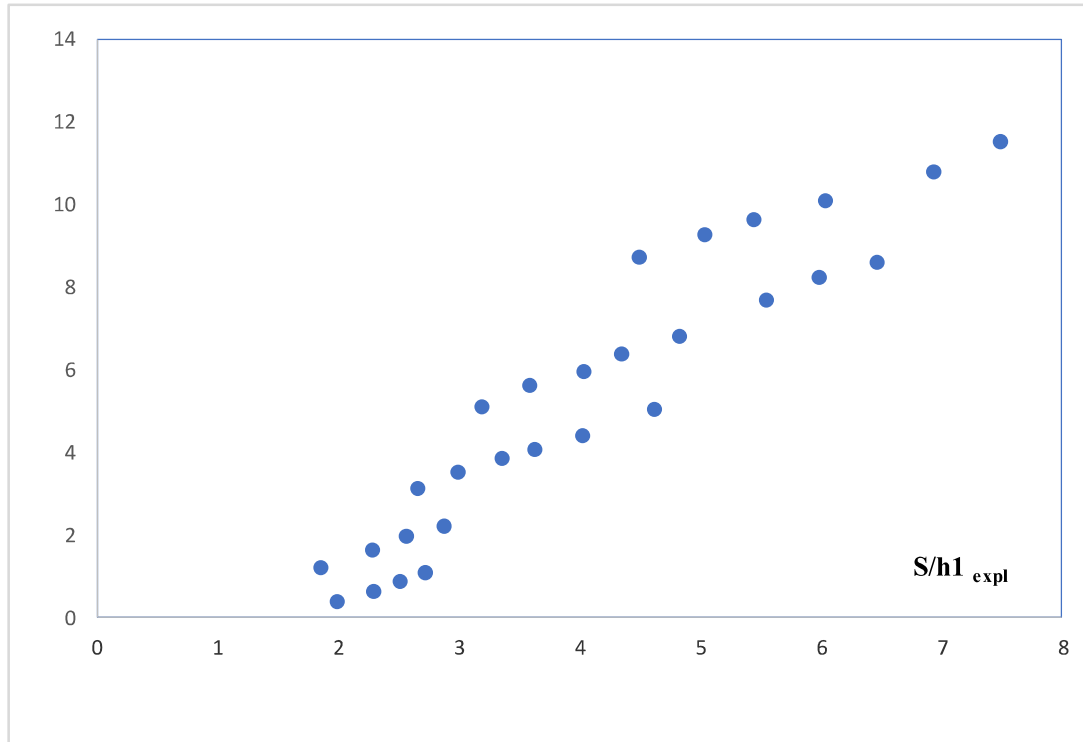


Fig.5.8: Variation du paramètre 'b' en fonction de $h1/B$.

En effet, en remplaçant les coefficients a et b par leurs expressions dans la relation $s/h1 = ay + b$, l'équation liant le rapport des hauteurs relatif du seuil $s/h1$ au nombre de Froude $F1$ et à la hauteur relative amont $y1$ devient :

$$S/h = 0.6658h1/B^{0.5070}F_1 - 9.8685$$

Selon les résultats obtenus pour la relation globale du seuil relatif ($s/h1$) globale pour le lit majeur .On déduit que la majorité des mesures expérimentales ne tournent pas autour de la première bissectrice .Ce qui rend épuisier de faire une recommandation future aux étudiants de faire une pause de recherche dans ce type de ressaut hydraulique évoluant un canal rectangulaire compare avec seuil épais en seuil d avoir une relation globale fiable .

5.4 Conclusion

La deuxième partie de notre étude a concerné l'étude expérimentale du ressaut hydraulique Forcé type A par seuil épais dans un Canal Rectangulaire Composée à pente nulle (canal prismatique). L'analyse des résultats expérimentaux nous a permis de trouver des approches expérimentales globales très acceptables. L'analyse statistique de la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude $F1$ de l'écoulement incident a montré que l'ajustement suit une loi de type linéaire, et que la hauteur relative est moindre dans le lit mineur.

*Conclusion
générale*

Conclusion Générale :

Le présent travail a porté sur l'étude expérimentale du **ressaut hydraulique forcé de type A**, par un **seuil à paroi épaisse**, évoluant dans un **canal rectangulaire de section composée**, avec pente nulle. L'objectif principal a été de **caractériser l'évolution des hauteurs conjuguées du ressaut** en fonction des paramètres hydrauliques et géométriques, notamment le **nombre de Froude F_1** , la **hauteur du seuil s** , la **hauteur initiale h_1** , ainsi que le **rapport d'élargissement $\beta = b/B$** .

L'expérimentation a été menée à l'aide d'un dispositif de mesure performant permettant de relever avec précision les différentes hauteurs du ressaut hydraulique. Plusieurs séries d'essais ont été effectuées pour différentes hauteurs d'écoulement, et pour deux cas de géométrie du canal : le **lit mineur** ($\beta = 1$) et le **lit composé** ($\beta < 1$).

L'analyse des résultats a permis de tirer plusieurs conclusions importantes :

- Le **rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$** augmente avec le **nombre de Froude F_1** , confirmant ainsi la sensibilité du ressaut à l'énergie spécifique de l'écoulement amont.
- L'effet de la **géométrie du canal** est significatif : pour un même F_1 , la hauteur conjuguée Y est **plus faible dans le lit mineur** que dans le lit majeur, ce qui signifie une **meilleure dissipation de l'énergie cinétique dans le lit mineur**.
- Les courbes expérimentales obtenues ont montré un **comportement linéaire** du rapport Y en fonction de F_1 , avec des coefficients spécifiques selon la hauteur initiale h_1 et la configuration du canal.
- L'influence du **seuil à paroi épaisse** se manifeste par une meilleure stabilisation du ressaut et une localisation précise de sa formation, ce qui est particulièrement utile dans les ouvrages de régulation.

Ces résultats peuvent constituer une **base utile pour le dimensionnement des dispositifs de dissipation d'énergie** dans les ouvrages hydrauliques en lit composé, notamment dans les cas où les écoulements présentent des variations brusques de régime.

Enfin, cette étude ouvre la voie à des travaux complémentaires, notamment :

- L'analyse numérique du phénomène via la modélisation CFD,
- L'étude de l'influence de la pente du canal ou de seuils de forme différente,
- La généralisation des résultats à des configurations tridimensionnelles ou à écoulement non permanent.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques:

ACHOUR B. (2000) Ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. JHR 2000 ; 38(4): 307-311.

ACKERS P. (1991) Hydraulic design of straight compound channels. SR281, HR Wallingford, Wallingford, U K, 1991.

RIGAET F . Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée (2021) Univ :MK Biskra

BOUSMAR D, RIVIÈRE N, PROUST S, PAQUIER A, MOREL R, ZECH Y. (2005) Upstream discharge distribution in compound-channel flumes. J H Eng 2005, ASCE; 131(5): 408-412.

BOUSMAR D, WILKIN N, JACQUEMART, J H, ZECH Y. (2004) Overbank flow in symmetrically narrowing flood plains. J H Eng 2004; 130(4): 305-312.

MORVAN H, PENDER G, WRIGHT N G, ERVINE D A. (2002) Three- Dimensional hydrodynamics of meandering compound channels. JHE 2002; 128(7): 674-682.

SELLIN R H J. (1964) A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. La Houille Blanche 2002; 7: 793-802

FERNANDES, J.N., LEAL, J.B., CARDOSO, A.H. (2010). Discussion of “Apparent friction coefficient in straight compound channels”, by Pedro J.M. Moreta and Juan Pedro Martin-Vide, Journal of Hydraulic Research (in press).

PELTIER, Y. (2011), Physical modelling of overbank flows in the vicinity of a groyne set on the floodplain. PhD-thesis of the University of Lyon, manuscript in preparation.

PROUST, S. (2005), Ecoulements non-uniformes en lits composés : effets de variations de largeur du lit majeur, PhD-Thesis, INSA de Lyon, n°2005-ISAL-0083, 362 p, Lyon, France.

PROUST, S., BOUSMAR, D., RIVIÈRE, N., PAQUIER, A. AND ZECH, Y. (2010), Energy losses in compound open channels. Advances in Water Resources,

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, N0 01, pp.40-57, 2009.

PROUST, S., BOUSMAR, D., RIVIÈRE, N., PAQUIER, A. AND ZECH, Y. (2009), Nonuniform flow in compound channel: A 1-D method for assessing water level and discharge distribution. Water Resources Research, vol. 45, n° W12411, 1-16.

SHIONO, K., AND KNIGHT, D. W. (1991), Turbulent open channel flows with variable depth across the channel, Journal of Fluid Mechanics, 222, 617-646.

STOCCHINO, A. AND BROCCINI, M. (2010), Horizontal mixing of quasi-uniform straight compound channel flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 643, 425-435.