



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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département d'hydraulique et génie civil

Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: hydraulique

Spécialité: Ouvrage hydraulique

Thème:

**Contribution à l'étude du ressaut
hydraulique contrôlé par seuil à paroi
épaisse évoluant en canal rectangulaire de
section composée**

✓ **Présenté par:**

- Benyahia Abderrahim
- Mereddef Khaled
- Mekhtara Mohammed

- Dirigé par:

Dr. RIGHET Ferhat

Devant le jury composé de:

Dr. RIGHET Ferhat

Université d'El OUED

Promoteur

Pr. GHOMRI Ali

Université d'El OUED

Président

Dr. Khater ibtissam

Université d'El OUED

Examineurs

Année universitaire: 2018/2019

الملخص

تقترح مساهمتنا في دراسة تأثير القفزة الهيدروليكية المتطور في قناة مستطيلة اتسعت فجأة مع خصائص التدفق.

تحقيقاً لهذه الغاية ، ينقسم بحثنا إلى قسمين رئيسيين ، الأول يتعلق بدراسة بيبليوغرافية تشير إلى الأعمال ذات الصلة بموضوعنا المقترح والجزء الثاني من خطة عملنا هو إقامة علاقات بدون أبعاد ذات خصائص عامة. لحجم الأعمال المساعدة.

الكلمات المفتاحية: القفزة الهيدروليكية، قناة مستطيلة ذات مقطع مركب، ميزة القفزة الهيدروليكية.

ABSTRACT

Our contribution proposes to the study of the effect of the hydraulic jump evolves in rectangular channel abruptly widened with the characteristics of the flow.

To this end, our study research is subdivided into two main parts, the first concerning a bibliographic study citing the works that are related to our proposed theme and the second part of our work plan is to establish dimensionless relations with general characteristics. to size the ancillary works.

Keywords: Hydraulic jump, Rectangular canal of compound section, characterization of the hydraulic jump.

RESUME

Notre contribution se propose à l'étude de l'effet du ressaut hydraulique s'évolue en canal rectangulaire brusquement élargi aux caractéristiques de l'écoulement.

à cet effet notre recherche d'étude est subdivisé en deux parties principales, la première concernant une étude bibliographique citant les travaux qui sont liées à notre thème proposé et la seconde partie de notre plan du travail est d'établir des relations adimensionnelles à caractères générales permettant de dimensionner les ouvrages annexes

Mots clés : Ressaut hydraulique, Canal rectangulaire de section composé, ressaut classique , ressaut contrôlé.

PRINCIPALES NOTATIONS

- L'aire de la section mouillée initiale [m²] : A_1
- L'aire de la section mouillée finale [m²] : A_2
- L'aire de la section mouillée correspondant à x [m²] : $A(x)$
- Base du canal trapézoïdal en amont [m] : b_1
- Nombre de Froude incident [-] : F_1
- Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut [N] : P_1
- Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut [N] : P_2
- Accélération de la pesanteur [m.s⁻²] : g
- Hauteur initiale du ressaut [m] : h_1
- Hauteur finale du ressaut [m] : h_2
- Hauteur finale du ressaut classique rectangulaire [m] : h_2^*
- Profondeur de l'eau à la distance x du pied du ressaut [m] : $h(x)$
- hauteur maximal du rouleau de fond [m] : h_b
- k coefficient de correction du volume du ressaut [-]
- Longueur du rouleau [m] : L_r
- Longueur du ressaut [m] : L_j
- Longueur du rouleau classique rectangulaire [m] : L_r^*
- Longueur du ressaut classique rectangulaire [m] : L_j^*
- la distance du pied du ressaut au début du rouleau de fond [m] : L_u
- longueur du rouleau de fond [m] : L_b
- cotangentes de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale [-] : m
- coefficient de forme [-] : M_1
- Débit volume [m³.s⁻¹] : Q
- Débit relatif [m³.s⁻¹] : Q^*
- Nombre de Reynolds [-] : Re
- Rayon hydraulique correspondant au profil triangulaire [-] : R_h
- Hauteur du seuil [m] : s
- Hauteur relative du seuil [-] : S
- Gradient de perte de charge [-] : S_f

- Force de frottement agissant sur le volume de liquide [N] : W_x
- Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiale et finale [m³] : V
- Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale [m.s-1] : v_1
- Vitesse moyenne dans la section mouillée finale [m.s-1] : v_2
- Position de seuil [m] : x
- Position relative de seuil [-] : X
- Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique [-] : Y^*
- Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil [-] : Y_s
- Viscosité cinématique [m².s-1] : ν

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Ressaut Hydraulique	08
Figure I.2.a : Ressautondulé	09
Figure I.2.b : Le pré-ressaut	09
Figure I.2.c : Le ressaut de transition	10
Figure I.2.d : Le ressaut stable	10
Figure I.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut	11
Figure I.4 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828)	13
Figure I.5 : Hauteur du ressaut	13
Figure I.6 : Aspect du ressaut classique	14
Figure I.7 : (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique	16
Figure I.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude Fr_1 (—)	18
Courbe tracée selon la relation (1.25), (-----) courbe tracée Selon la relation (1.26)	
Figure II.1 :Ecoulementfranchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L .	20
Figure II.2 :Variation expérimentale du nombre de Froude Fr_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation (II.2).	21
Figure II.3 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse à l'aval d'une vanne de fond, selon ACHOUR (1998) .	21
Figure II.4 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse à l'aval d'un déversoir standard. P.d.c : pertes de charge sur le parement aval du déversoir.	24
Figure III.1 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit	27
Figure III.2 : Variation de Y , calculé par (3.4), en fonction de Fr_1 . (- - -) : $\beta = 1$.	29
Figure III.3 : Variation de Y en fonction de Fr_1 . (o) : équation (3.6), (+) : équation (3.4).	30
Figure III.4 : Variation de η en fonction de Fr_1 . (- - -) : $\beta = 1$. Y est calculé par l'équation (3.3).	31
Figure III.5 : Variation de η en fonction de Fr_1 . (0) : équation (3.2), (+) : équation (3.1)	31
Figure IV.1: Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composé	38
Figure IV.2 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique	41
Figure V.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi épaisse En canal rectangulaire de section composée	45
Figure V.2:Variation du rapport des hauteurs du ressaut Y en fonction du débit relatif Q^* .	47

Figure (V.3): Variation du coefficient a_1 en fonction de la hauteur relative amont y_1	49
Figure (V.4) : Variation du coefficient b_1 en fonction de la hauteur relative aval y_1	49
Figure (V.5) : Variation de la hauteur relative aval Y en fonction de (y_1, Q^*) . (∞)Points	50
Figure(V.6) : Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^* .	51
Figure (V.7) : Variation du coefficient a_2 en fonction de la hauteur relative aval y_1	52
Figure V.8 : Variation du coefficient b_2 en fonction de la hauteur relative amont y_1	52
Figure (V.9) : Variation du rapport Y_{exp} en fonction de $Y = f(y_1, Q^*)$. (∞)Points	
Expérimentaux du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de lit majeur	53
Figure(V.10) : Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif.	53
Figure (V.11): Variation de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ en fonction du débit relatif Q^*	55
Figure(V.12) Variation du coefficient a_3 en fonction de la hauteur relative amont y_1	56
Figure(V.13) : Variation du coefficient b_3 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	57
Figure (V.14): Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction de $f(Q^*, y_1)$.	57
figure (V.15) : Ressaut contrôlé en canal rectangulaire de forme composée. Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction du débit relatif Q^* .	58
Figure V.16 : Variation du coefficient a_4 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	59
Figure V.17 :Variation du coefficient b_4 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	60
Figure (V.18) : Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction de $f(Q^*, y_1)$.	61
Figure(V.19) : Variation du rapport seuil relatif $S= s/h_1$ en fonction du débit relatif Q^* .	62
Figure (V.20): •Variation du seuil épais relatif expérimentale $S=s/h_1$ en fonction des relations globales obtenues $S=(y_1, Q^*)$.	64
Figure (V.21) : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs y_1	65
Figure (V.22).Variation du coefficient a_5 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	66
Figure (V.23): Variation du coefficient b_5 en fonction de la hauteur relative amont y_1	66
Figure (V.24): Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$.	67

Figure (V.25): Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* .	68
Figure (V.26): Variation du coefficient a_6 en fonction de la hauteur relative amont y_1	69
Figure (V.27) : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$.	69
Figure (V.28) : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 .	70
Figure (V.29) : Variation du coefficient a_6 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	70
Figure (V.30) : Variation de la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$	71
Figure (V.31) : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* .	72
Figure (V.32): Variation du coefficient a_7 en fonction de la hauteur relative amont y_1	72
Figure (V.33): Variation de la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$	73
Figure (V.34) : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 .	74
Figure (V.35): Variation du coefficient a_8 en fonction de la hauteur relative amont y_1	75
Figure (V.36): Variation du coefficient b_8 en fonction de la hauteur relative amont y_1	75
Figure (V.37): Variation de la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$.	76
Figure (V.38) : Variation du seuil épais relatif expérimentale $L_r=lr/h_1$ en fonction des relations globales obtenues $L_r=(y_1, Q^*)$.	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (V.1) : récapitulation des résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du Q^* pour chaque ouverture h_1	48
tableau (V.2) regroupe les valeurs des coefficients de a_2 et b_2	51
tableau (V.3) regroupe les valeurs des coefficients de a_1, b_1, a_2 et b_2	54
Tableau(V.4) récapitulation des couples de valeurs (a_3, b_3) de l'ajustement dans le tableau ci-dessous.	56
tableau (V.5) regroupe les valeurs des coefficients a_4 et b_4 .	59
Le tableau (V.6) regroupe les valeurs des coefficients de a_3, b_3, a_4 et b_4	63
Le tableau (V.7) regroupe les valeurs des coefficients a_5 et b_5 .	65
Le tableau (V.8) regroupe les valeurs des coefficients a_6 et b_6 .	58
Le tableau (V.9) regroupe les valeurs des coefficients a_7 et b_7 .	71
Le tableau (V.10) regroupe les valeurs des coefficients a_8 et b_8 .	74

LISTE DES PHOTOS

Photo IV.1 : Photographie du modèle expérimental du canal	38
Photo IV.2 : Pompe centrifuge axiale	39
Photo IV.3: Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit	39
Photo IV.4 : Section de contrôle	40
Photo IV.5 : Photographie de convergent	40
Photo IV.6 : Photographie d'une boîte en charge	40
Photo IV.7 : Photographie des seuils épais	42
Photo IV.8 Vanne de régulation	43
Photo IV.9 : Les ouvertures	43

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Abréviations

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES PHOTOS

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE..... 01

INTRODUCTION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE..... 04

Chapitre I:

RESSAUTHYDRAULIQUE CLASSIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

I.1. Introduction..... 07

I.2. Définition..... 08

I.3. Ressaut hydraulique classique..... 08

I.3.1 Classification du ressaut classique 09

I.3.2 Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut 11

I.3.3 Caractéristiques géométriques du ressaut 13

I.3.3.1. Hauteur du ressaut..... 13

I.3.3.2. Longueur du rouleau..... 14

I.3.3.3. Longueur du ressaut..... 15

I.3.3.4 Rendement du ressaut..... 16

I.4 CONCLUSION..... 19

Chapitre II

RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL MINCE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

II.1.Introduction..... 20

II. 2. Approche de Forster et Skrinde.....	20
II. 2.3approche de Achour	21
II. 3.1Configuration avec vanne de fond	21
II. 3.2Configuration avec déversoir standard	24
II. 4 CONCLUSION	26

Chapitre III 31

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSEE

III. 1INTRODUCTION.....	27
III.2. Rapport des hauteurs conjuguée	27
III.3. Rendement du ressaut hydraulique.....	30
III. 4 CONCLUSION.....	32
CONCLUSIO de La Partie Bibliographique.....	33
Deuxième Partie étude expérimentale.....	35
introduction de partie étude expérimentale.....	36

Chapitre IV 37

DESCRIPTION DU MODEL EXPERIMENTAL

IV .1 NTRODUCTION.....	37
IV.1 DESCRIPTION DU CANAL.....	37
IV.2 Limnimètre.....	41
IV.3. Le seuil épais.....	49
IV.4 Les ouvertures.....	43
IV.5 CONCLUSION	44

CHAPITRE V 45

ETUDE EXPERIMENTALE

V.1 INTRODUCTION.....	45
-----------------------	----

V.1.1 Détermination expérimentale de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en lit composée.....	45
V .1.2Description des essais.....	45
V.2.Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du débit relatif Q^*	46
V.2.1premier cas :($\beta=b/B=1$).....	46
V.2.2 Deuxième cas : ($\beta=b/B<1$).....	52
V.2.3.Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du débit relatif Q^* dans la section composée.....	53
V.3. Hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil en fonction du débit relatif Q^*	55
V .3.1 Premier cas ($\beta=1,b=B$).....	55
V.3.2 Deuxième cas ($\beta=b/B<1$)($b=20\text{cm}$, $B=60\text{ cm}$).....	58
V.3.3. Hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil en fonction du débit relatif Q^*	61
V.3.4 CONCLUSION.....	63
V.4. Longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du débit relative Q^*	64
V.4.1. Premier cas ($\beta=1,b=B$).....	64
V.4.2. Deuxième cas ($\beta=b/B<1$).....	67
V.5 Longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction du débit relative Q^*	70
V.5.1 Premier cas ($\beta=1,b=B$) section rectangulaire	70
V.5.2 Deuxième cas ($\beta=b/B<1$) canal rectangulaire de section composée.....	73
V.6. CONCLUSION.....	77
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE.....	79
CONCLUSION GENERALE.....	81
REFERENCESBLIOGRAPHIQUES.....	86

Le ressaut hydraulique est le principal moyen qu'utilisent les ouvrages hydrauliques pour dissiper l'énergie. Ce ressaut est formé lors de la transition brusque d'un écoulement torrentiel à un écoulement fluvial. Durant cette transition une onde stationnaire se forme et l'énergie est alors dissipée par turbulence.

Un rôle important des ouvrages sera donc d'amener l'écoulement du cours d'eau (généralement fluvial) à un écoulement torrentiel afin que le ressaut puisse se former.

Afin de bien dimensionner ces ouvrages hydrauliques, on doit bien connaître les caractéristiques du ressaut. Celles-ci sont fondamentalement les hauteurs d'eau en amont et en aval du ressaut (hauteurs conjuguées), et les longueurs du ressaut hydraulique nécessairement à la détermination des dimensions du bassin d'amortissement.

La modification des conditions à l'amont (débit, hauteurs, ...etc.) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur, la pente du canal, ...etc.) peut conduire à différentes configurations du ressaut. Le ressaut est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente nulle ou faible, sans obstacle à l'aval (Hager, Bremen et Kawagoshi : 1990). Il est appelé contrôlé lorsque sa formation est conditionnée par la mise en travers de l'écoulement d'un obstacle (Hager et Bretz, 1988). Il est dit forcé lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle (Rand, 1957 ; Bretz, 1988).

Les recherches expérimentales ont d'abord confirmé que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. C'est en d'autres termes la seconde loi de Newton qui est appliquée, qui montre que la variation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut est égale à la résultante des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement (Achour, 1997; Debabeche, 2003). L'application de la quantité de mouvement a eu pour but d'évaluer le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 ou du débit relatif Q^* caractérisant l'écoulement à l'amont. La relation la plus simple est celle obtenue par Bélanger pour le cas du ressaut classique en canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible et dont la validité a été vérifiée par plusieurs auteurs.

La longueur minimale du bassin amortisseur correspond en règle générale à la longueur L_j du ressaut défini comme étant la longueur au-delà de laquelle aucune protection du bassin n'est nécessaire. Jusqu'à ce jour aucun développement théorique n'a pu mener à l'établissement d'une relation analytique permettant d'évaluer la longueur L_j ; seuls les essais au laboratoire ont permis de la quantifier. C'est ainsi que Bradley et Peterka (1957) ont élaboré une courbe moyenne expérimentale, représentant la variation de la

longueur relative L_j^* / h_2^* en fonction du nombre de Froude Fr_1 à l'amont du ressaut. Les auteurs concluent que pour la gamme pratique des nombres de Froude tels que $4 < Fr_1 < 12$, la longueur relative L_j^* / h_2^* prend la valeur moyenne de 6 ; ce résultat est encore admis de nos jours.

Une autre caractéristique géométrique du ressaut est la longueur L_r^* sur laquelle s'étend son rouleau de surface. Comme pour la longueur L_j^* , L_r^* n'a pu être évaluée que par la voie expérimentale. Plusieurs auteurs ont quantifié cette longueur (Bradley et Peterka, 1957 ; Safranez, 1929 ; Bakhmeteff, 1936 ; Moore, 1943), mais nous citerons surtout les travaux relativement récents de Hager (1990) qui montrent que la longueur relative L_r^* / h_1 dépend à la fois du nombre de Froude Fr_1 et du rapport d'aspect $w = h_1 / b$: h_1 et b sont respectivement la hauteur initiale du ressaut et la largeur du canal rectangulaire.

Le but de notre travail est d'étudier l'effet du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire contrôlé par seuil épais brusquement élargi aux caractéristiques de l'écoulement et d'en déduire des relations expérimentales adimensionnelles à caractère générales permettant au dimensionnement des ouvrages annexes du barrage tel que le bassin d'amortissement.

Notre contribution est de visée en deux parties fondamentales

➤ la première partie, à travers laquelle nous passerons en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans les canaux rectangulaire, et les études relatives au ressaut contrôlé par seuil mince. Cette partie bibliographique sera divisée en trois chapitres.

✓ Dans le premier chapitre nous allons donner un bref aperçu sur le ressaut hydraulique classique, ensuite nous passerons en revue les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique dans un canal rectangulaire.

✓ Le second chapitre présente les travaux les plus intéressants dans le domaine du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi épaisse dans un canal rectangulaire (Forster et Skinde, 1950; Achour, 1995)

Le troisième et dernier chapitre de la première partie bibliographique sera consacré à l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée. Les travaux les plus récents dans ce domaine sont ceux **de Khattaoui et Achour 2012).**

➤ La deuxième partie de notre contribution, est d'analyser expérimentalement l'effet du ressaut hydraulique qui s'évolue en canal brusquement élargi contrôlé par seuil à paroi épaisse

aux caractéristiques de l'écoulement . L'objectif essentiel de cette recherche expérimentale est d'établir expérimentalement les relations fonctionnelles liant les différents paramètres du ressaut hydraulique à caractères général régissant ce type du ressaut .

A cet effet notre partie d'expérimentation a été divisé en deux chapitres :

✓ Le quatrième chapitre a pour objectif de décrire le modèle expérimental régissant le ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais , dans un canal rectangulaire de forme composée.

✓ Le cinquième et dernier chapitre de cette étude expérimentale sera consacré au ressaut hydraulique en canal rectangulaire de forme composé, les seuls travaux existants pour ce type de ressaut c'est ceux du ressaut classique (Khattaoui et Achour 2012). Donc et à travers cette contribution expérimentale on va analyser l'effet des ouvertures y_1 sur les caractéristiques du ressaut hydraulique et pour atteindre cet objectif deux cas seront présentés : cas où l'écoulement s'effectuera au niveau du lit mineur du canal, et le deuxième cas, où le ressaut se forme au niveau du lit majeur et finalement on déduira des résultats généraux dans la section composée. Des relations fonctionnelles seront établies, exprimant en termes adimensionnels, le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut, Hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil, longueur relative du ressaut hydraulique (L_j/h_1) et celle du rouleau de surface (L_r/h_1) du ressaut en fonction du débit relatif Q^* .

Ce chapitre sera consacré à l'établissement des relations expérimentales régissant le ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée et une analyse expérimentale des équations empiriques sera également établie.

Dans cette partie une analyse bibliographique sera proposée, elle a pour but de présenter les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique. Ce phénomène hydraulique que nous essayons de présenter, est l'objet de recherche de plusieurs hydrauliciens. Ces chercheurs ont abouti à des résultats fiables, basés sur des essais effectués au laboratoire, d'une part pour obtenir une parfaite structure du bassin d'amortissement et, d'autre part pour résoudre les problèmes d'érosion du lit de l'oued, à l'aval des barrages.

La présente partie se divise en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'évaluation dans le temps du ressaut hydraulique. En premier lieu, nous avons abordé le ressaut hydraulique classique, évoluant en canal de section droite rectangulaire, de pente faible ou nulle, et nous avons aussi présenté l'équation de Bélanger (1828), qui donne la relation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident. Ainsi les travaux de Hager et al (1990) et ceux de Hager et Sinniger (1986) font l'objet de la détermination des caractéristiques géométriques du ressaut. En deuxième lieu, nous avons configuré l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique, à travers les travaux de Forster et Skrinde (1950) et ceux de Rand (1957) et Bretz (1988), sur les différents types de ressaut.

Le deuxième chapitre traite le ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi épaisse dans un canal rectangulaire a été expérimentalement testé. Les travaux entrepris par FORSTER et SKRINDE (1950) ont concerné le ressaut contrôlé par un seuil épais. Ils proposent une relation implicite liant, les variables F_1 et s/h_1 seulement.

L'approche théorique de ACHORE (1997) mène à une relation analytique explicite permettant le calcul de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction de la hauteur relative $h^*=h_1/h_c$.

En fin, Le dernier chapitre concerne l'étude de Khattaoui et Achour (2012) sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire composé. Dans cette étude les auteurs ont constatés que les écoulements uniformes, ou plus encore les écoulements non uniformes en lit composé sont très compliqués à cause du transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al. 2005). Ces deux phénomènes, se manifestant de différentes façons, sont des sources de dissipation d'énergie supplémentaire de l'écoulement. Il peut être donc intéressant de voir la grandeur de ces dissipations dans le cas où il se produit un ressaut hydraulique dans le lit composé. Il est plus intéressant d'autant plus que le ressaut hydraulique est utilisé justement pour la dissipation d'énergie. Toute dissipation supplémentaire est donc la bienvenue. En s'inspirant du développement théorique de Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, on

approche théorique est proposée dans ce présent travail pour déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en lit composé. Le rendement du ressaut est lui aussi quantifié. Toutes ces équations sont présentées en termes adimensionnels afin de leur donner un caractère de validité général.

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse (Forster et Skrinde,1950; Achour,1997), continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative (Hager et Sinniger,1985). Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau aval, de contrôler sa position lors des changements des paramètres de l'écoulement et contribuent enfin à une meilleure compacité du bassin amortisseur (Bretz,1987; Hager et Li,1992).

CHAPITRE I:RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

I.1.INTRODUCTION

En écoulement brusquement varié, la transition, d'un régime torrentiel en régime fluvial, est assurée par le ressaut, en dissipant une grande quantité d'énergie hydraulique. L'écoulement en amont du ressaut est caractérisé par un nombre adimensionnel, c'est le nombre de Froude F_1 , qui est donné par $F_1 = \frac{v}{\sqrt{gh}}$ (pour un canal de section droite rectangulaire). La variation de ce dernier autour de l'unité provoque différents régimes : si $F_1 \leq 1$, le régime est lent (fluvial) ou critique, au delà de cette valeur, apparaissent différents types du ressaut hydraulique ; nous les citerons donc à travers ce chapitre, selon la classification de Bradley et Peterka (1957).

On s'accorde à dire que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation liant le rapport Y^* des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 . Pour une section droite rectangulaire, l'équation de Bélanger (1828) a fait l'exemple d'application du théorème d'Euler au ressaut hydraulique classique. Nous allons présenter la forme simplifiée de Y^* proposée par Hager et Sinniger (1985).

Le ressaut est caractérisé par la longueur L_r^* de son rouleau ainsi que par la longueur L_j sur laquelle il s'étend. Ces caractéristiques n'ont pu être évaluées que par la voie de l'expérimentation. Les travaux présentés par Hager et al (1990) font l'objet de notre étude bibliographique, concernant l'évaluation des caractéristiques géométriques du ressaut classique.

La capacité du ressaut pour dissiper une telle énergie est caractérisée par son rendement η , qui est le rapport entre la différence des charges totales initiales et finales ΔH_{12} , et la charge totale dans la section initiale du ressaut H_1 . Nous passerons en revue les travaux de Hager et Sinniger (1985), concernant leur relation, qui permet le calcul explicite du rendement η .

A la fin de ce chapitre nous aborderons le ressaut hydraulique contrôlé et forcé par seuil dans un canal rectangulaire. Les travaux les plus récents effectués dans ce domaine, sont ceux de Forster et Skrinde (1950), et ceux de Rand (1957) et Bretz (1988). Nous représenterons la relation reliant le rapport des hauteurs conjuguées Y , le nombre de Froude F_1 , et la hauteur relative S du seuil. Nous aborderons aussi leurs approches sur l'écoulement franchissant un seuil continu à paroi mince et le seuil contenu à paroi épaisse.

I.2. Definition

Le ressaut hydraulique est une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement permanent, qui se produit lors du passage du régime torrentielle au régime fluvial. Il est accompagné d'une agitation marquée et de grandes pertes d'énergie. (Figure1.1).

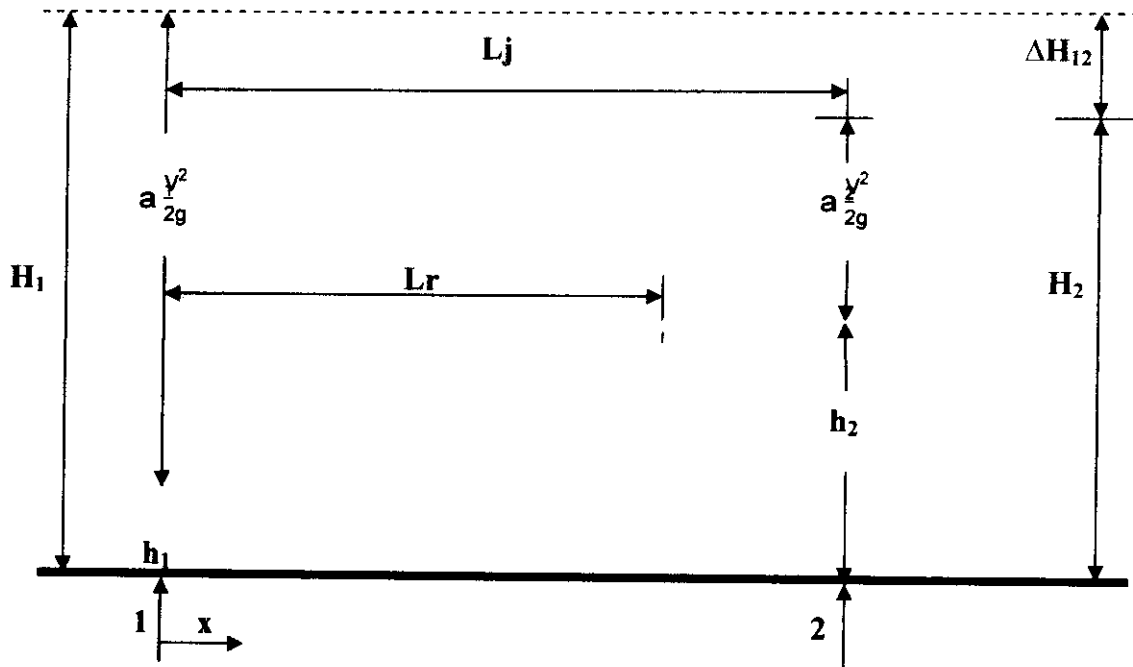


Figure I .1: Ressaut Hydraulique

Les hauteurs h_1 et h_2 sont appelées profondeurs conjuguée du ressaut. La distance L_j entre la section 1 et 2 est appelée longueur du ressaut et la distance L_r appelée longueur du rouleau. La perte de charge est représentée par ΔH_{12} .

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

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un coefficient cinétique (ou nombre de Froude $F_1 > 1$) et représente la relation entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation des petites perturbations.

I.3. Ressaut hydraulique classique

Les études préliminaires dans ce domaine sont effectuées sur le modèle du ressaut classique, ce type du ressaut hydraulique se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nul ou faible.

I.3.1. Classification du ressaut classique

La classification du ressaut classique est basée sur la variation du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut.

Pour les valeurs de $F_1 \leq 1$, le régime est lent, ou critique, et il n'y a pas de ressaut. Pour des valeurs de nombre de Froude comprise entre 1 et 1.7 et cela d'après Andersen (1978), la différence des profondeurs conjuguées en amont et en aval est très faible, et le ressaut est caractérisé par de légères rides à la surface libre, aspect qui diffère peu de celui que l'on observe dans le régime critique, c'est le ressaut ondulé (figure 1.2.a).

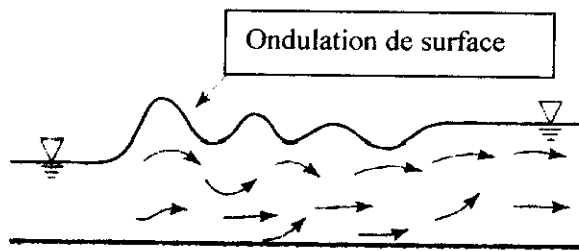


Figure 1.2.a : Ressaut ondulé

Selon la classification de Bradly et Peterka (1957) on distingue quatre formes de ressaut classique. Pour des valeurs de $1.7 < F_1 < 2.5$ on constate le même phénomène, mais plus accentué ; dans ce cas se produisent déjà de petits tourbillons superficiels. Jusqu'à ces valeurs de F_1 , la surface libre est raisonnablement plane et la distribution des vitesses est régulière mais le rendement obtenu est très faible : c'est le pré-ressaut (figure 1.2.b).

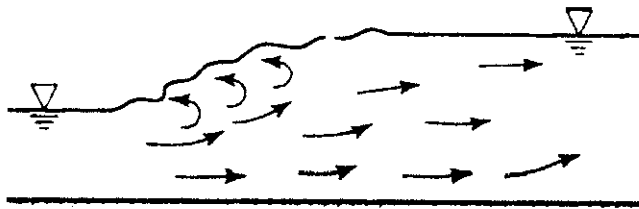


Figure 1.2.b : Le pré-ressaut

Pour des valeurs de $2.5 < F_1 < 4.5$ l'écoulement est pulsatif ; la plus grande turbulence se vérifie soit près de fond, ou à la surface : c'est le ressaut de transition (figure 1.2.c). Chaque pulsation produit une onde de période irrégulière, qui peut se propager sur plusieurs Kilomètres dans la nature, ce qui peut causer des dommages aux berges.



Figure 1.2.c : Le ressaut de transition

Pour des valeurs de $4.5 < F_1 < 9$, le ressaut est bien caractérisé et localisé. Ce type du ressaut est souvent adopté pour les bassins de dissipation d'énergie pour son bon rendement (45% et 70%) : c'est le ressaut stable (figure 1.2.d).

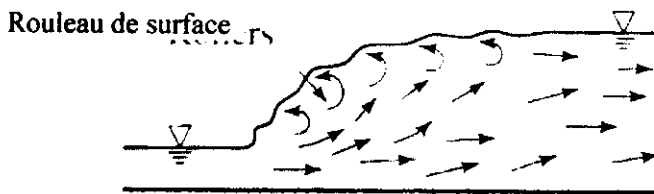


Figure 1.2.d : Le ressaut stable

Pour des valeurs de $F_1 > 9$, on constate des masses d'eau qui roulent par-dessous, au début du ressaut, et tombent sur le circuit rapide d'amont, d'une manière intermittente, provoquant des nouvelles ondulations en aval et la surface libre du ressaut est irrégulière : c'est le ressaut agité ou clapoteux (figure 1.2.e)

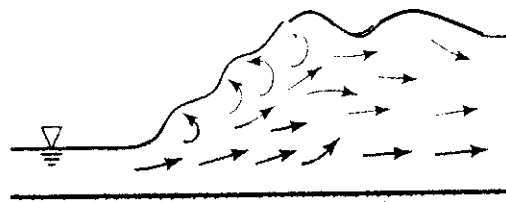


Figure I.2.e : Le Ressaut clapoteux

I.3.2.Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut

On ne peut pas appliquer le théorème de Bernoulli entre les sections 1 et 2 pour déterminer les profondeurs conjuguées du ressaut, étant donné que le terme ΔH_{12} , qui représente la perte de charge, n'est pas connu et que les formules du régime uniforme ne sont pas applicables. C'est le théorème d'Euler qui permet de résoudre ce problème.

Considérons un ressaut classique évoluant entre la section initiale et finale respectivement 1 et 2 (figure I.3).

Q

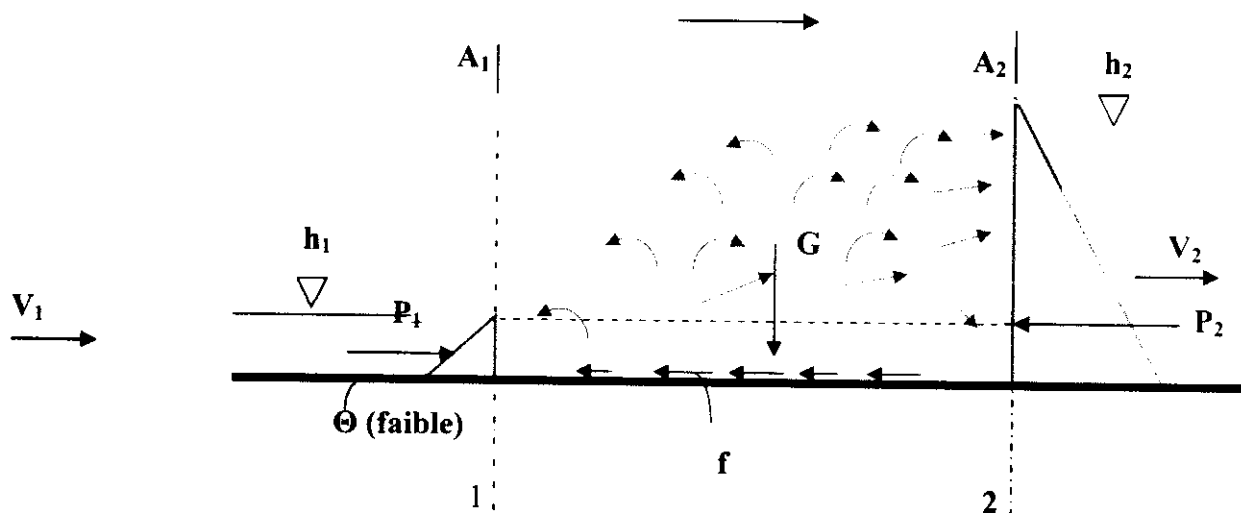


Figure I.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut

L'équation de continuité permet d'écrire : $V_1 = \frac{Q}{A_1}$ (1.1)

Où, Q est le débit volume et A_1 l'aire de la section mouillée initiale qui s'exprime par.

$$A_1 = b.h_1 \quad (1.2)$$

D'après le résultat classique dû à Bélanger (1828) qui s'obtiendra en appliquant le théorème d'Euler qui ne fait intervenir que les forces extérieures et qui ne met pas en cause les pertes de charges dues

à la turbulence et aux remous intérieurs. Donc l'auteur a appliqué ce théorème à la masse liquide contenue entre les sections (A_1) et (A_2) et a supposé :

la répartition des pressions dans les sections (A_1) et (A_2) est hydrostatique.

les frottements sur les parois et le fond du canal le long de la faible distance séparant (A_1) et (A_2) sont négligeables par rapport à la perte de charge due à la turbulence créée par le ressaut.

les vitesses des différents filets liquides dans chacune des sections (A_1) et (A_2) sont parallèles à la vitesse moyenne V , et considérées uniformes.

la résistance de l'air est négligeable.

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

$$\beta \rho Q V_2 - \beta \rho Q V_1 = P_1 - P_2 + G \sin \theta - f \quad (1.3)$$

Où :

β : facteur de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité. Puisque la répartition des vitesses est supposée uniforme.

ρ : la masse volumique du liquide en mouvement. Q : débit volume.

V : vitesse d'écoulement.

g : accélération de la pesanteur.

G : poids de la tranche liquide située entre 1 et 2. P_1 et P_2 : forces des pressions hydrostatiques.

θ : angle d'inclinaison du canal (pour un ressaut classique $\theta = 0^\circ$) f : force de frottement (considérée comme négligeable).

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

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

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

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

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

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (1.6)$$

Et en fin on a abouti à l'équation de Bélanger (1828), liant le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut au nombre de Froude F_1 , en réalité c'est une équation d'une droite représentée par figure (1.4).

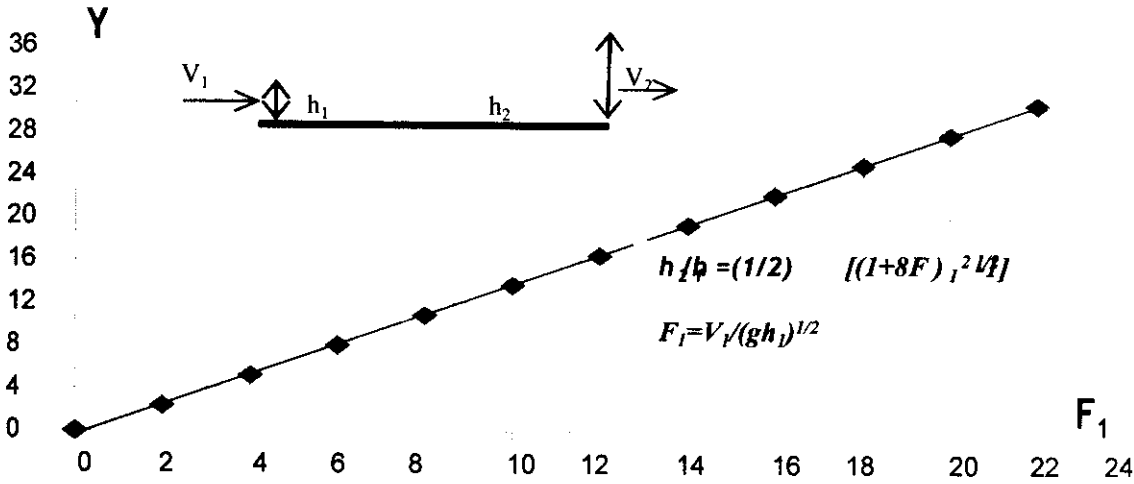


Figure I.4 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828)

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

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2} \tag{1.7}$$

I.3.3. Caractéristiques géométriques du ressaut

Les longueurs caractéristiques du ressaut défini ci-dessus L_r et L_j sont très difficiles à déterminer. En effet, il est généralement délicat de définir la fin du ressaut. Dans ce cas les auteurs ont employé la voie expérimentale pour évaluer ces grandeurs.

I.3.3.1. Hauteur du Ressaut

La hauteur du ressaut a été définie comme étant égale à: $h = h_2 - h_1$

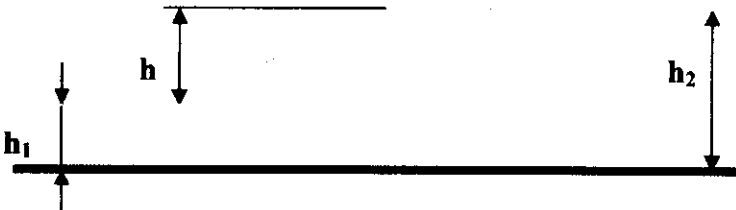


Figure I.5 : Hauteur du ressaut

I.3.3.2. Longueur du Rouleau

En 1990 Hager et al. définissent deux types de longueur du rouleau tous dépendent de forme ressaut étudié. En effet, ils ont introduit la notion de longueur du rouleau développé et non développé. La figure (1.6) illustre ces deux types du ressaut et les longueurs L_r qui correspondent.

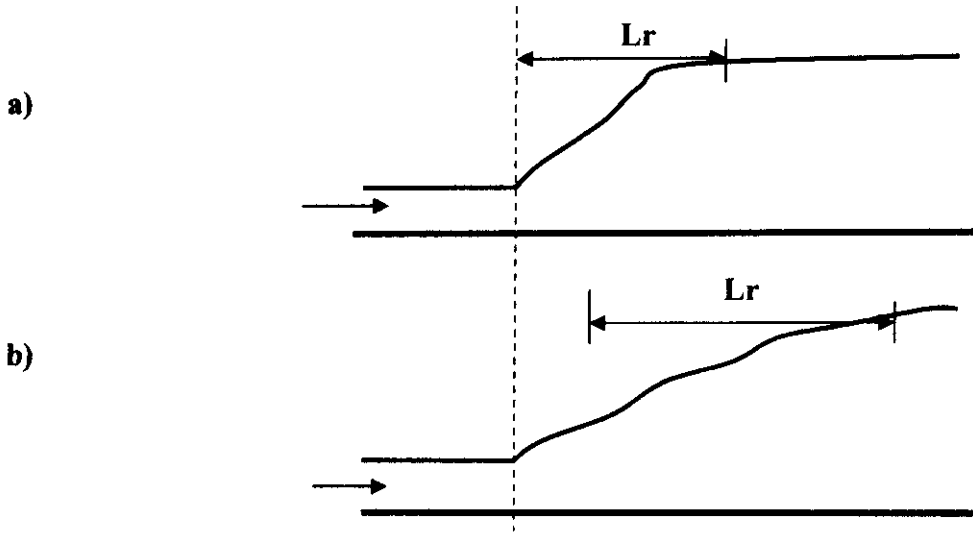


Figure I.6 : Aspect du ressaut classique
a) Rouleau développé, b) Rouleau nondéveloppé

La forme générale du rouleau développé est presque uniforme (figure 1.6.a). Par contre le rouleau non développé présenté par une surface libre perturbée sous l'effet des vagues qui se forment à l'aval (figure 1.6.b). De même le jet joignant la section initiale, se dirige vers la surface libre. Ce phénomène forme une turbulence au fond, est produite par l'effet de l'existence d'une zone de séparation au niveau de la masse liquide en mouvement.

Hager et al. (1990) et à la base des résultats expérimentaux ont proposé les relations ci-dessous qui montrent que, pour le ressaut classique, le rapport $\lambda_r = \frac{L_r}{h_1}$ est lié au nombre de Froude F_1 et au

rapport d'aspect. $w = \frac{h_1}{b}$

$$\lambda_r = -12 + 160. \text{Tgh} \left(\frac{F_1}{20} \right) \quad \text{pour } w = \left(\frac{h_1}{b_1} \right) < 0.1 \quad (1.8)$$

$$\lambda_r = -12 + 100. \text{Tgh} \left(\frac{F_1}{12.5} \right) \quad \text{Pour } 0.1 < w < 0.7 \quad (1.9)$$

«Tgh» indique la tangente hyperbolique.

Il faut noter ici que pour une gamme des valeurs de nombre de Froude $2.5 < F_1 < 8$ les auteurs ont proposé une relation plus simple que (1.8) et (1.9), celle-ci est de la forme d'une équation linéaire à pente 8.

$$\lambda_r = \frac{L_r}{h_1} = 8 \cdot (F_1 - 1.5) ; 2.5 < F_1 < 8 \quad (1.10)$$

I.3.3.3. Longueur du ressaut

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

la surface libre est pratiquement horizontale.

la surface de turbulence du rouleau est faible.

les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.

l'écoulement graduellement varie apparaît à l'extrémité aval du rouleau.

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

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

$$\frac{L_j}{h_1} = 220 \cdot \operatorname{Tgh} \left[\frac{(F_1 - 1)}{22} \right] \quad (1.11)$$

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

$$\frac{L_j}{h_2} = 6 \quad (1.12)$$

D'autres formules ont été proposées, pour un canal de section droite rectangulaire, selon Carlier (1984) on a :

- formule de Smetana (1933) $L_j = 6(h_2 - h_1) \quad (1.13)$

- Pour un nombre de Froude au-delà de $F_1 = 3$ selon Sinniger et Hager (1985), on peut également appliquer la formule empirique suivante.

$$\frac{L_j}{h_2} = \frac{35 \cdot F_1^2}{(8 + F_1)^2} \quad (1.14)$$

Et qui conduit aux mêmes résultats.

1.3.3.4. Rendement du ressaut

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

Par l'application du théorème de Bernoulli (1738) on peut déterminer la perte d'énergie,

$\Delta H_{12} = H_1 - H_2$ produite par le ressaut en admettant que $Z_1 = Z_2$ (canal horizontal), (figure 1.7), on obtient :

$$\Delta E_{12} = \Delta H_{12} = \left(\alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \right) - \left(\alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \right) \quad (1.15)$$

D'où : la charge totale dans la section amont est :

$$H_1 = \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \quad (1.16)$$

Et la charge totale dans la section aval est :

$$H_2 = \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \quad (1.17)$$

On désigne par : V_1 et V_2 les vitesses moyennes qui correspondent aux sections amont et aval du ressaut et le facteur de correction de l'énergie cinétique α est admis égale à l'unité.

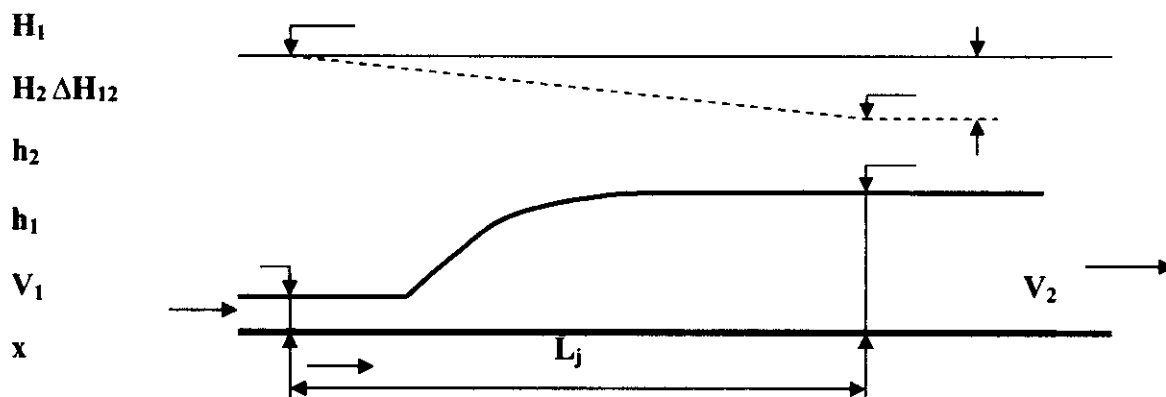


Figure I.7 : (----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

Puisque l'écoulement est permanent l'équation de la quantité de mouvement nous donne :

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (1.18)$$

Où: $A_1 = b \cdot h_1$

$A_2 = b \cdot h_2$

Donc on introduisant la relation (1.18) dans (1.15) on obtient, tous calcul faits, l'expression classique de la perte de charge due au ressaut en canal rectangulaire de pente faible ou nul.

$$\Delta H_{12} = (h_1 - h_2) + \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) \cdot \left(\frac{q^2}{2g} \right) \quad (1.19)$$

$q = \frac{Q}{b}$ est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'expression de la quantité de mouvement définie par la relation (1.4).

$$\frac{q^2}{2g} = \frac{(h_1 h_2^2 + h_1^2 h_2)}{4} \quad (1.20)$$

On remplaçant la relation (1.20) dans (1.19) on obtient :

$$\Delta H_{12} = \frac{(h_2 - h_1)^3}{(4h_2 h_1)} \quad (1.21)$$

Donc à partir de la relation (1.21) on peut conclure la perte de charge due au ressaut classique et ne dépend que des hauteurs conjuguées. La capacité de dissipation du ressaut est représentée par η :

$$\eta = \frac{\Delta H_{12}}{H_1} = \frac{(H_1 - H_2)}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (1.22)$$

Le rapport $\frac{H_2}{H_1}$ est appelé efficacité du ressaut. Donc pour déterminer les charges totales dans les

sections amont et aval on utilise les relations (1.16) et (1.17) et en tenant compte de la relation (1.5) du nombre de Froude on obtiendra :

$$H_1 = h_1 \cdot \left[1 + \frac{F_1^2}{2} \right] \quad (1.23) \quad H_2 = h_1 \cdot \left[Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right] \quad (1.24)$$

Où Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par la relation (1.6) de Bélanger (1828). En remplaçant (1.23) et (1.24) dans l'expression du rendement du ressaut (1.22) on obtiendra :

$$\eta = 1 - \left[\frac{\left(Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right)}{\left(1 + \frac{F_1^2}{2} \right)} \right] \quad (1.25)$$

Hager et Sinniger (1986) ont proposé une expression approchée qui nous permet de calculer simplement le rendement du ressaut est cela pour un nombre de Froude $F_1 > 2$.

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2 \quad (1.26)$$

Les relations (1.25) et (1.26) sont représentées graphiquement sur un système des coordonnées cartésiennes, illustrés par la figure (1.8)

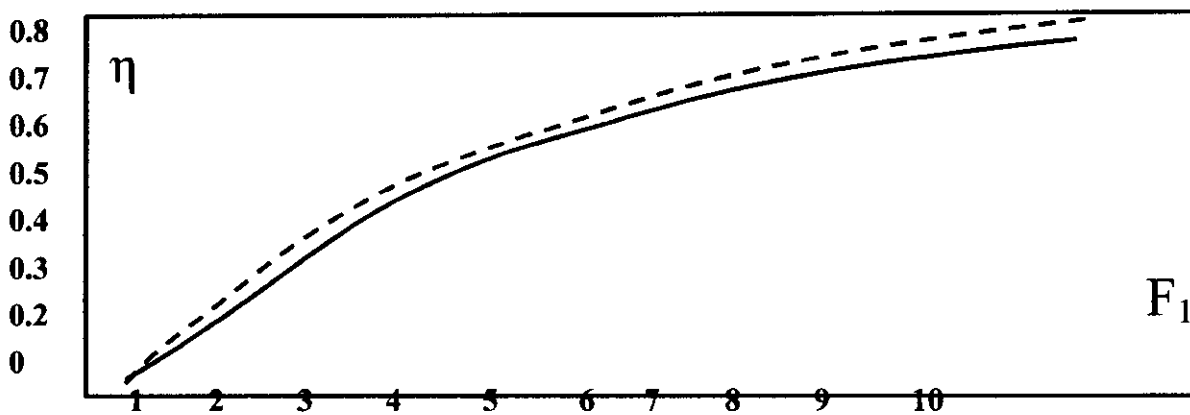


Figure 1.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 (—)
 Courbe tracée selon la relation (1.25), (-----) courbe tracée
 Selon la relation (1.26)

D'après l'analyse de la courbe $\eta = f(F_1)$ nous constatons que le rendement η du ressaut classique est supérieur à 50 % pour une valeur de nombre de Froude $F_1 \geq 5.1$ et que les rendements calculés par l'application de la relation (1.26) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.25) d'autre par; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

I.4. CONCLUSION

Ce chapitre a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire. Nous avons examiné les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau et le rendement. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut.

Chapitre II:RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR A PAROI EPAISSE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

II.1. INTRODUCTION

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse, continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative. Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau à l'aval, de contrôler sa position lors de changements des paramètres de l'écoulement tels que les débits et contribuer enfin à une meilleure compacité du bassin.

Ce chapitre a pour but de présenter les travaux les plus intéressants entrepris sur le ressaut hydraulique contrôlé par seuil continu à paroi épaisse évoluant dans un canal de section droite rectangulaire, où il sera question des travaux de FORSTER et SKRINDE (1950) et ceux de ACHOUR (1995).

II.2. APPROCHE DE FORSTER et SKRINDE

Le seuil est considéré comme épais lorsque le profil liquide s'y écoulant est presque parallèle au fond, pour peu que la longueur L du seuil soit suffisante (figur II.2.1). La notion de seuil épais est également liée aux caractéristiques de l'écoulement et suivant la classification de RAO et MURLIDHAR (1963), le seuil est considéré comme étant épais lorsque :

$$0,1 \leq (h_2 - s) \leq 0,35 \quad (2.1)$$

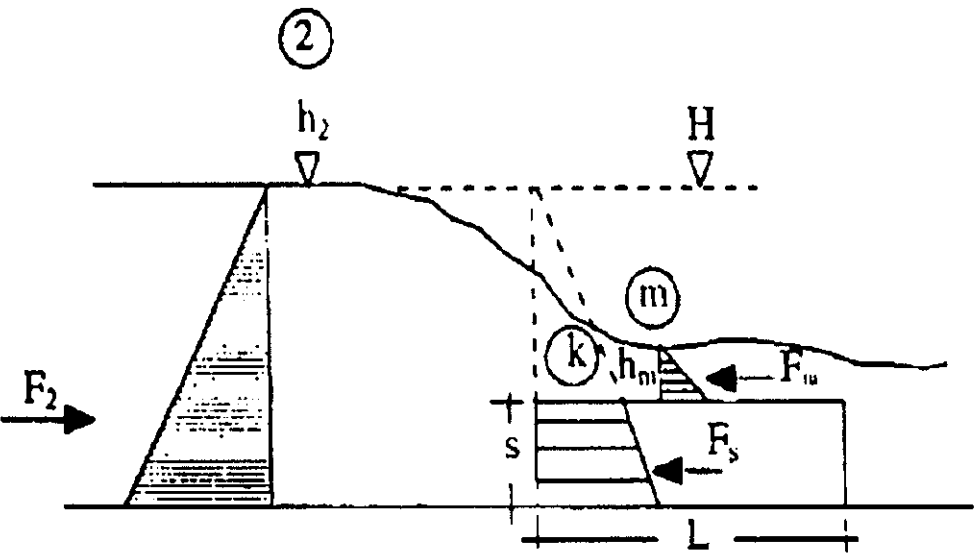


Figure II.1: Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.

Dans la section 2, l'écoulement est en régime fluvial de profondeur h_2 . Le seuil est ensuite franchi par un écoulement en régime critique de profondeur k , suivi d'une tranche en régime torrentielle dont la profondeur finale h_m est minimale (section m).

L'étude théorique basée sur l'équation de la quantité de mouvement, appliquée entre la section initiale du ressaut et la section au droit du seuil, a abouti à une relation fortement implicite liant la hauteur relative s/h_1 du seuil et le nombre de Froude F_1 (relation II.2). Le paramètre x/h_2 n'a ainsi théoriquement aucune influence sur le contrôle du ressaut.

$$\frac{21.33.F_1^2}{\sqrt{1+8F_1^2}-1} = \frac{(\sqrt{1+8F_1^2}-1-2.S/h_1)^3}{(\sqrt{1+8F_1^2}-1+2.S/h_1)} \tag{2.2}$$

Contrairement au cas du seuil à paroi mince, une seule courbe est obtenue (figure II.2) traduisant la variation de s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 . Cette courbe peut être utilisée à condition que : $h_3 < (2.h_2 + s)/3$

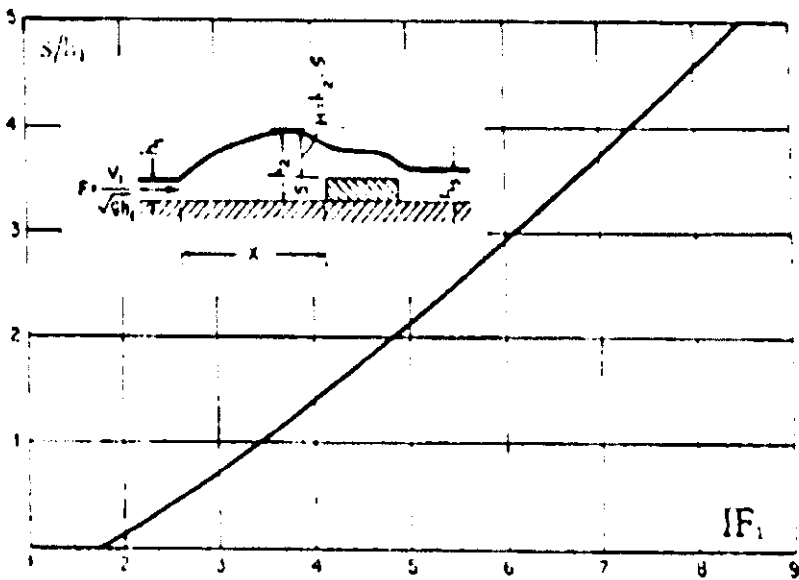


Figure II.2: Variation expérimentale du nombre de Froude IF_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation (II.2).

2.3. Approche de ACHOUR

2.3.1 Configuration avec vanne de fond

La configuration de base permettant l'analyse de ACHOUR (1997) est représentée à la figure II.12, montrant un ressaut à l'aval d'une vanne de fond suivie d'un seuil à paroi épaisse de hauteur s et franchie par un écoulement en régime critique de profondeur k .

Les charges totales dans les sections initiale et finale du ressaut sont respectivement (en considérant le facteur de correction de l'énergie cinétique) égales à l'unité :

$$H_1 = h_1 + v_1^2 / (2.g) \quad (2.3)$$

$$H_2 = h_2 + v_2^2 / (2.g) \quad (2.4)$$

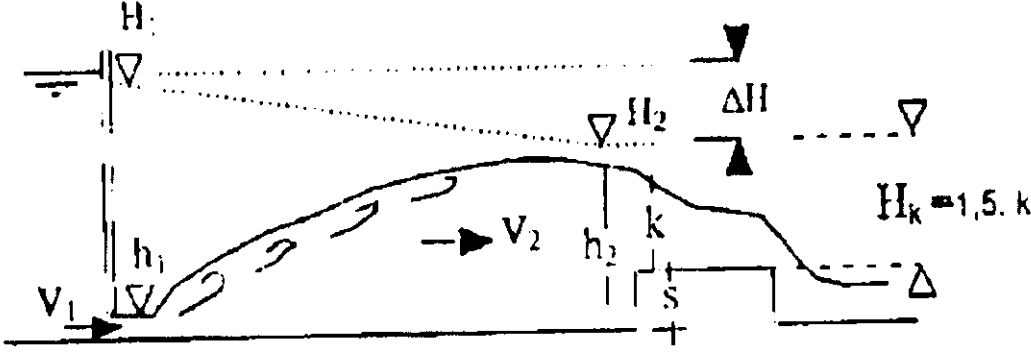


Figure II.3: Ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse à l'aval d'une vanne de fond, selon ACHOUR (1998) .

La figure I.4 permet d'écrire que :

$$H_2 = s + 1,5.k \quad (2.5)$$

La perte de charge ΔH due au ressaut est égale à la différence des charges H_1 et H_2 :

$$\Delta H = H_1 - H_2 \quad (2.6)$$

La combinaison des relations (II.5) et (II.6) donne :

$$\Delta H = H_1 - (s + 1,5.k) \quad (2.7)$$

En introduisant les paramètres adimensionnels $\delta = \Delta H/k$, $\Phi_1 = H_1/k$ et $h = h_1/k$ la relation (II.7) s'écrit :

$$Sh_1 = (\Phi_1 - \delta - 3/2)/h_1 \quad (2.8)$$

Le paramètre adimensionnel h_1 est identique au paramètre ϕ défini par LAPRAY par l'expression suivante :

$$\phi_2 = [\phi_1^2 / 4 + 2/\phi_1]^{1/2} - \phi_1/2 \quad (2.9)$$

La variation de Φ_1 , liée à la charge totale H_1 peut aisément s'écrire :

$$\Phi_1 = \phi_1 + 1/(2/\phi_1) \quad (2.10)$$

De même, la variation adimensionnelle δ est liée à la perte de charge ΔH due au ressaut définie par (II.18) :

$$k.\delta = \Delta H = (h_2 - h_1)^3 / (4h_2h_1) \quad (2.21)$$

Cette dernière relation s'écrit en fonction des paramètres ϕ_1 et ϕ_2 :

$$\delta = \frac{(\phi_2 - \phi_1)^3}{4\phi_1 \cdot \phi_2} \quad (2.11)$$

Ainsi, en tenant compte des relations (2.9), (2.10) et (2.11), on peut énoncer que la hauteur s/h_1 du seuil définie par (2.8) ne dépend que des paramètres ϕ_2/ϕ_1 , il est donc possible d'exprimer la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction de Y et de F_1 .

$$F_1^2 = Q^2 / (g \cdot b \cdot h_1^3) = k^3 / h_1^3 = \phi_1^3 \quad (2.12)$$

$$\text{Soit } \phi_1 = F_1^{-2/3}$$

La variable ϕ_2 , liée à la charge totale finale H_2 à l'aval du ressaut, s'écrit comme pour le cas de ϕ_1 :

$$\phi_2 = \phi_1 + 1/(2 \cdot \phi_1^2) \quad (2.13)$$

$$\phi_1 = Y \cdot \phi_1 + 1/(2 \cdot Y \cdot \phi_1^2) \quad (2.14)$$

En tenant compte des variables Φ_1 et Φ_2 , la perte de charge relative δ due au ressaut s'écrit :

$$\delta = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (2.15)$$

Le relation (2.8) devient alors :

$$s/h_1 = (\Phi_2 - 1,5) / \phi_1 \quad (2.16)$$

La combinaison des relations (2.12), (2.14) et (2.16) permet d'exprimer la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude IF_1 et du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut :

$$s/h_1 = Y + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{F_1}{Y} \right)^2 \cdot \frac{2}{3} \cdot F_1^{\frac{2}{3}} \quad (2.17)$$

Cette relation présente trois paramètres adimensionnels : s/h_1 , IF_1 et Y ; les deux derniers étant liés entre eux par l'équation de BELANGER:

$$Y = h_2/h_1 = 0,5 \cdot [(1 + 8 \cdot IF_1^2)^{1/2} - 1] \quad (2.18)$$

Les relations (2.17) et (1.5) montrent que la hauteur relative s/h_1 n'est fonction que d'une seule variable, Y ou IF_1 .

Pour la valeur de $IF_1 = 1$, représentant la condition d'un écoulement critique, la relation (2.18) indique que $Y = 1$. Par suite, en vertu de (2.17), la hauteur relative s/h_1 du seuil est nulle.

La relation (2.17) proposée par ACHOUR tient compte de la hauteur capable de la vitesse à l'aval du ressaut. Cette démarche paraît être plus rigoureuse que celle entreprise par FORSTER et SKRINDE (1950) pour le cas d'un seuil à paroi épaisse. En outre, la hauteur relative s/h_1 du seuil épais peut être ainsi déterminée de manière explicite, contrairement à la relation (2.2) établi par FORSTER et SKRINDE (1950).

2.3.2. Configuration avec déversoir standard

Une autre configuration du ressaut prenant naissance au pied aval d'un obstacle tel qu'un déversoir standard (figure 2.5), a également fait l'objet d'une étude proposée par ACHOUR (1997).

L'écoulement à l'amont du seuil S_1 est en régime fluvial et torrentiel sur le parement aval. Le passage de l'écoulement fluvial à l'écoulement torrentiel se traduit par l'application d'une section de contrôle (ou section critique) au droit même du seuil.

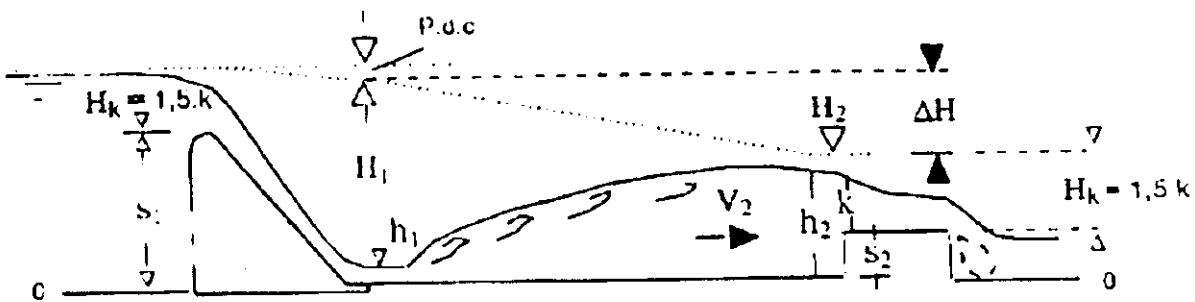


Figure II.4: Ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse à l'aval d'un déversoir standard. P.d.c : pertes de charge sur le parement aval du déversoir.

La mise en place à l'aval de l'écoulement d'un second seuil (mince ou épais) de hauteur s_2 provoque l'apparition d'un ressaut. Le seuil de hauteur s_2 est à son tour franchi par un écoulement critique, comme pour le cas de la configuration avec vanne de fond.

En négligeant toutes les pertes de charges autres que celles dues au ressaut, la figure 2.5 permet alors d'écrire que :

$$H_1 = s_1 + 1,5.k$$

$$H_2 = s_2 + 1,5.k \quad (2.19)$$

$$\text{Soit : } H_1 - H_2 = s_1 - s_2 = \Delta H$$

Ainsi, la perte de charge due au ressaut s'exprime par la différence des hauteurs des seuils s_1 et s_2 . Le système d'équations (2.18) peut aisément s'écrire sous la forme adimensionnelle

$$s_1 = (\Phi_1 - 1,5).k \quad (1)$$

$$s_2 = (\Phi_2 - 1,5).k \quad (2) \quad (2.19)$$

$$\text{et par suite : } \delta = (\Phi_1 - \Phi_2) = (s_1 - s_2)/k \quad (3)$$

δ , Φ_1 et Φ_2 sont des paramètres identiques à ceux utilisés lors de l'étude du ressaut contrôlé par seuil en présence d'une vanne de fond. La combinaison des relations (2.19)₁, (2.19)₂ et (2.19)₃ permet d'écrire :

$$1 - \frac{s_2}{s_1} = \frac{\delta}{\Phi_1 - 1,5} \quad (2.20)$$

$$\text{avec } \delta = \Delta H/k \text{ et } \Phi_1 = H_1/k$$

Comme il a été montré, δ et Φ ne dépendent que de la variable $\varphi = h_1/k$ et le paramètre adimensionnel $S = (1 - s_2/s_1)$, lié à la hauteur géométrique des seuils situés à l'amont et à l'aval du ressaut, l'est donc aussi. Pour que le ressaut puisse se former, il est nécessaire que s_2 soit strictement inférieur à s_1 et l'on peut écrire alors que : $0 < S < 1$ (2.21)

La relation (2.21) sert à évaluer la hauteur s_2 nécessaire à la formation du ressaut dans la position indiquée sur la figure 2.5. Les paramètres connus du problème sont :

Q le débit volume évacué par l'ouvrage, b la largeur du canal rectangulaire, h_1 la hauteur initiale du ressaut et s_1 la hauteur du déversoir standard.

Les trois premiers paramètres ci-dessus indiqués permettent le calcul de la variable φ_1 , lié au nombre de Froude IF_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut par la relation (2.12).

A partir de la valeur calculée de φ_1 , l'application successive des équations (2.9), (2.12) et (2.15) donne le paramètre adimensionnel S et par suite la valeur recherchée de la hauteur s_2 nécessaire à la formation du ressaut.

La relation (2.19) est cependant fortement implicite et une relation approchée est proposée (relation 2.21) dans laquelle S est fonction des hauteurs géométriques du déversoir standard et du seuil ainsi que la hauteur relative φ_1

$$S^{9/8} + \varphi_1^{9/8} = 1 \text{ avec } S = 1 - s_2/s_1 \quad (2.22)$$

2.4. CONCLUSION

Ce chapitre a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire où nous avons passé en revue les travaux de FORSTER et SKRIDE (1950) et ceux de ACHOUR (1998).

L'étude de FORSTER et SKRINDE a montré que l'application de l'équation de quantité de mouvement est possible dans le cas du seuil à paroi épaisse dénuyée. En se basant sur cette dernière équation appliquée entre les sections initiale et finale du ressaut et la section au droit du seuil pour laquelle la hauteur de l'écoulement est minimale, les auteurs proposent une relation analytique implicite qui lie la hauteur relative s/h_1 du seuil épais au nombre de Froude F_1 ; Contrairement au cas du seuil épais, une seule courbe est alors obtenue.

L'étude du ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse franchi par un écoulement en régime critique a été également effectuée par ACHOUR (1998). Deux configurations ont été examinées; l'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est crée d'abord par la mise en place d'une vanne de fond et enfin par un déversoir standard.

Concernant la configuration avec la vanne de fond, le développement théorique a mené à l'établissement d'une relation explicite permettant d'évaluer la hauteur relative s/h_1 du seuil épais en fonction du nombre de Froude F_1 .

Pour le cas du ressaut précédé d'un déversoir standard, l'étude théorique a montré que le nombre de Froude F_1 est lié implicitement au paramètre adimensionnel $S=1- s_2/s_1$ dans lequel s_2 représente la hauteur géométrique du seuil épais et s_1 celle du déversoir standard.

CHAPITRE III:RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE COMPOSEE

III.1. Introduction

L'étude des écoulements uniformes, ou plus encore les écoulements non uniformes en lit composé sont très compliqués à cause du transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al. 2005). Ces deux phénomènes, se manifestant de différentes façons, sont des sources de dissipation d'énergie supplémentaire de l'écoulement.

Il peut être donc intéressant de voir la grandeur de ces dissipations dans le cas où il se produit un ressaut hydraulique dans le lit composé. Il est plus intéressant d'autant plus que le ressaut hydraulique est utilisé justement pour la dissipation d'énergie. Cette dissipation supplémentaire est donc la bienvenue. En s'inspirant du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, une approche théorique est proposée dans ce présent travail pour déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en lit composé. Le rendement du ressaut est lui aussi quantifié. Toutes les équations sont présentées en termes adimensionnels afin de leur donner un caractère de validité général.

III.2. Rapport des hauteurs conjuguées

La figure (III.1) montre les différentes caractéristiques géométriques et hydrauliques du ressaut hydraulique en lit composé droit.

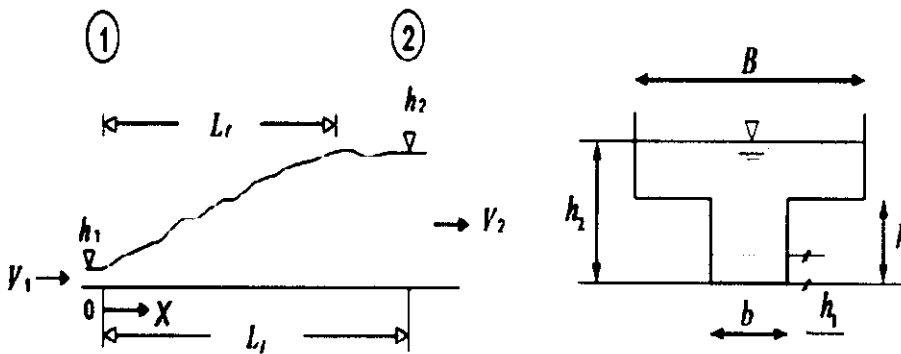


Figure III.1 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit

Le transfert de masse et de quantité de mouvement se produit à l'interface entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al. 2004).

L'équation de la quantité de mouvement appliquée entre le pied et la fin du ressaut, défini par la figure 3.1, s'écrit comme suit :

$$\rho Q(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = f_1 - f_2 \quad (3.1)$$

En s'inspirant de l'article de Achour (2000), par analogie à la relation de Bernoulli-Carnot et au vue de la forme de la relation 1, il paraît admissible de rajouter une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement aurait comme expression :

$$f_x = -k\omega(h_2 - h)^x h_1^y (B - b)^z \quad (3.2)$$

C'est une source de perte de charge liée nécessairement au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur. Les exposants x , y et z sont liés par la relation $x + y + z = 3$, le coefficient k est tel que $k = \phi(L_j \text{ ou } L_r, h_2, h_1, h)$.

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

$$\rho Q^2(1/A_2 - 1/A_1) = f_1 - f_2 + f_x \quad (3.3)$$

Analysons l'équation pour la fonction $f_x = (1/2)\omega(h_2 - h)h_1(B - b)$: L'hypothèse d'une distribution uniforme pour les vitesses dans les sections transversales correspondant au pied et à la fin du ressaut implique que $\beta_1 = \beta_2 = 1$. Les sections A_1 et A_2 sont données respectivement par : $A_1 = bh_1$ et $A_2 = B(h_2 - h) + bh$. Prenons comme hypothèse aussi que la distribution des pressions est hydrostatique dans les sections 1 et 2 du ressaut, ce qui donne les expressions des forces :

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

En tenant compte de toutes ces hypothèses et informations ainsi que de l'équation de continuité, $V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q$, l'équation (3.3) s'écrit en définitive, après réarrangement, comme suit :

$$2Fr_2^2 \left(\frac{\beta}{\gamma - (2 - \beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2\gamma - 1)\tau}{\beta} \left(\frac{\gamma - 1}{\beta} \right)^2 \left(\gamma - \frac{1}{\beta} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (3.4)$$

$$\text{Où : } Fr_1 = \frac{Q}{\sqrt{b^2 h_1^3 g}} \quad (3.5)$$

En négligeant la force de résistance f_x , l'équation résultante aurait comme expression :

$$2Fr_1^2 \left(\frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{2Y-1/\tau}{\tau} - \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} \quad (3.6)$$

Les relations (3.3) et (3.4) sont des équations fonctionnelles de forme $\phi(Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$.
Notons que les équations (3.4) et (3.6) peuvent s'écrire sous la forme $Y^3 + aY^2 + bY + c = 0$.

En faisant le changement de variable $Y = x - a/3$, l'équation de troisième degré devient sous la forme $Y^3 + pq + q = 0$ dont la résolution peut se faire aisément en utilisant la méthode trigonométrique.

La figure (3.2) illustre la variation de Y , calculé par l'équation (3.6), en fonction de Fr_1 . L'une des variables, β ou τ , est fixée, l'autre varie avec un pas de 0,2. Pour que le ressaut se produise effectivement dans le canal composé ($h_2 > h$), les valeurs de Fr_1 à considérer doivent

être strictement supérieures à la valeur minimale $Fr_{1min} = \left[\frac{1}{(2\sqrt{2})} \right] \sqrt{\left(\frac{2}{\tau} \right)^2} - 1$ correspondant à ($h_2 = h$).

On s'aperçoit de ces figures, que pour un τ donné, Y augmente continuellement avec l'accroissement de Fr_1 . L'augmentation du rapport Y en fonction de Fr_1 est plus rapide pour de grandes valeurs de β . Pour un Fr_1 fixé, Y croît avec l'accroissement de β et diminue avec l'augmentation de τ .

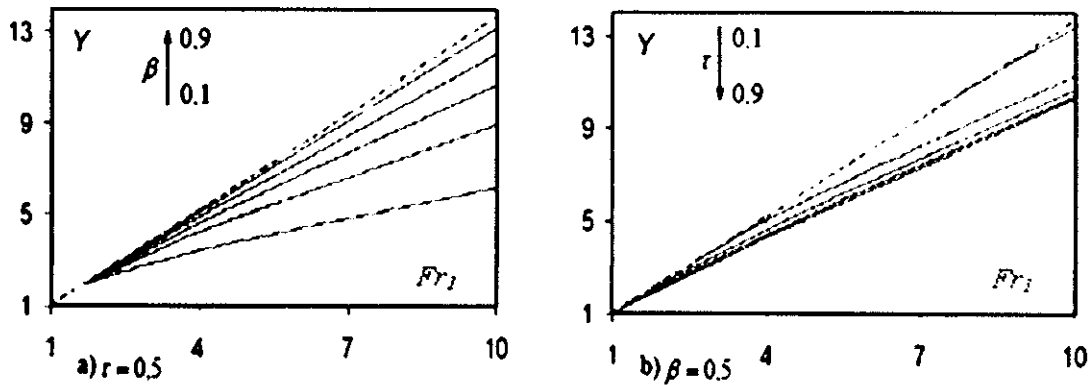


Figure III.2 : Variation de Y , calculé par (3.4), en fonction de Fr_1 . (---): $\beta = 1$.

Sur la figure 3.2, nous avons représenté la variation de Y en fonction de Fr_1 pour $\beta = 1$ et $\tau = 0.5$. On voit clairement que les Y calculées en tenant compte de la forme de la surface exposée sont inférieures à celles calculées en l'a négligeant. La différence est plus claire au fur et à mesure que le nombre de Froude Fr_1 augmente. La force F_s traduit les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

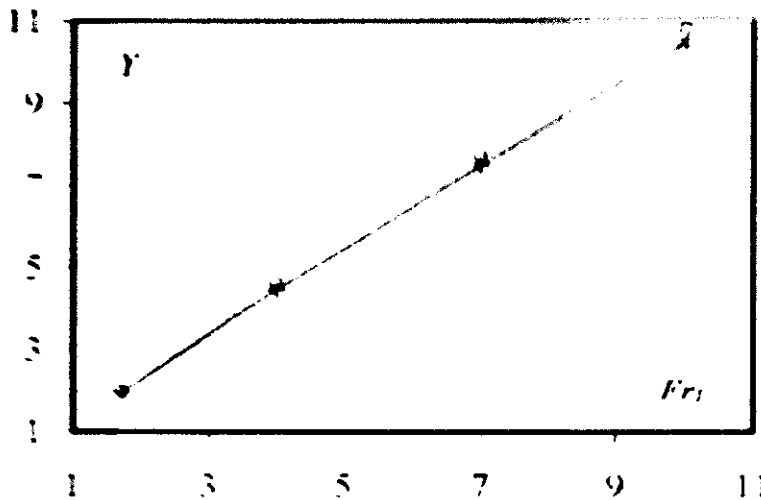


Figure III.3 : Variation de Y en fonction de Fr_1 . (o) : équation (3.6), (—) : équation (3.4).

III.3. Rendement du ressaut

En considérant les mêmes hypothèses que pour le rapport des hauteurs conjuguées, le rendement $\eta = \Delta H / H_1$ peut s'exprimer par :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{Fr_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + Fr_1^2/2} \quad (3.7)$$

L'équation (3.7) permet le calcul, d'une manière explicite, le rendement du ressaut se produisant en lit composé droit, connaissant Fr_1 , Y ainsi que β et τ . En considérant les valeurs de Y calculées avec la relation (3.6), nous avons représenté sur la figure (3.4) la variation de η en fonction de Fr_1 . Pour un τ et un β fixés, il est clairement illustré sur la figure que le rendement η d'un ressaut hydraulique dans un lit composé, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de Fr_1 .

Pour un τ donné, en fixant Fr_1 , η diminue avec l'augmentation de β . Or, si β est fixé, on peut aisément voir que le η augmente avec l'accroissement de τ .

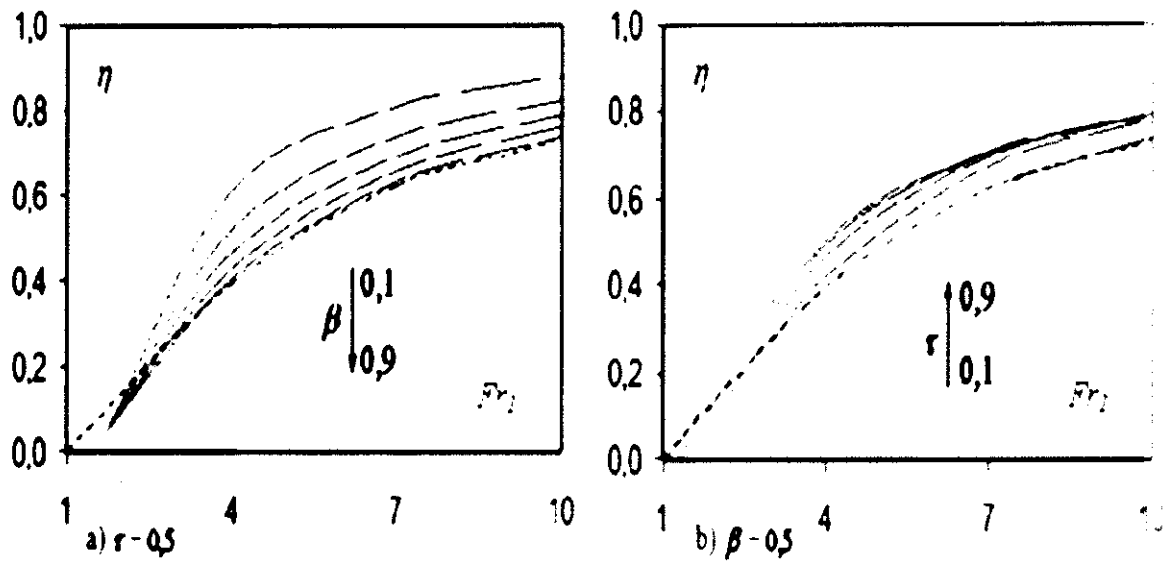


Figure III.4 : Variation de η en fonction de Fr_1 . (---): $\beta = 1$. η est calculé par l'équation (3.3).

Sur la figure (3.5) est représentée la variation de η en fonction de Fr_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. Il est bien illustré que les η calculés en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont supérieures à celles calculées en l'a négligeant.

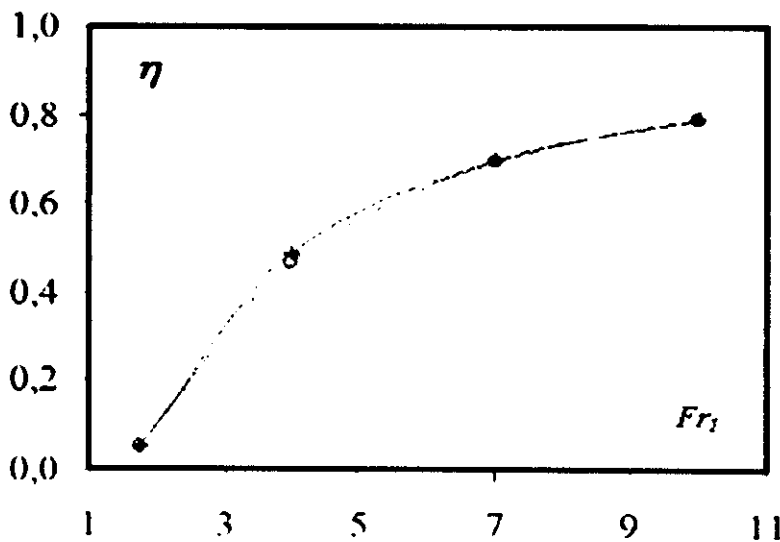


Figure III.5 : Variation de η en fonction de Fr_1 . (0) : équation (3.2), (+) : équation (3.1)

III.4. Conclusion

L'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal composé droit a aboutit à une équation fonctionnelle de forme $\phi(Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$. Une nouvelle approche est proposée en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans nos développements, les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapprochées de la réalité.

Afin de trouver l'expression définitive de cette force de résistance, étroitement liée au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures, sur modèle réduit au laboratoire, sont indispensables.

CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

A travers cette partie bibliographique, nous avons tenté de présenter les travaux les plus entrepris et qui sont étroitement liés à notre sujet d'études, au regard de notre thématique intitulé : contribution à l'étude de l'effet du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée aux caractéristiques hydraulique de l'écoulement.

Notre partie bibliographique est scindée en trois chapitres .

le premier chapitre a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire. Nous avons présenté les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiales et finales, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut.

Pour le second chapitre on a traité le ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince dans un canal rectangulaire qui a été expérimentalement testé. Lorsque le seuil est placé à une distance X environ égale à la longueur L_r du ressaut, l'analyse des mesures expérimentales a montré que la hauteur relative S du seuil est comme suit:

$S = C_o.(F_1 - 1)^{5/4}$. Le paramètre C_o est linéairement dépendant de la position relative X/h_2 du seuil.

Pour le cas d'un seuil dénoyé placé à une distance X environ égale à la longueur L_j du ressaut, l'étude a pu définir les fonctions $\xi(Y, S) = 0$ et $\zeta(F_1, S) = 0$, ainsi que la position relative X/h_1 du seuil nécessaire à la formation complète du ressaut.

Une nouvelle approche théorique du ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse a été proposée pour le cas d'un écoulement incident généré par la mise en place d'un déversoir. Le développement théorique a montré, à travers une relation cependant implicite, que le nombre de Froude F_1 était lié à la hauteur géométrique du déversoir et du seuil. Une étude détaillée de la fonction obtenue a permis de conclure que celle-ci était involutive et une excellente relation approchée a été proposée.

enfin le dernier chapitre une application de l'équation de la quantité de mouvement au

CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

ressaut hydraulique dans un canal composé droit a été aboutit de forme $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

Une nouvelle approche est proposée en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans leurs développements, les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapprochées de la réalité.

INTRODUCTION

Dans cette partie de notre étude, on va examiner expérimentalement l'effet du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée aux caractéristiques de l'écoulement

La recherche bibliographique a montré que le déplacement du seuil vers l'aval provoque la compacité du ressaut et conduit à plusieurs configurations de celui-ci (Debabeche 2003). Ces constatations mènent à trouver des relations empiriques adimensionnelles liant les différentes caractéristiques du ressaut au rapport de compacité $\gamma = L_r/x$, défini comme le rapport de la longueur du rouleau L_r^* et de la position x du seuil.

En effet, notre quatrième chapitre sera consacré pour exposer une description détaillée du modèle expérimental, et de faire la description des essais des différents appareillages des mesures utilisées. L'analyse expérimentale et de l'effet du seuil contenu à paroi mince sur le ressaut hydraulique en un canal rectangulaire de forme composé. Ce type de ressaut n'a connu que très peu d'étude. Les travaux les plus reconnus sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire de section composé sont ceux effectués par (Khattaoui et Achour 2012).

Notre but fondamental est d'établir des relations expérimentales adimensionnelles exprimant la variation de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil ainsi que celle du rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut et hauteur relative du ressaut hydraulique (L_j/h_1) et celle du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction du débit relatif Q^* pour le lit mineur et celui majeur.

A travers cette contribution expérimentale on va analyser l'effet du seuil sur les caractéristiques du ressaut hydraulique et pour atteindre cet objectif deux cas seront présentées : cas où l'écoulement s'effectuera au niveau du lit mineur du canal, et le deuxième cas, où le ressaut se forme au lit majeur. Des relations fonctionnelles seront établies, exprimant en termes adimensionnels.

Chapitre IV :DESCRIPTION DU MODEL EXPERIMENTAL

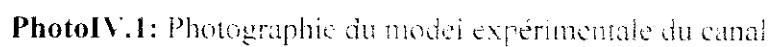
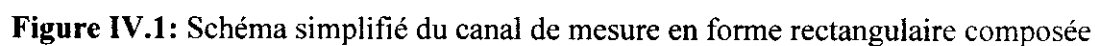
IV.1 INTRODUCTION

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.

IV.1.1 DESCRIPTION DU CANAL

Les expériences ont été menées dans un canal à surface libre représenté sur la figure (IV.1) et la photo (IV.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 (IV.3) qui alimente un convergent en charge (permettant de générer un écoulement à grande vitesse) photo (IV.6), débouchant dans le canal de mesure. On dispose ici d'un canal horizontal de section rectangulaire composée, de longueur 5 m et de hauteur $h_1=2; 2.5; 3; 3.5; 4$ cm a 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 (IV.5), permettant la mesure du débit.



Chapitre IV DESCRIPTION DU MODEL EXPERIMENTAL

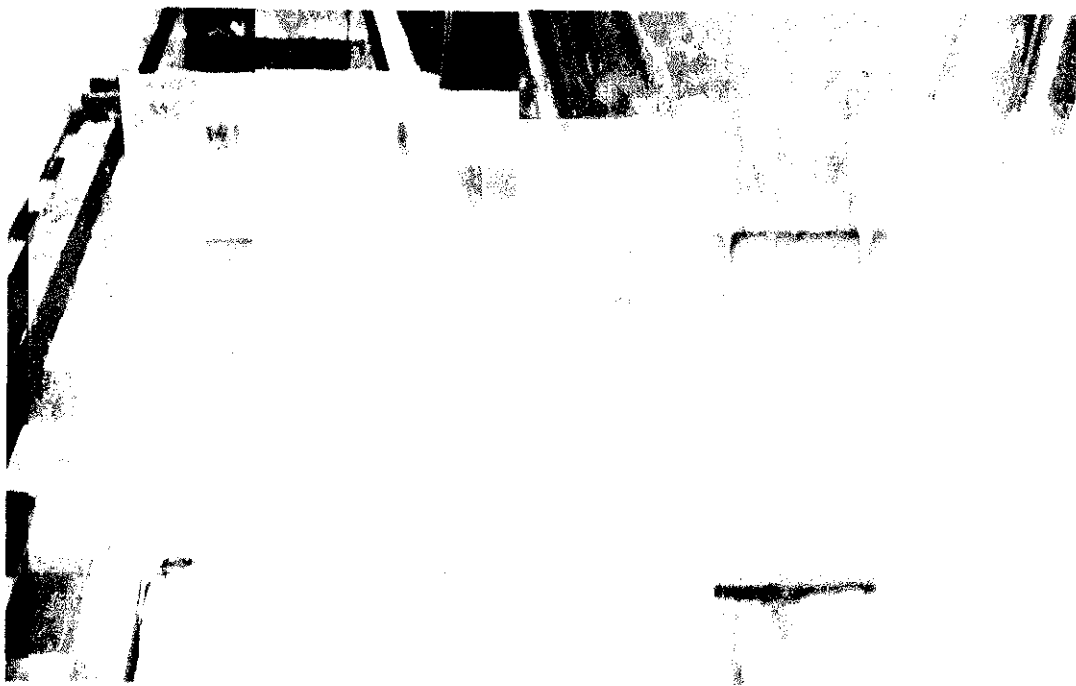


PhotoIV.2: Pompe centrifuge axial



PhotoIV.3: Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit

En ce qui concerne les mesures des débits Q , nous avons utilisé le débitmètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de *HachemiKachdi I* (2006)



PhotoIV.4; Sectionde controle **Photo I.5:** Photographie de convergent



PhotoIV.6 : Photographie d'une boîte en charge

IV.2 Limnomètre:

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 figure (IV.8).

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.

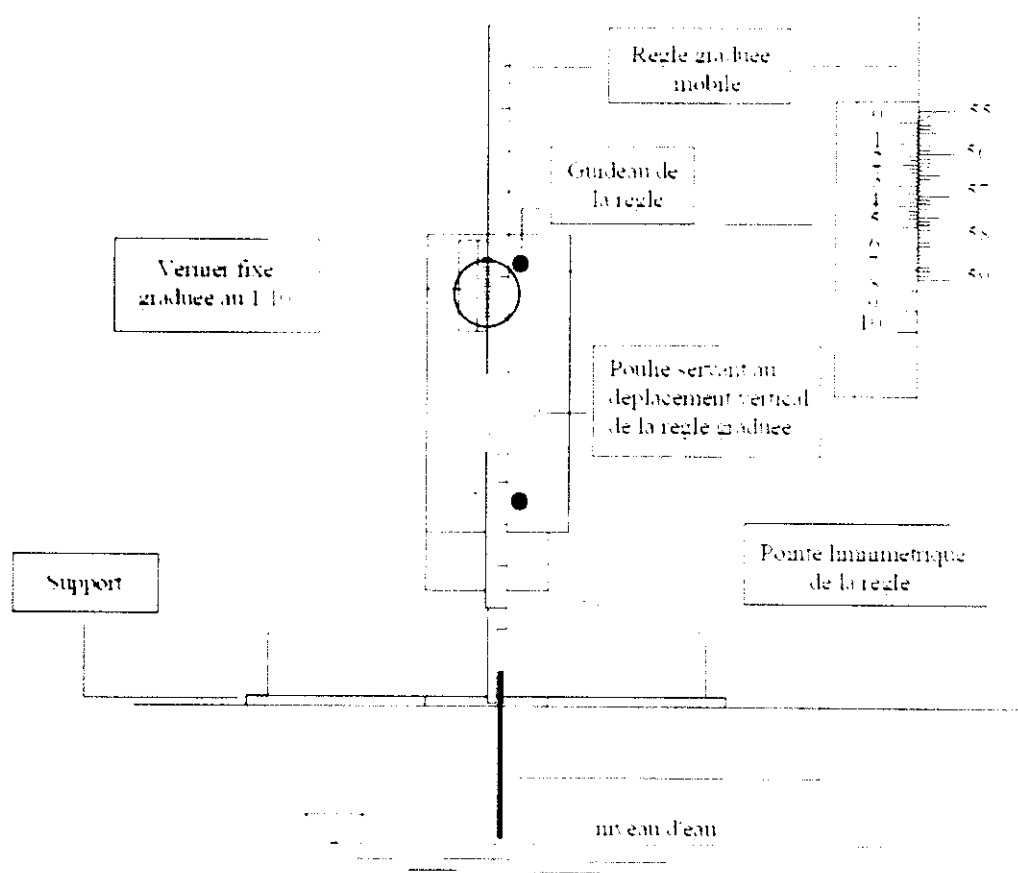
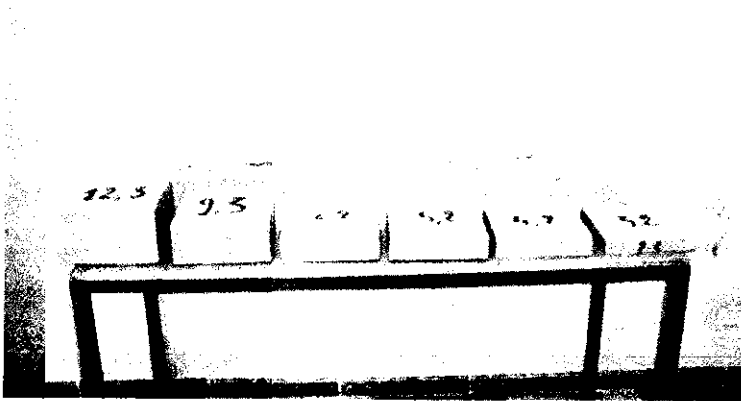


Figure IV.2: Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnométrique

IV.3. Les Seuils épais

Une série de 16 seuils métallique de forme rectangulaire de longueur 20 cm (photo IV.12) utilisés dans notre dispositif expérimental, de différentes hauteurs: $s = 3.4\text{ cm}$; 4.5 cm ; 5.4 cm ; 6.5 cm ; 8 cm ; 9 cm ; 10.1 cm ; 10.9 cm ; 12.1 cm ; 13.9 cm ; 15 cm ; 16.2 cm ; 17 cm ; 17.9 cm ; 18.9 cm et 20.3 cm , fixé a l’aval du canal rectangulaire composé. Dans le but est d’obtenir un nombre important de points de mesures.



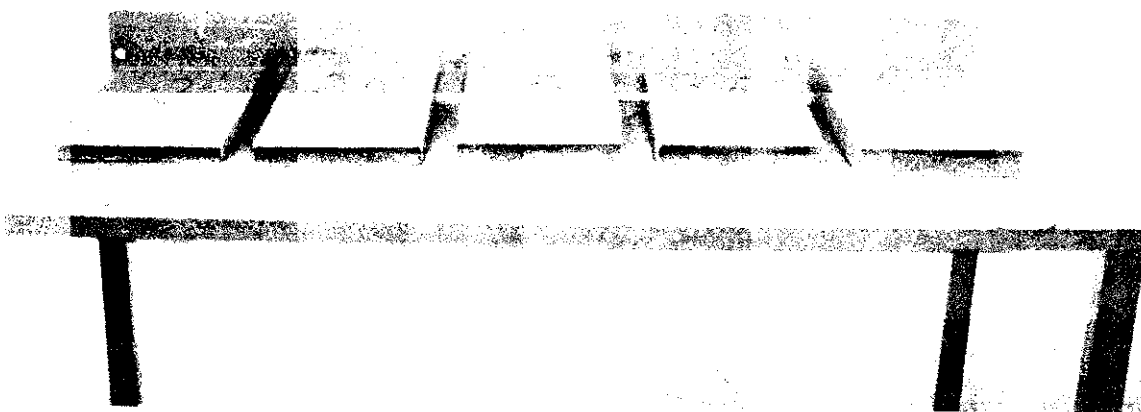
PhotoIV.7 :Photographiedes seuils épais



PhotoIV.8Vanne de régulation

IV.4Les ouvertures:

Les ouvertures utilisées dans notre dispositif expérimental, sont façonnées de fer de forme rectangulaire. L'objectif de l'utilisation des ouvertures est de générer l'écoulement torrentiel. nous avons préparé 05 ouvertures de différentes hauteurs photo (4.11) : $s = 2 \text{ cm}$; 2.5 cm ; 3 cm ; 3.5 cm ; 4 cm .



PhotoIV.9: Les ouvertures

IV.5 CONCLUSION

Nous avons consacré ce chapitre à l'étude du modèle expérimental, qui a servi de base dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal à section rectangulaire composée, muni d'un seuil épais. Nous avons utilisé les appareils de mesure dans le laboratoire d'expérimentation. Nous les avons illustrés par des photographies, dans le but de prendre toutes les mesures nécessaires qui concernent les caractéristiques du ressaut hydraulique.

Pour les mesures des débits, nous avons utilisé le débitmètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de Rachedi. Hachemi (2006) vu son efficacité et nous avons abouti à des résultats acceptables.

CHAPITRE V ETUDE EXPERIMENTALE

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^* .

V.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 (V.1) montre clairement les différents paramètres composant le ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais.

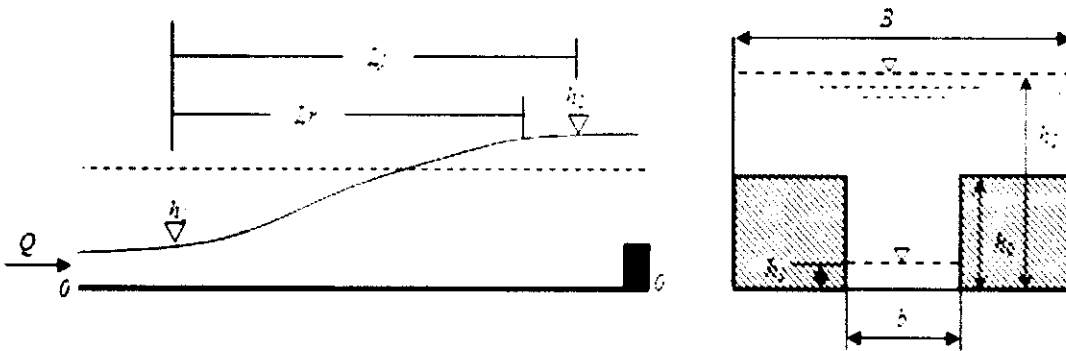


Figure V.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi épaisse en canal rectangulaire de section composée

V.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 :

$$Fr^2 = \frac{Q^2}{g h_1^3 b^2}, \quad Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g b^3}}$$

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):

$$Q = 2.379 B \sqrt{2g\beta} (1 + 0.16496\beta^{2.0716})^{3/2} h_q^{3/2}$$

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).

$\tau = h_1/h$: Rapport des hauteurs.

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_2 du ressaut.

5. calcul du débit relatif Q^* .

V.2. Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du débit relatif Q^*

V.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_2 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.

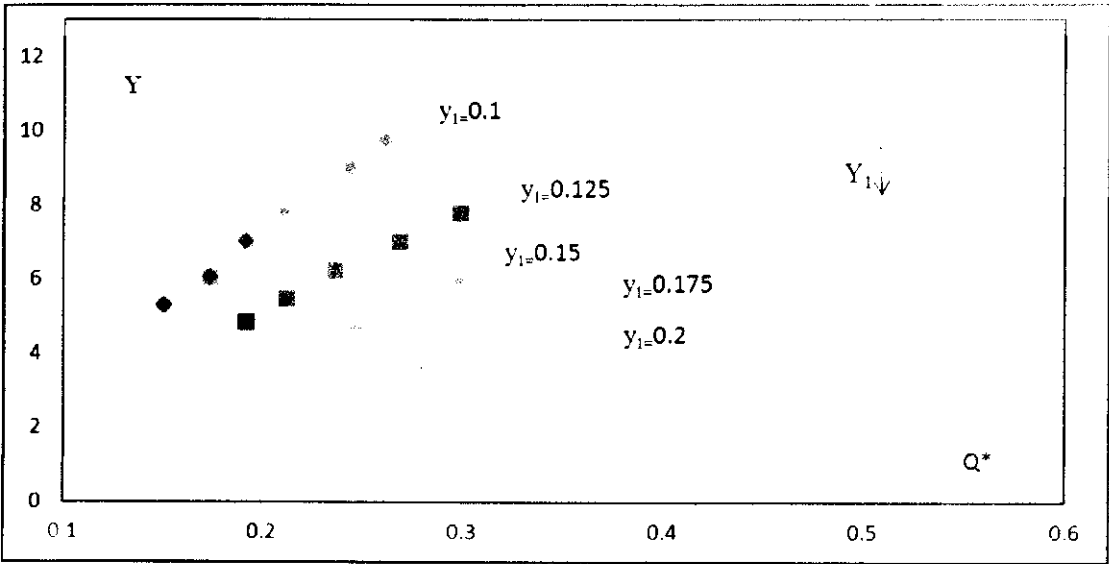


Figure V .2: Variation du rapport des hauteurs y du ressaut hydraulique en fonction du débit relatif Q^* .les motifs différents colorés représentent les points de mesures expérimentales.

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 (V.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 épaisses.

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 (V.1) regroupe les valeurs des coefficients de a_1 et b_1 issus de l’ajustement des moindres carrées.

Tableau (V.1) : récapitulation des résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du Q* pour chaque ouverture h₁

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 (V.1) montre la diminution des coefficients a₁ et l’augmentation des valeurs de b₁ avec l’augmentation de la hauteur relative amont y₁. L’ajustement statistique des couples des valeurs (y₁, a₁) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type puissance d’équation: a₁= 1,196*(h₁/b)^{-1,52} avec R² = 0,984

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

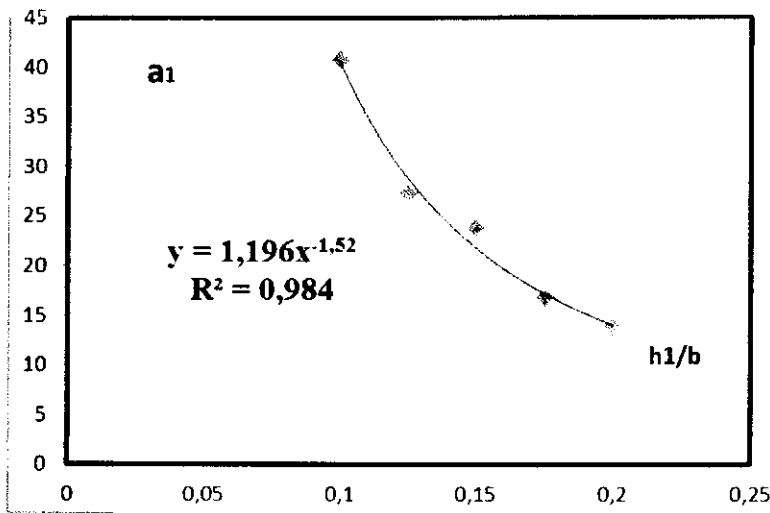


Figure (V.3): Variation du coefficient a_1 en fonction de la hauteur relative amont y_1

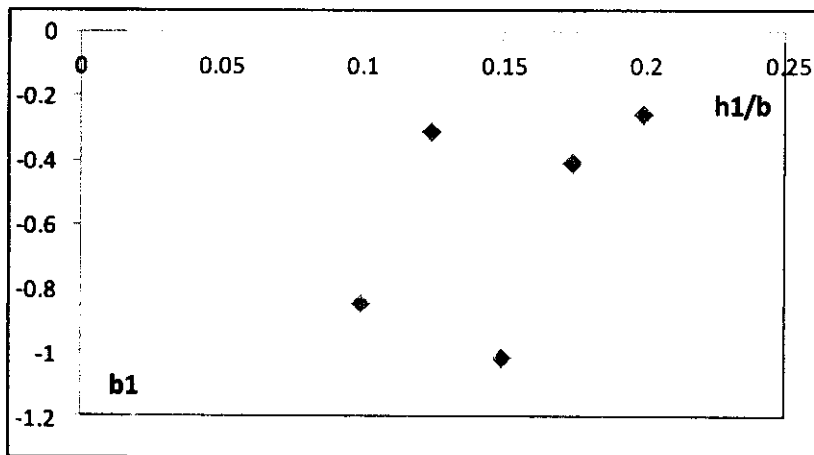


Figure (V.4): Variation du coefficient b_1 en fonction de la hauteur relative amont y_1

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 $0,1 < y_1 < 0,2$.

La figure (V.5) montre que la relation $Y = f(Q^*, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales dès le lit mineur et ses derniers suivent parfaitement la première bissectrice.



Figure (V.5) : Variation de la hauteur relative aval Y en fonction de (y_1, Q^*) . (*) Points expérimentaux du ressaut contrôlé par seuil épais en canal rectangulaire de lit mineur (- -) Première bissectrice d'équation (5.1)

$$Y = 1,196*(h_1/b)^{-1,52} Q^{* -2.6392} \quad (5.1)$$

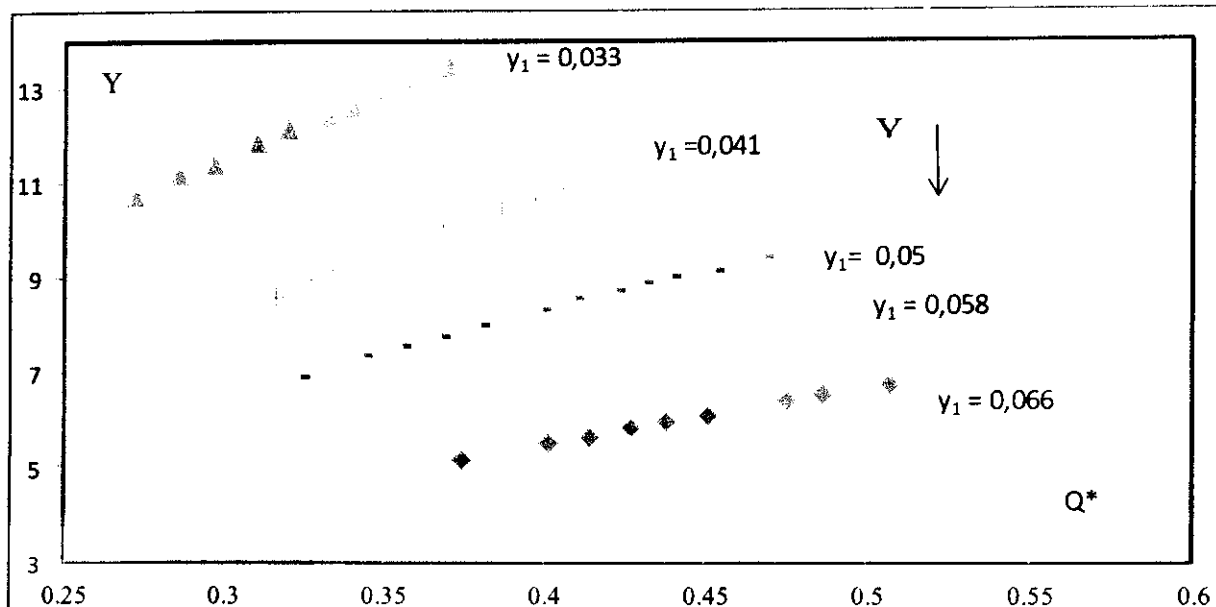
V.2.2 Deuxième cas : $(\beta=b/B<1)$

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 la 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 (V.6) indique cinq allures, correspondant chacune à une valeur bien déterminée de y_1 .



Figure(V.6) : 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 (V.6) 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 (V.2) regroupe les valeurs des coefficients de a_2 et b_2

Tableau (V.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	$Y = 17.4 Q^* + 1.35$	0,995
3,5	0,0583	16,4	0.015	$Y = 16.4 Q^* + 0.015$	0,997
4	0,0660	12,34	0,53	$Y = 12.34 Q^* - 0.53$	0,997

Le tableau (V.2) montre la diminution progressive des coefficients a_2 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 $R^2 = 0,947$ celle-ci est illustrée par la figure ci-

dessous

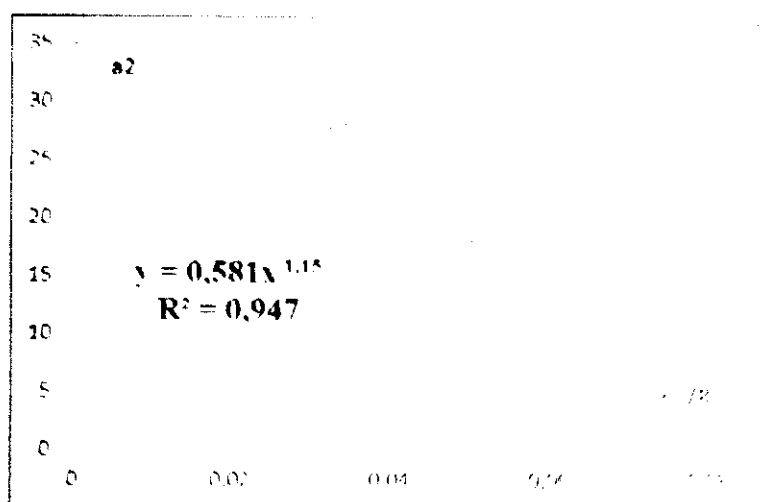


Figure (V.7) : Variation du coefficient a_2 en fonction de la hauteur relative amont a_2 et l'ajustement des couples des valeurs (y , b_2) par la méthode des moindres carrés type puissance

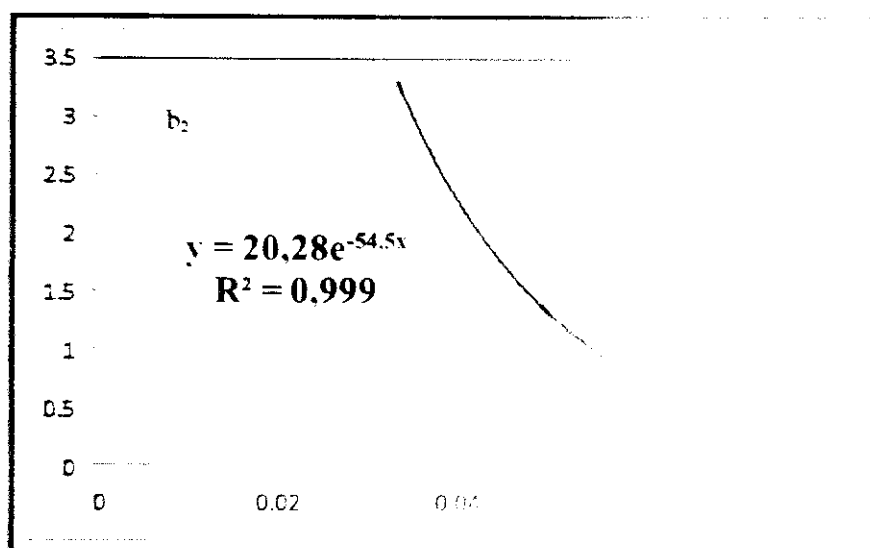


Figure V.8 : Variation du coefficient b_2 en fonction de

En effet, en remplaçant les coefficients a_1 et b_1 par l'ex-
 $Y = a_2 Q^* + b_2$, l'équation liant le rapport des hauteurs des
 débit relatif Q^* et a la hauteur relative amont a_2 des vers

$$Y = 0,581(a_2/B)^{1,15} Q^* + 20,28e^{-54,5x}$$

$$R = 0,999$$

La figure (V.9) montre clairement que la relation Y = f(X) est
 comme auor les points de mesure expérimental de la figure deux

de la première bissectrice et qui stabilisent la relation globale obtenue.

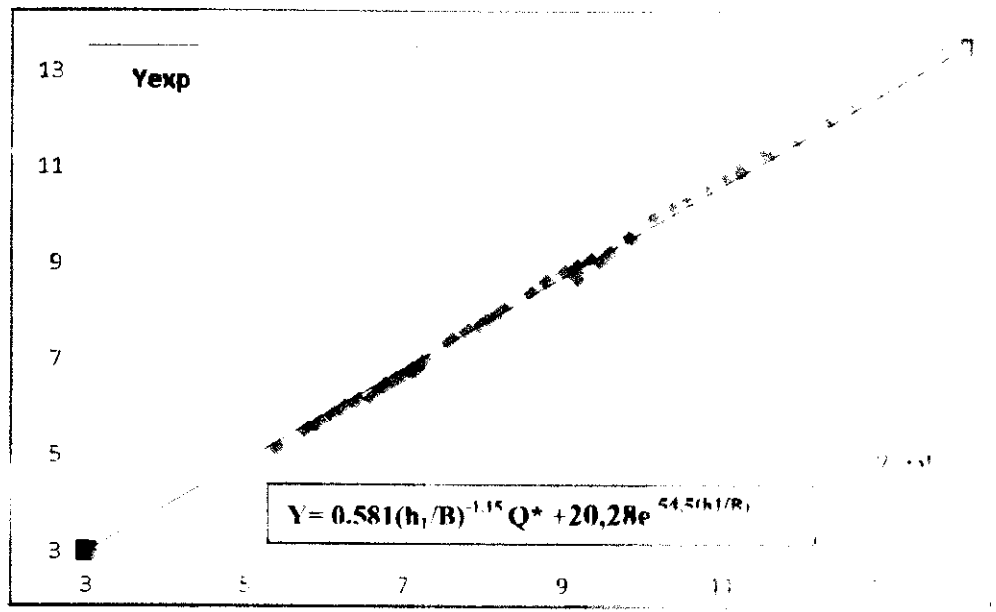
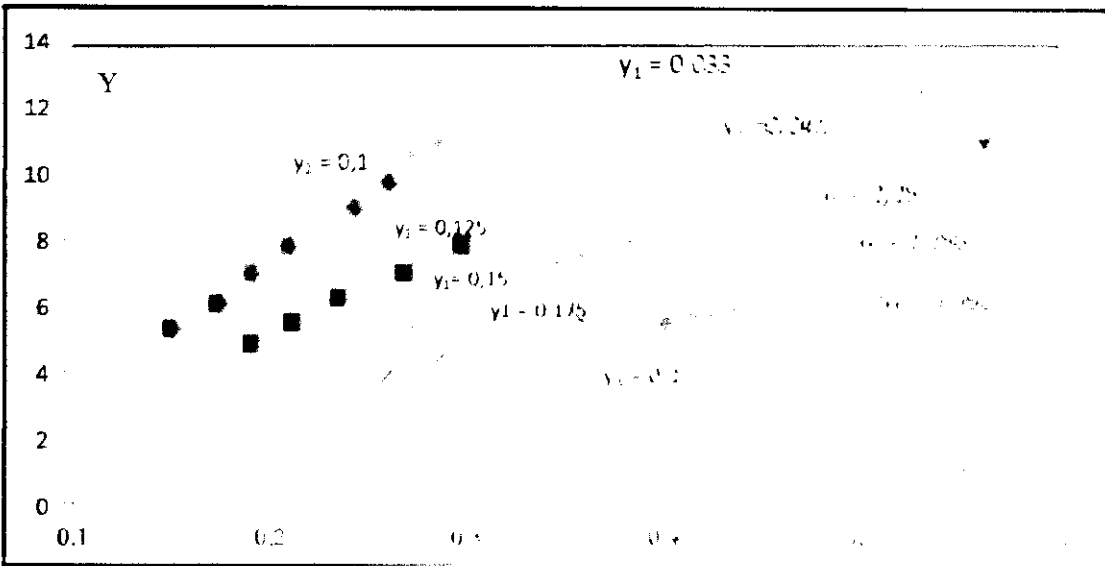


Figure (V.9) : Variation du rapport Y Exp en fonction de $Y = f(Q^*/h_1)$ - Points expérimentaux du ressaut contrôlé par seuil épais en canal rectangulaire de largeur pour

V.2.3.Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du débit relatif Q^* dans la section composée.

La représentation graphique des points expérimentaux ci-dessous (figure V.10) 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 dans la section composée.



Figure(V.10) : Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^*

Les motifs colorés différents représentent les points de données expérimentaux pour

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.

La figure (V.10) indique cinq allures, correspondant chacune à une valeur bien déterminée de y_1 pour la section composée. 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 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 (V.3).

Le tableau (V.3) regroupe les valeurs des coefficients de a_1 , b_1 , a_2 et b_2 .

Tableau (V.3) : les résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du Q^* pour chaque ouverture y_1 dans lit mineur et lit majeur

$h_1(\text{cm})$	$y_1 = h_1/b$ 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	0,033	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	0,041	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	0,05	23,73	-0,1019	17,4	1,35	$Y = 23,73Q^* - 0,1019$	0,998	$Y = 17,4 Q^* + 1,35$	0,995
3,5	0.175	0,0583	16,81	-0,41	16,4	0,015	$Y = 16,81Q^* - 0,41$	0,995	$Y = 16,4 Q^* + 0,015$	0,997
4	0.20	0,066	13,8	-0,256	12,34	0,53	$Y = 13,8Q^* - 0,256$	0,996	$Y = 12,34 Q^* - 0,53$	0,997

L’exploitation de tous ces résultats qui sont récapitulés dans le tableau (V.3) est concrétisée dans la figure(V.10).

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.

$$Y = 1,196 \cdot (h_1/b)^{-1,52} Q^{*-2,6392}$$

(5.1)

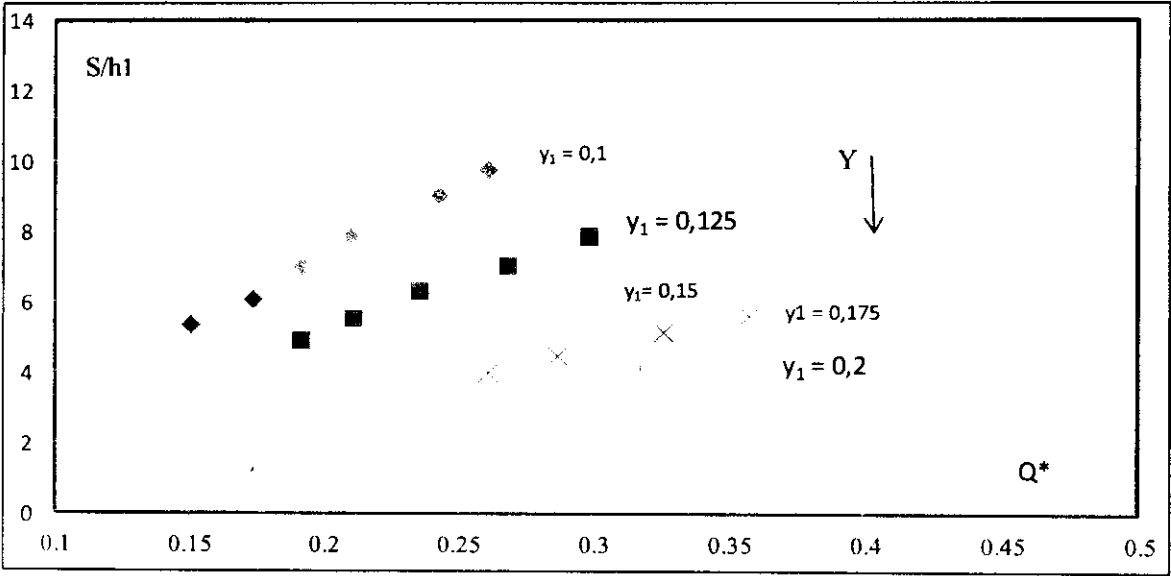
$$Y = 0.581(h_1/B)^{-1.15} Q^{*} + 20,28e^{-54,5(h_1/B)}$$

(5.2)

V.3. Hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil en fonction du débit relatif Q^{*}

V.3.1 Premier cas ($\beta=1, b=B$)

La figure (V.12) 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(V.11) : 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.

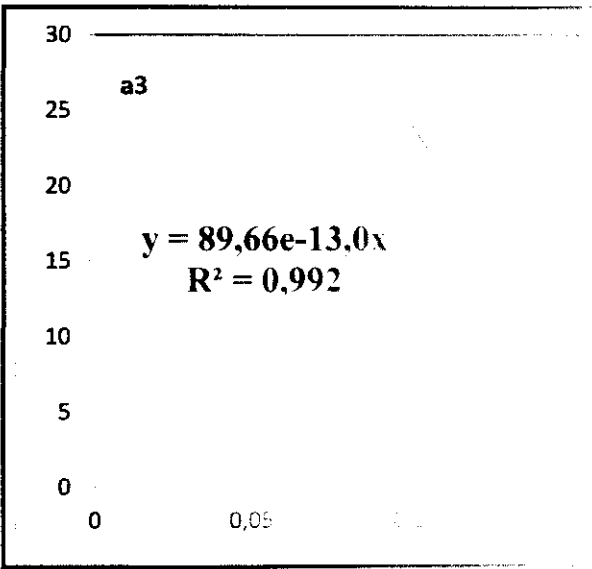
Cette figure montre que les points de mesures du ressaut contrôlé par seuil à paroi épais dans le lit mineur sont distincts, pour les cinq valeurs de y_1 . En outre, l'augmentation du débit relatif Q^{*} entraîne l'augmentation de la hauteur relative S du seuil. On constate que pour la même valeur de 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 $S=a_3Q^{*}+b_3$ comme le montre bien la figure ci-dessous.

Le tableau (V.4) montre clairement que les coefficients a_3 et b_3 varient avec l'augmentation de la hauteur relative amont y_1

$h_1(\text{cm})$	$y_1 = h_1/b$	Coefficient a_3	Coefficient b_3	Equation d'ajustement	R^2
2	0,1	25,26	-2,113	$Y=25.26Q*-2.113$	0,999
2,5	0,125	16,45	-1,748	$Y=16.45 Q*-1.748$	0,999
3	0,150	13,05	-1,756	$Y=13.05 Q*-1.756$	0,999
3,5	0,175	8,796	-1,296	$Y=8.796 Q*-1.296$	0,998
4.0	0,20	6,747	-1,033	$Y=6.747 Q*-1.033$	0,998

Tableau(V.4) récapitulation des couples de valeurs (a_3, y_1) et (b_3, y_1) du tableau ci- dessous.

L'ajustement statistique des couples de valeurs (a_3, y_1) et (b_3, y_1) par la méthode des moindres carrés donne deux relations successivement de type exponentiel en remplaçant les coefficients a_3 et b_3 par leurs expressions dans la relation



Figure(V.12) : Variation du coefficient a_3 avec la hauteur relative amont y_1

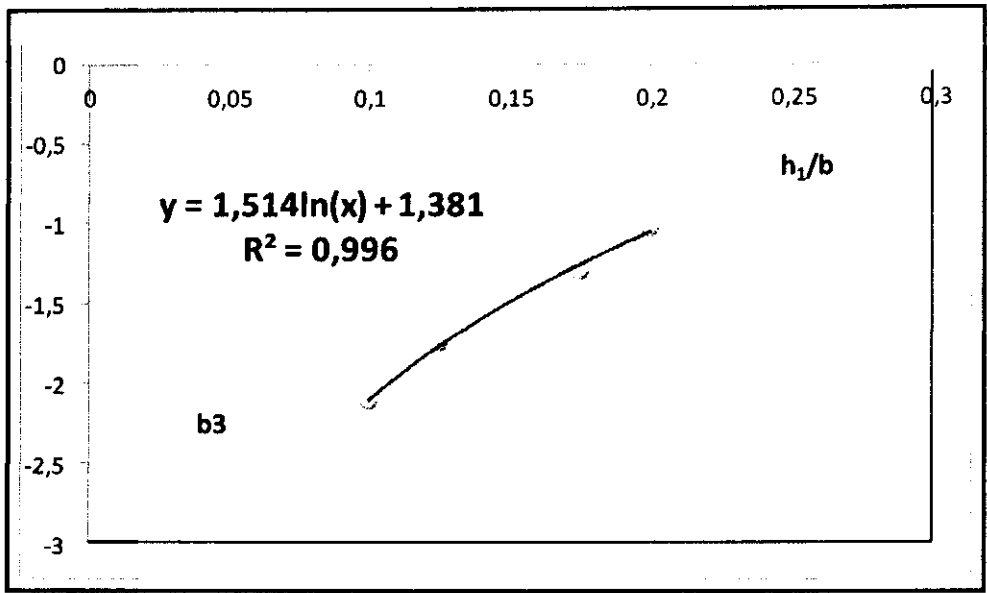


Figure (V.13): Variation du coefficient b_3 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

$S = a_3 Q^* + b_3$, le déci relatif Q^* , la hauteur relative S du seuil et la hauteur relative amont:

$$S = 89.668e^{-13.07(h_1/b)} Q^* + 1.514\ln(x) + 1.381 \quad \text{avec } 0,1 \leq y \leq 0,20.$$

La figure (V.14) 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.

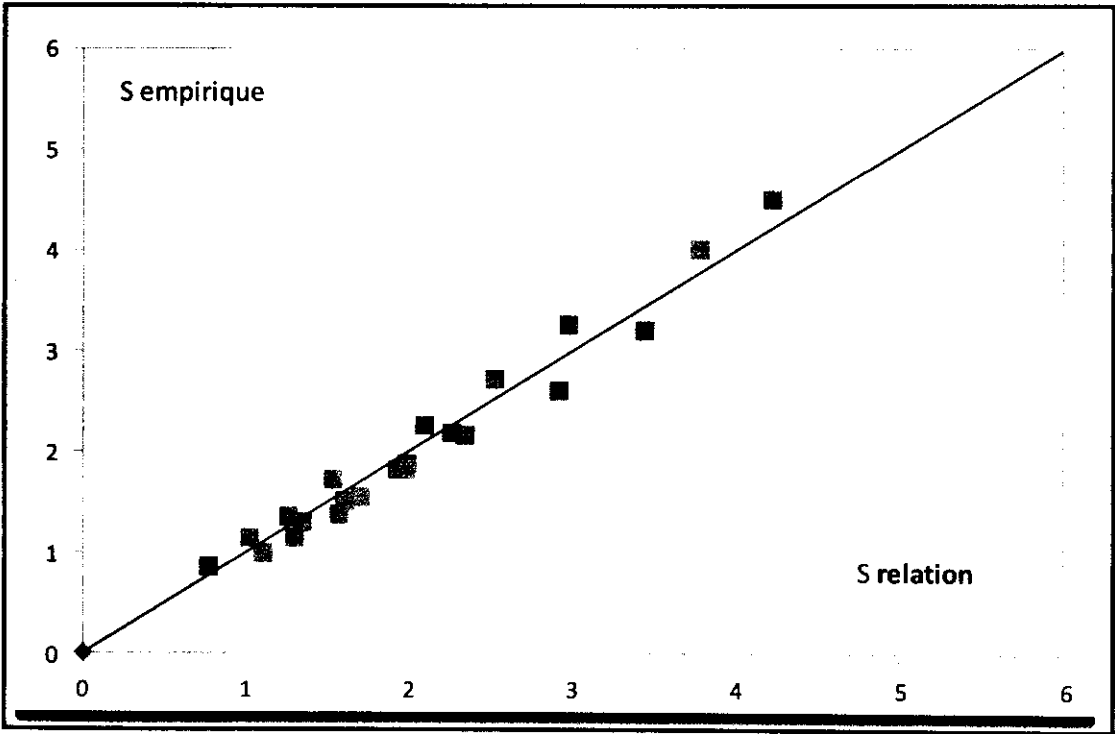


Figure (V.14) : Variation de la hauteur relative S du seuil épais en fonction de $f(Q^*, y_1)$. (■) Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée pour le lit mineur.

Première bissectrice d'équation :

$$S_{\text{relation}} = 89.668 e^{-13.07(h_1/b)} Q^* + 1.514 \ln(h/b) + 1.381 \quad (5.3)$$

V.3.2 Deuxième cas ($\beta=b/B<1$) ($b=20\text{cm}$, $B=60\text{cm}$)

La figure (V.15) 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 .

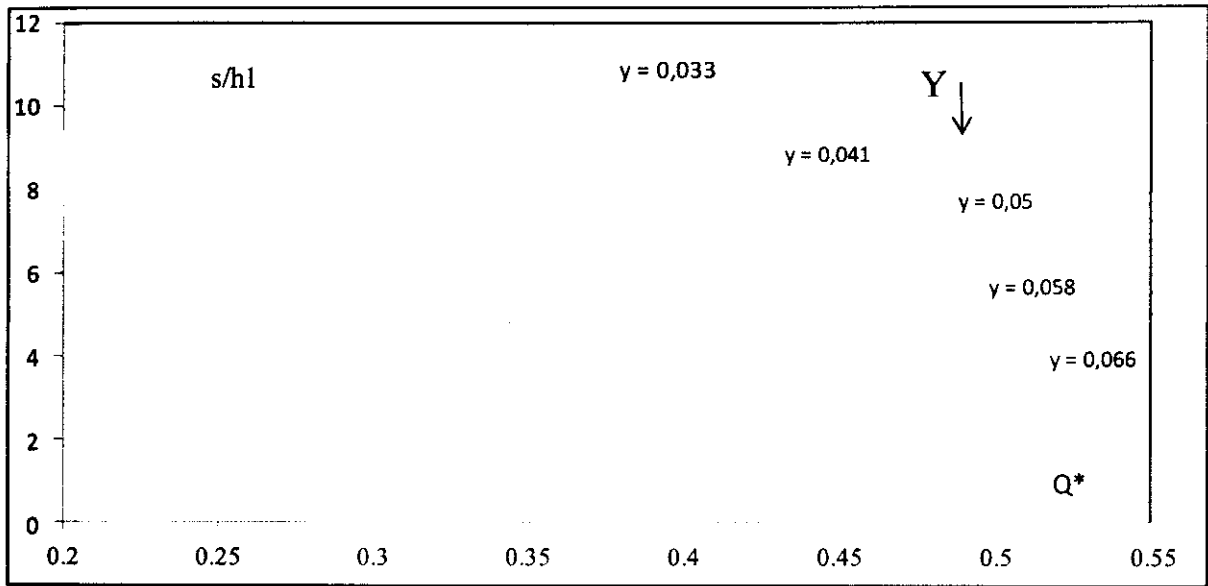


Figure (V.15) : Ressaut contrôlé en canal rectangulaire de forme composée en lit majeur. Variation de la hauteur relative du seuil S épais en fonction du débit relatif Q^* , pour quatre valeurs différents de y_1 : 0,033 ; 0,041; 0,05; 0,058 et 0,066. (-) .

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 $S = a_4 Q^* + b_4$ comme le montre la figure (V.15).

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

Le tableau (V.5) regroupe les valeurs des coefficients a_4 et b_4 .

$h_1(\text{cm})$	$Y = h_1/B$	Coefficient a_4	Coefficient 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	$S = 44.62 Q^* - 10.5$	0,997
3	0,050	29.62	-7.146	$S = 29.62 Q^* - 7.146$	0,995
3,5	0,058	26,36	-7,703	$S = 26.36 Q^* - 7.703$	0,998
4	0,066	19,09	-5,613	$S = 19.09 Q^* - 5.613$	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 (V.16) et (V.17):

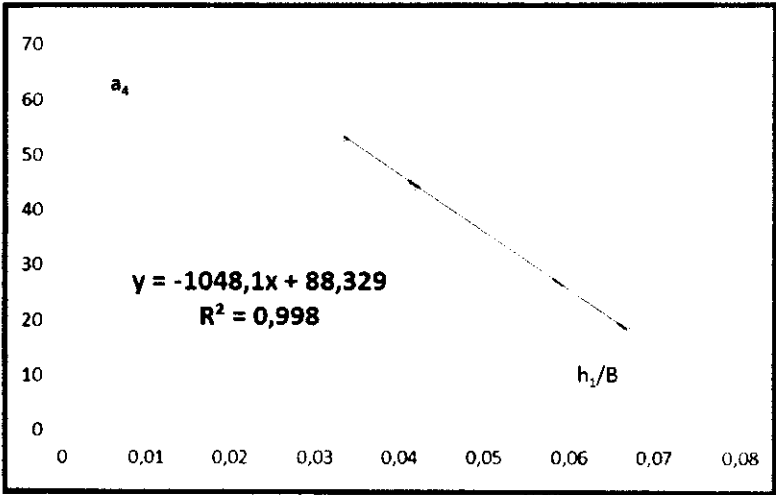


Figure (V.16) : Variation du coefficient a_4 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

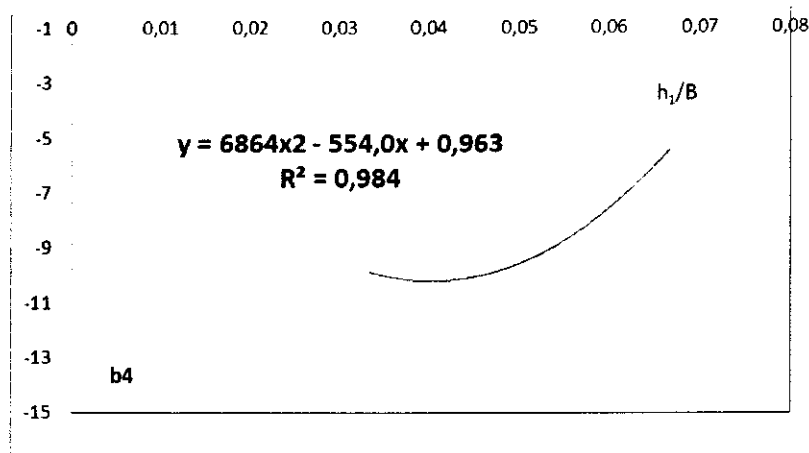


Figure (V.17) : Variation du coefficient b_4 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

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

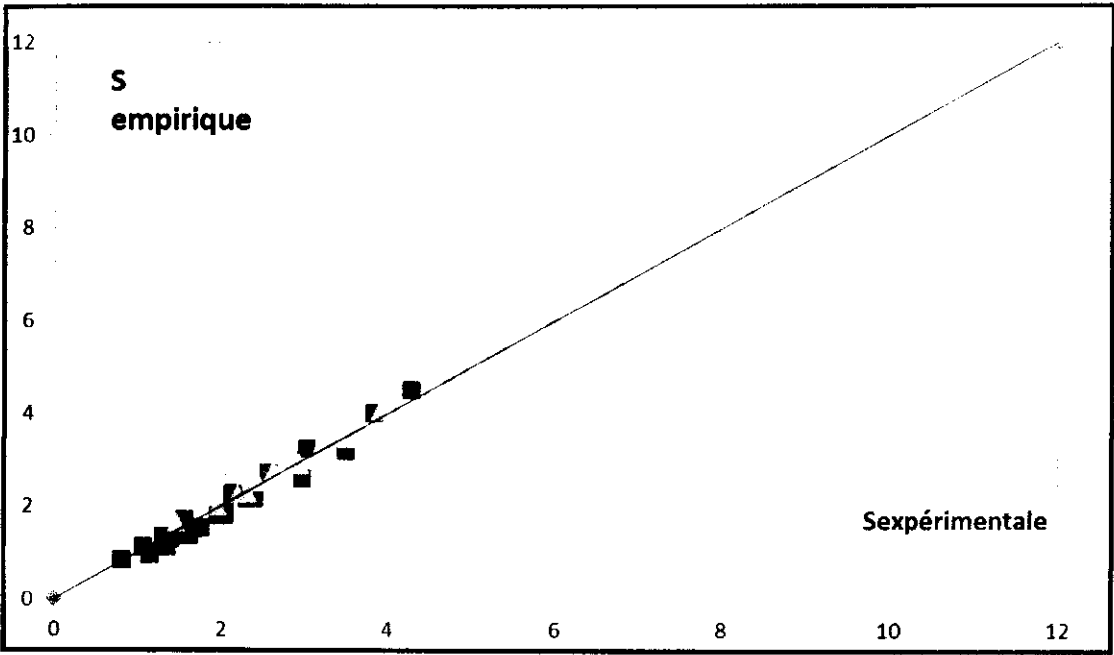
$$b_4 = 6864(h_1/B)^2 - 554(h_1/B) - 0.963$$

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 :

$$S_{\text{relation}} = (-1048.1.(h_1/B) + 88.329)Q^* + 6864(h_1/B)^2 - 554(h_1/B) + 0.963,$$

Avec $0,033 \leq y \leq 0,066$.

La figure (V.18) 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(V.18) : 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 relation = (-1048.1*(h₁/B)+88.329)Q*+6864(h₁/B)²-554(h₁/B)+0.963, **(5.4)**

V.3.3. Hauteur relative S =s/h₁ du seuil en fonction du débit relatif Q*

La représentation graphique des points expérimentaux dans la figure (V.20) montre la variation du rapport du seuil relatif S=s/h₁du ressaut hydraulique en fonction du débit relatif Q*, pour les cinq ouvertures dans la section composée du lit mineur et celui majeur successivement y₁:0.1 ; 0.125 ; 0.150; 0.175 ; 0.2 et 0.033 ; 0.041; 0.050; 0.058;0.066.

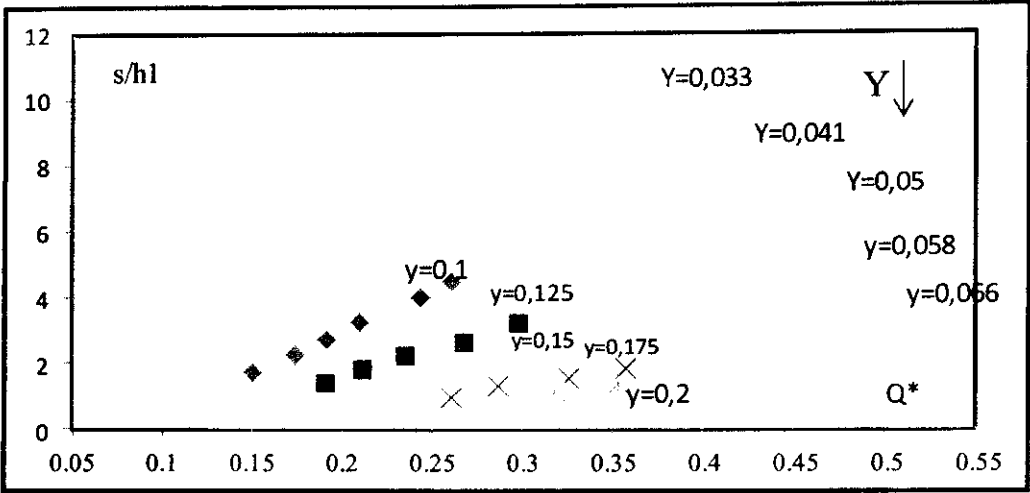


Figure (V.19): Variation du rapport duseuil relatif épais $S= s/h_1$ en fonction du débit relatif Q^* .

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 (V.19) 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 (V.6).

Le tableau (V.6) 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	0,033	25,26	-2,113	53,63	-9,73	$Y=25.26x-2.113$	0,998	$Y= 53.63 Q^*-9.73$	0,997
2,5	0,125	0,041	16,45	-1,748	44,62	-10,5	$Y=16.45x-1.748$	0,993	$Y= 44.62 Q^*-10.5$	0,997
3	0,150	0,050	13,05	-1.756	29.62	-7.146	$Y=13.05x-1,756$	0,992	$Y= 29.62 Q^*-7.146$	0,995
3,5	0,175	0,058	8,796	-1,296	26,36	-7,703	$Y=8.796x-1,296$	0,988	$Y= 26.36 Q^*-7.703$	0,998
4	0,20	0,066	6,747	-1,033	19,09	-5,613	$Y=6.747x-1,033$	0,998	$Y= 19.09 Q^*-5.613$	0,996

Tableau (V.6) : 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 (V.20) 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 .

V.3.4. CONCLUSION

On constat que dépris 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

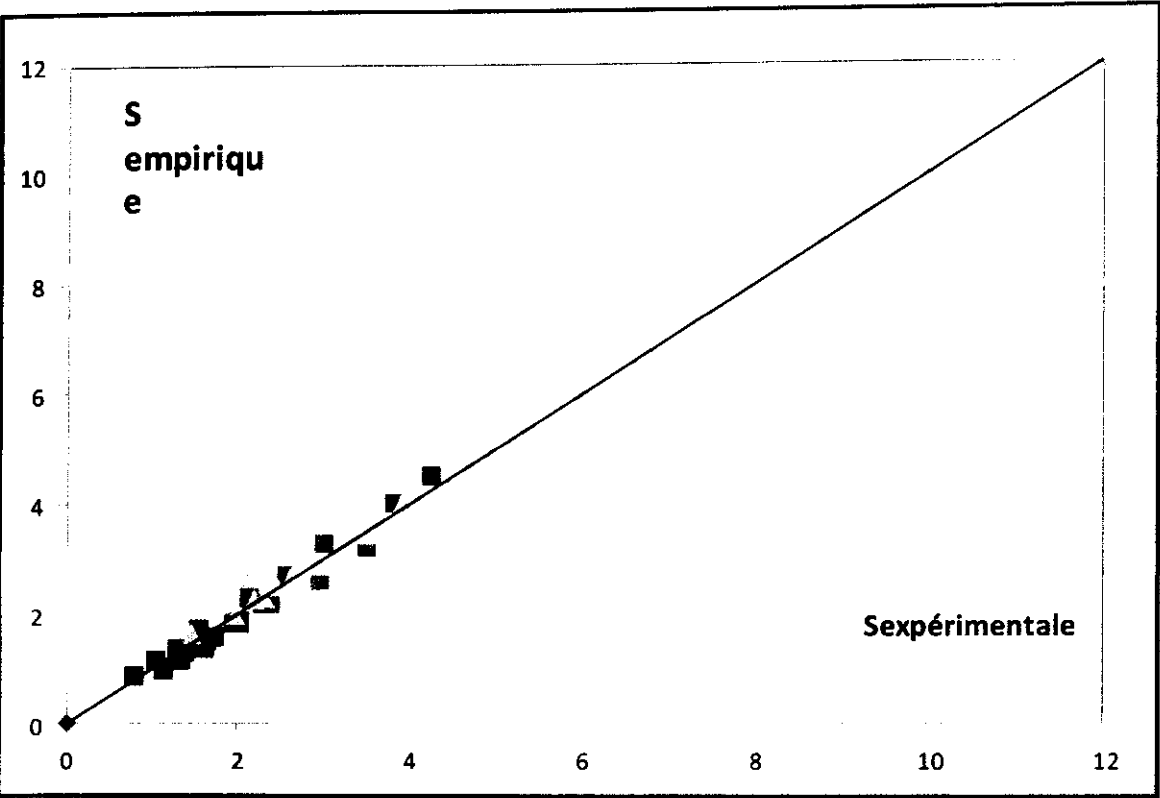


Figure (V.20) : Variation du seuil épais relatif expérimentale $S=s/h_1$ en fonction des relations globales obtenues $S= (y_1 , Q^*)$. (, \)Points des mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée.

$$S \text{ relations} = 89.668e^{-13.07(h_1/b)}Q^*+1.514\ln(x)+1.381 \tag{5.3}$$

Et l'équation globale dans le lit majeur

$$S \text{ relation} = (-1048.1. (h_1/B)+88.329) Q^*+6864(h_1/B)^2 -554(h_1/B)+0.963 \tag{5.4}$$

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

V.4.1 Premier cas ($\beta=1, b=B$)

La figure (V.21) 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.

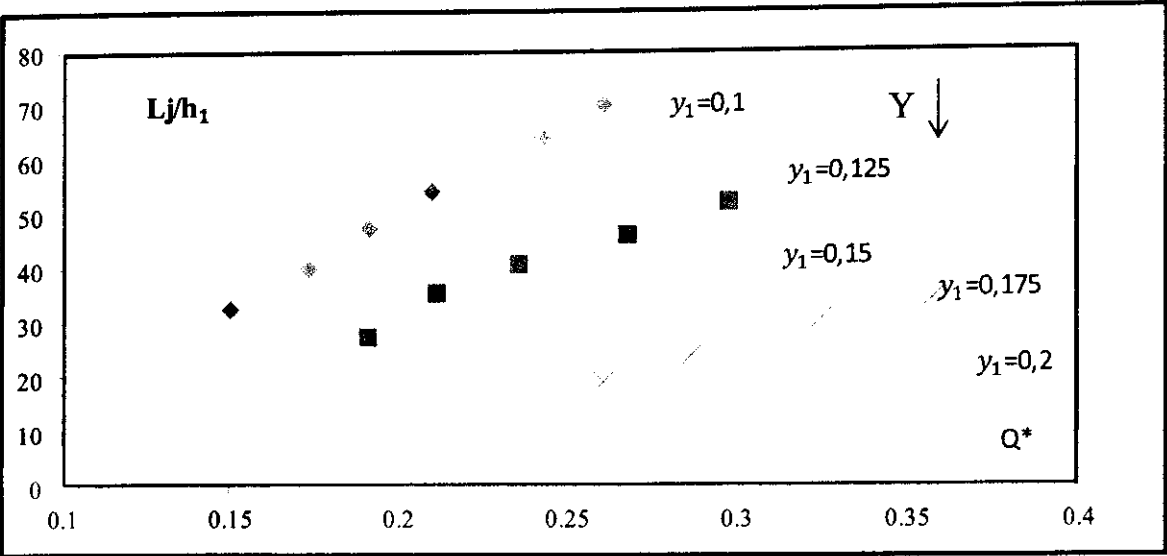


Figure (V.21) Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 .

Le tableau (V.7) regroupe les valeurs des coefficients a_5 et b_5 .

h_1 (cm)	$y_1 = h_1/B$	Coefficient a_5	Coefficient 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 (V.7) 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 :

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

Celle- ci est schématisée par la figure ci-dessous

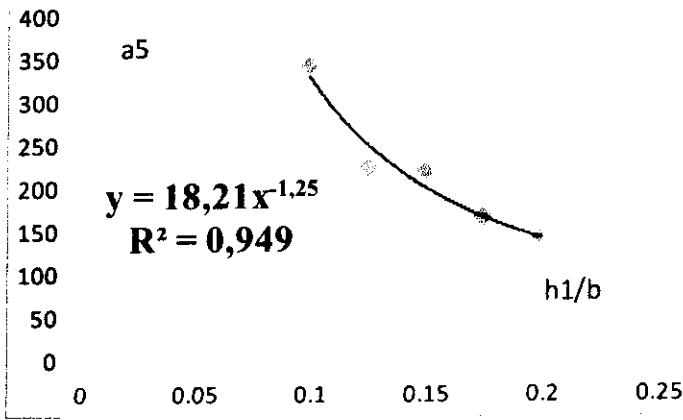


Figure (V.22): Variation du coefficient a_5 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

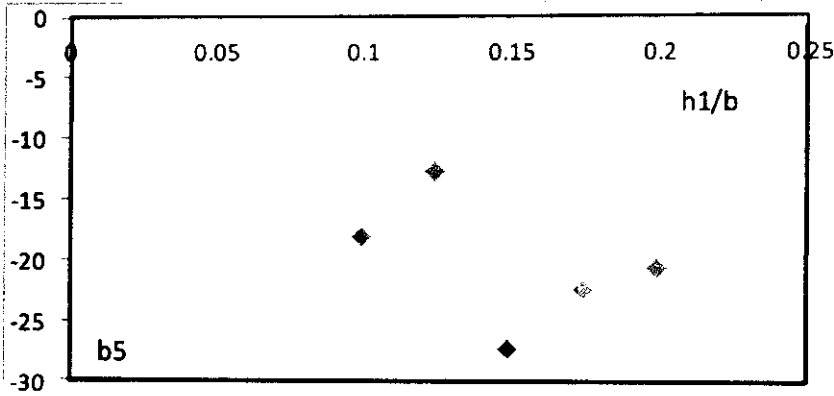


Figure (V.23): Variation du coefficient b_5 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

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

$$L_j/h_1 = 18.21 (h_1/b)^{-1.25} Q^* - 20.252, \text{ avec } 0.10 < y_1 < 0.2.$$

La figure (V.24) montre également que la relation trouvée $L_j/h_1 = f(Q^*, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice. Ainsi la relation globale obtenue est justifiée

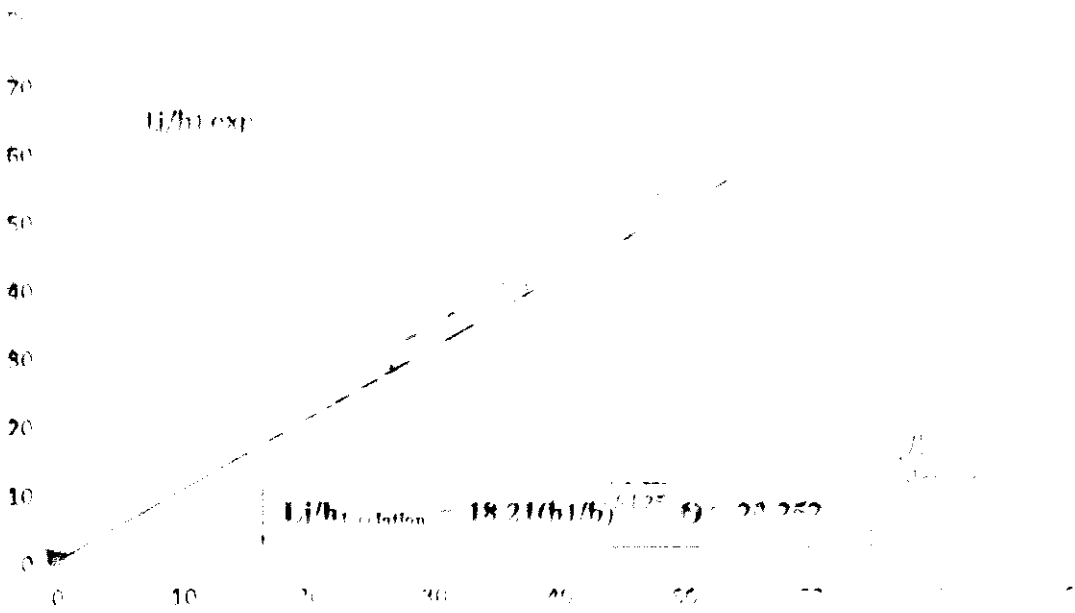


Figure (V.24) : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut hydraulique en fonction du débit relatif Q^* au ressaut hydraulique contrôlé en canal rectangulaire de forme composée pour quatre valeurs de y_1 .
Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de forme composée
(---) Première bissectrice d'équation: $L_j/h_1 \text{ calculée} = 18.21(h_1/h_2)^{0.125} - 6 = 20.252$

V.4.2 Deuxième cas ($\beta=h/B<1$)

La figure (V.21) montre la représentation graphique de la variation de la longueur relative du ressaut hydraulique en fonction du débit relatif Q^* au 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 en canal rectangulaire épais sont distincts, pour les quatre valeurs de y_1 . En outre, l'augmentation du seuil relatif Q^* entraîne l'augmentation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut avec laquelle. Il est évident aussi que pour une même valeur de Q^* , L_j/h_1 augmente avec la diminution de y_1 . En outre, les points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de forme composée, montre que pour chaque valeur de y_1 une relation de type linéaire se construit sous forme $L_j/h_1 = a_6Q^*+b_6$ comme le montre bien la figure (V.25a,b).

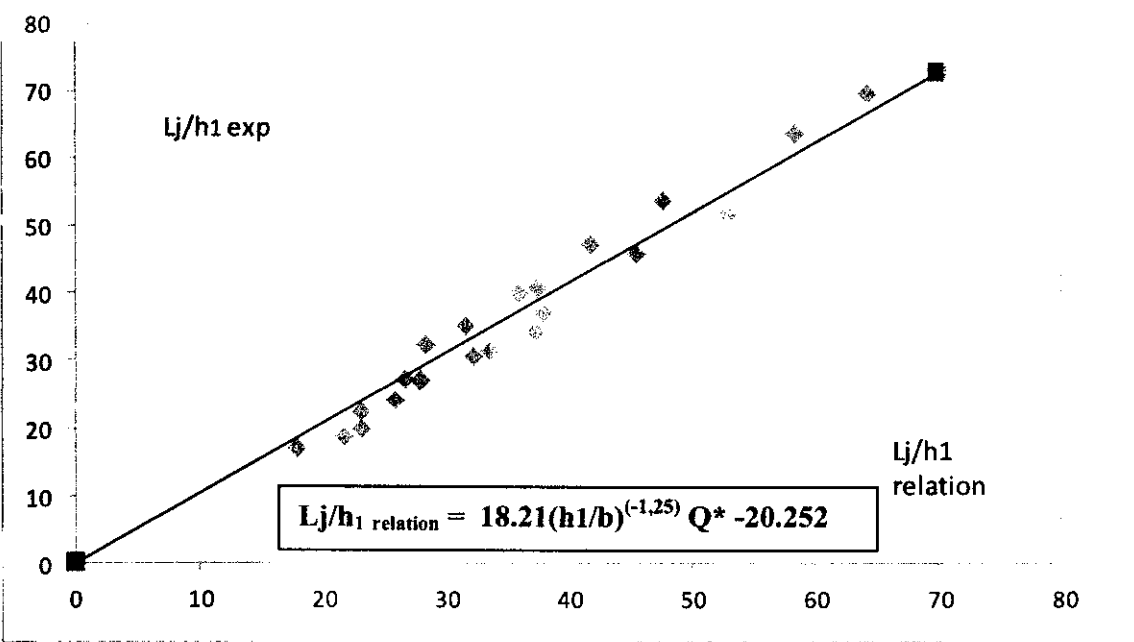


Figure (V.24) : Variation de la longueur relative Lj/h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$. () Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée.
(—) Première bissectrice d'équation $Lj/h_1 \text{ relation} = 18.21 (h_1/b)^{-1.25} Q^* - 20.252$

V.4.2 Deuxième cas ($\beta=b/B<1$)

La figure (V.21) 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 Lj/h_1 du ressaut hydraulique. On constate aussi que pour une même valeur de Q^* , Lj/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 $Lj/h_1 = a_6 Q^* + b_6$ comme le montre bien la figure dessous.

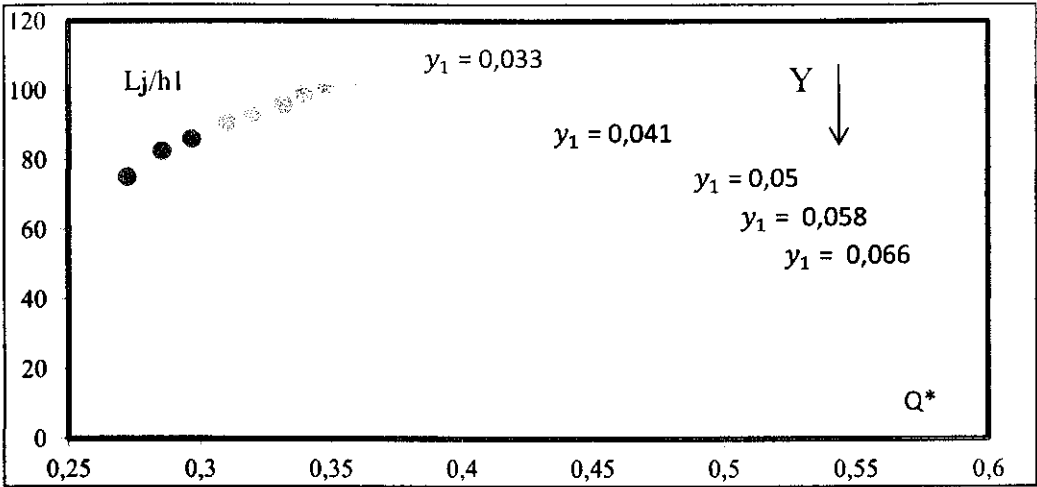


Figure (V.25) Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour le lit majeur Pour cinq valeurs distinctes de y_1 . Les motifs coloré représentent les points expérimentaux

Le tableau (V.8) récapitulation des valeur de a_6 et b_6 .

$h_1(\text{cm})$	$y_1 = h_1/B$	Coefficient a_6	Coefficient b_6	R^2
2	0.033	315.6	-8.529	0,988
2,5	0,041	240.6	-16.13	0,989
3	0,05	177	-12.05	0,988
3,5	0,058	178.8	-26.83	0,996
4	0,066	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 :

$a_6 = 7,045 (h_1/B)^{-1.11}$ avec $R^2 = 0,985$.

Celle- ci est schématisée par la figure ci-dessous

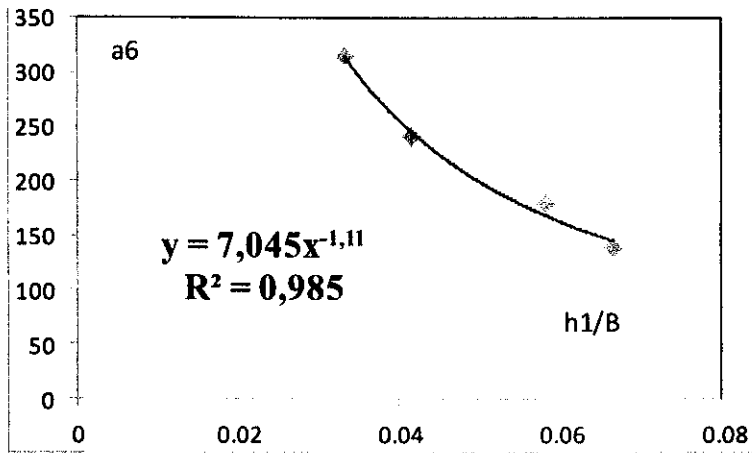


Figure (V.26): Variation du coefficient a_6 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

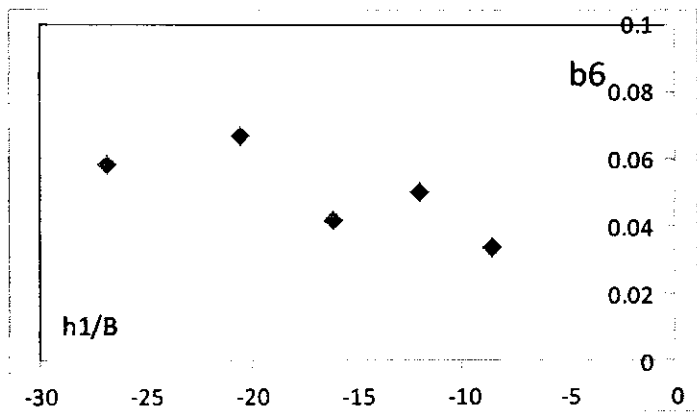


Figure (V.27): Variation du coefficient b_6 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

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 $Lj/h_1 = a_6 Q^* + b_6$, avec $a_6 = 7,045 (h_1/B)^{-1,11}$, $b_6 = -16.8158$, le débit relatif Q^* , la longueur relative Lj/h_1 du ressaut et la hauteur relative amont y_1 devient :

$$Lj/h_1 = 7,045 (h_1/B)^{-1,11} Q^* - 16.8158 \quad , \text{ avec } 0,033 < y_1 < 0,066$$

La figure (V.28) montre également que la relation trouvée $Lj/h_1 = f(Q^*, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice .

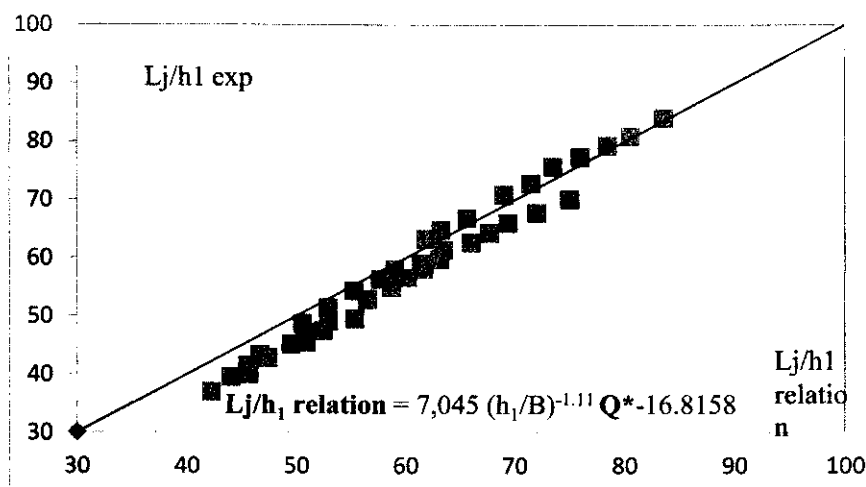


Figure (V.28) : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(,Q^*, y_1)$. (■) Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé par seuil épais en canal rectangulaire de section composée. (—) Première bissectrice d'équation : $L_j/h_1 \text{ relation} = 7,045 (h_1/B)^{-1.11} Q^* - 16.8158$

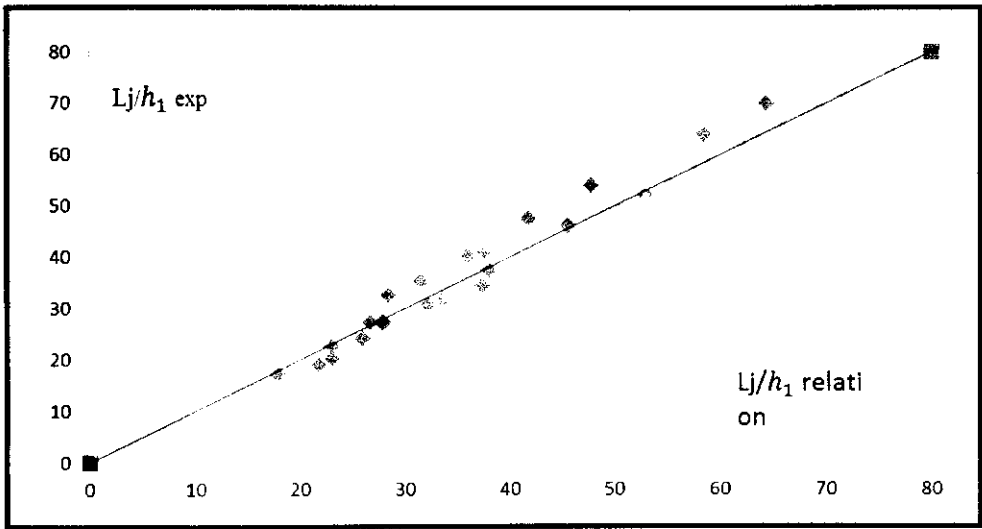


Figure (V.29) : Variation du seuil épais relatif expérimentale $L_j=l_j/h_1$ en fonction des relations globales obtenues $L_j = (y_1 , Q^*)$. (◊ ,) Points des mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée.

V.5. Longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^*

V.5.1 Premier cas ($\beta=1, b=B$) section rectangulaire

La figure (V.28) montre la représentation graphique de la variation de la longueur relative du rouleau de surface et du débit relatif Q^* du ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais 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 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_r/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 $L_r/h_1 = a_7Q^*+b_7$ comme le montre bien la figure ci-dessous.

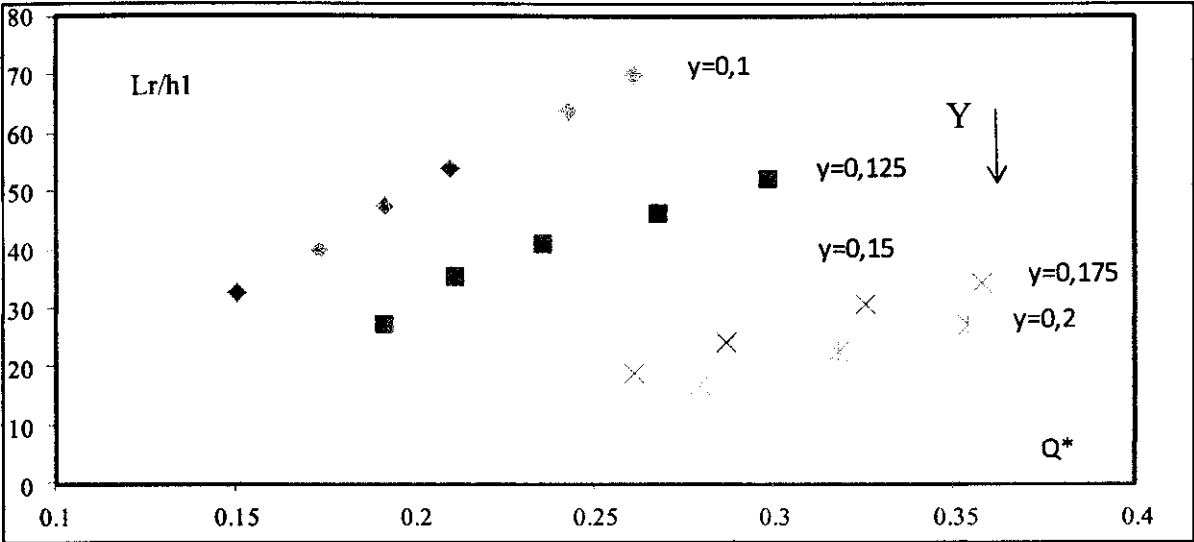


Figure (V.30) : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 .

Le tableau (V.9) regroupe les valeurs des coefficients a_7 et b_7 .

$h_1(\text{cm})$	$y_1 = h_1/B$	Coefficient a_7	Coefficient 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 (V.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_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

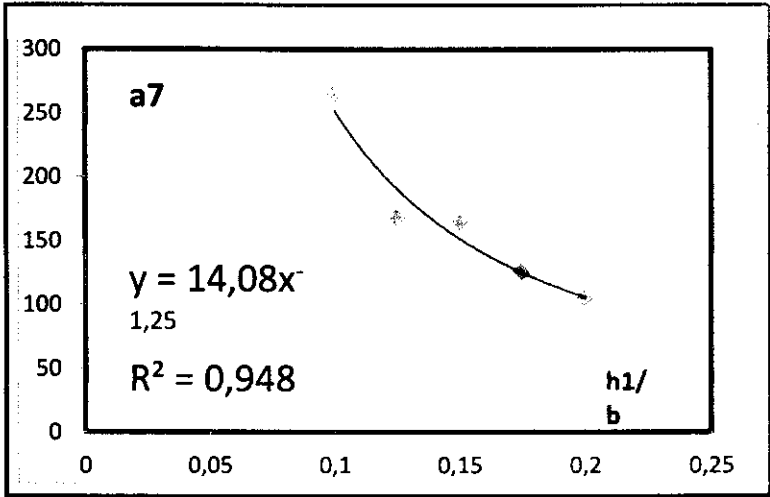


Figure (V.31) : Variation du coefficient a_7 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

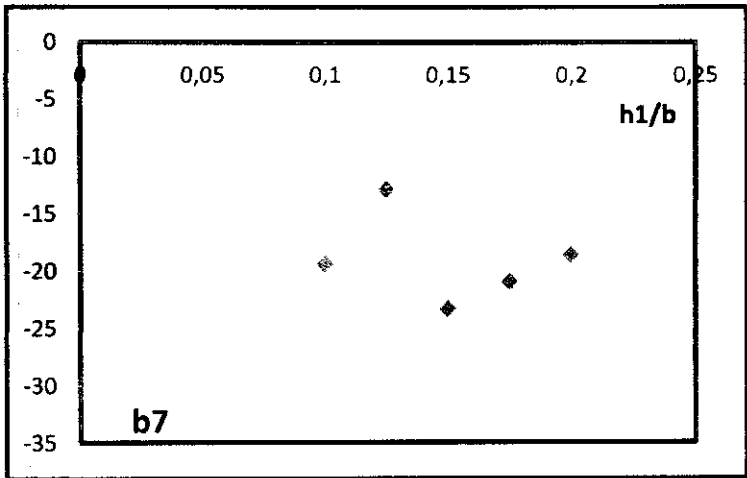


Figure (V.32) : Variation du coefficient b_7 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

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 $Lr/h_1 = a_7Q^* + b_7$, 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 Lr/h_1 du ressaut et la hauteur relative amont y_1 devient :

$Lr/h_1 = 14,08(h_1/b)^{-1,25}Q^* - 19.044$, avec $0.10 < y_1 < 0.20$

La figure (V.32) montre que la relation trouvée $Lr/h_1 = f(Q^*, y_1)$ 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.

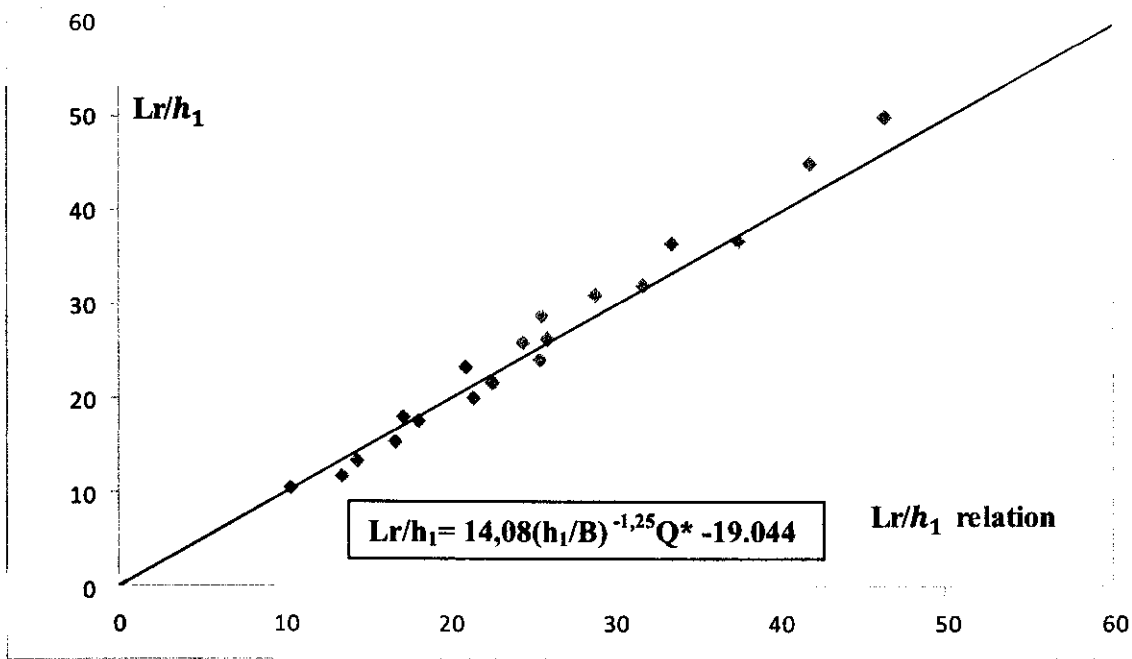


Figure (V.33) : Variation de la longueur relative du rouleau de surface Lr/h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(, Q^*, y_1)$ () Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé par seuil épais en canal rectangulaire de section composée.
(—) Première bissectrice d'équation : $Lr/h_1 = 14,08(h_1/b_1)^{-1,25}Q^* - 19,04$

V.5.2 Deuxième cas ($\beta=b/B<1$) (canal rectangulaire de section composée)

La figure (V.31) montre la représentation graphique de la variation de la longueur relative du rouleau de surface du débit relatif Q^* du ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais 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 cinq valeurs de y_1 . En outre, l'augmentation du débit relatif Q^* entraîne l'augmentation de la longueur relative Lj/h_1 du ressaut hydraulique. On constate également que pour une même valeur de Q^* , Lr/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 $Lr/h_1 = a_8Q^* + b_8$ comme le montre bien la figure ci- dessous.

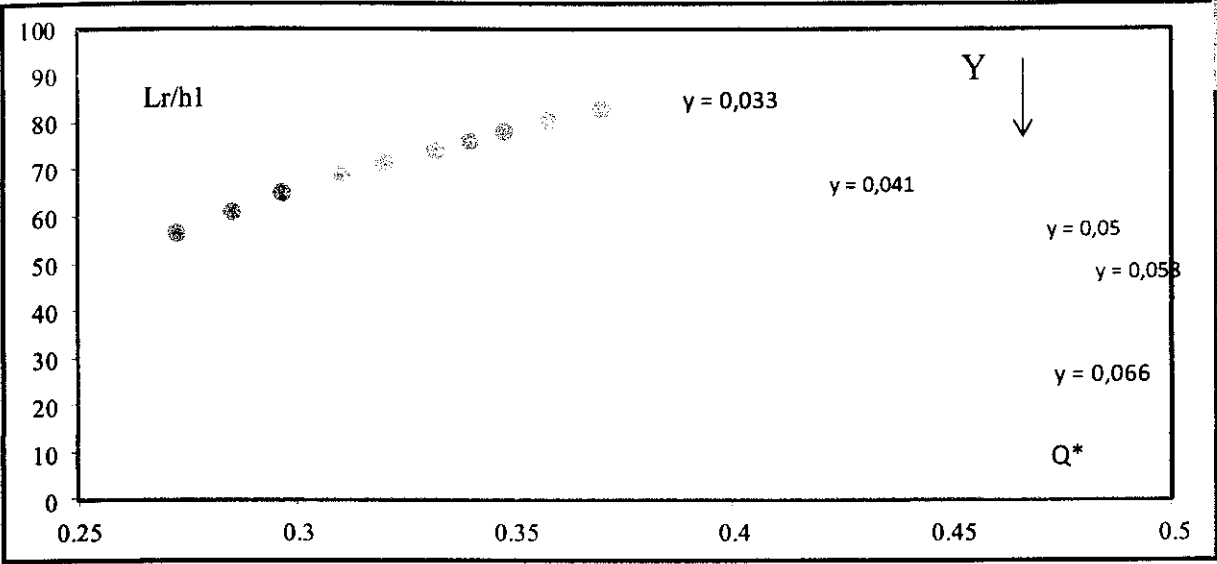


Figure (V.34) : Variation de la longueur relative Lr/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 .

Le tableau (V.10) regroupe les valeurs des coefficients a_8 et b_8

h_1 (cm)	$y_1 = h_1/B$	Coefficient a_8	Coefficient b_8	R^2
2	0,033	266.8	-14.82	0,992
2,5	0,041	204.3	-21.33	0,989
3	0,05	153.5	-16.54	0,989
3,5	0,058	146.5	-27.27	0,999
4	0,066	111.6	-20.60	0,994

Le tableau (V.10) 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 :

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

Celle- ci est schématisée par la figure ci-dessous

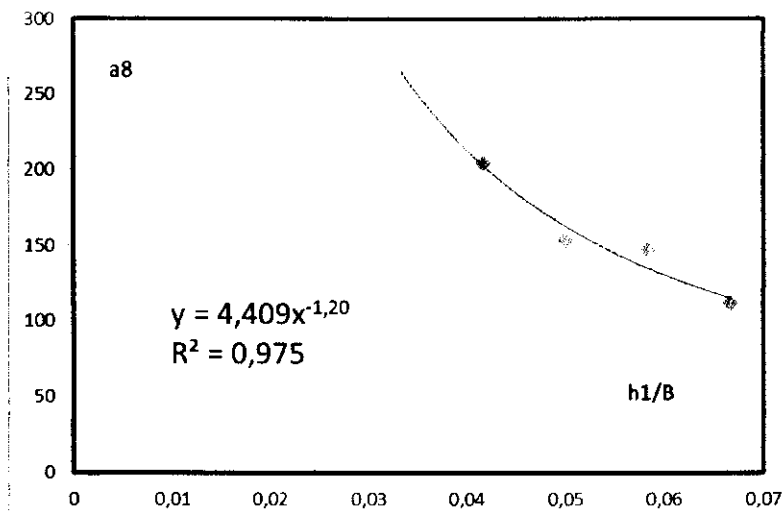


Figure (V.35): Variation du coefficient a_8 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

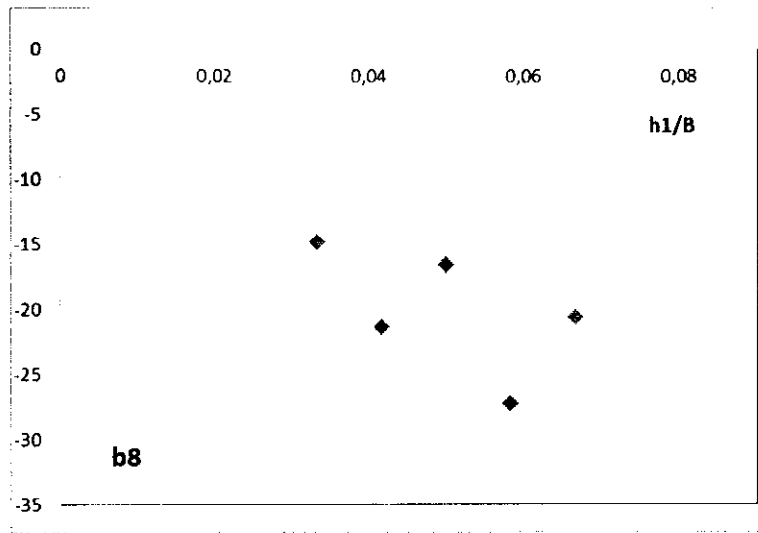


Figure (V.36): Variation du coefficient b_8 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

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 $Lr/h_1 = a_8Q^* + b_8$, 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 :

$Lr/h_1 = 4,409(h_1/B)^{-1,20}Q^* - 20.112$ avec $0,033 < y_1 < 0,066$

La figure (V.33) montre que la relation trouvée $Lr/h_1 = f(Q^*, y_1)$ ajuste avec une bonne

corrélation les points de mesures. Ces points expérimentaux tournent approximativement autour de la première bissectrice ce qui rend la relation globale obtenue acceptable.

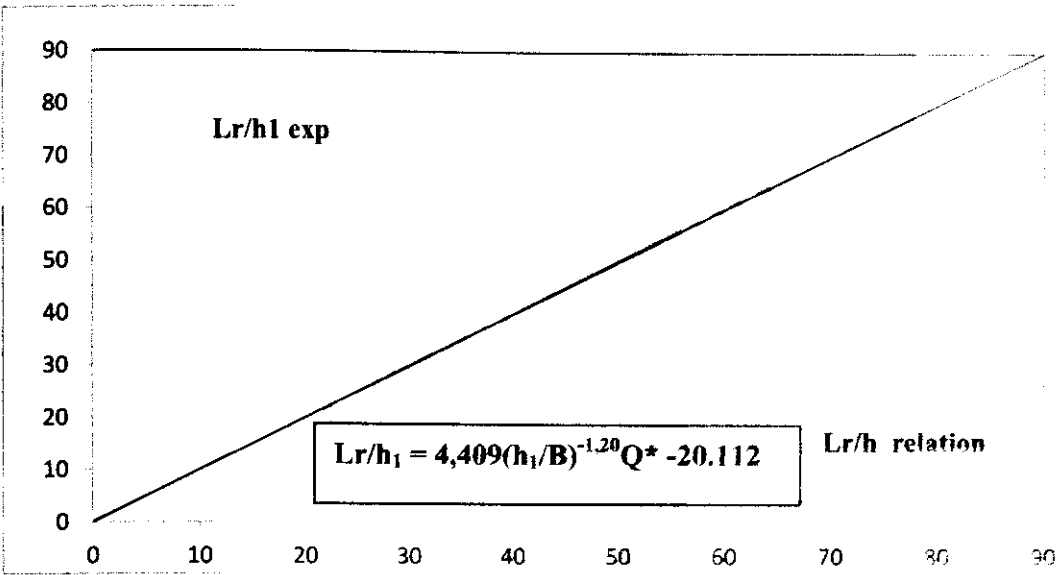


Figure (V.37): Variation de la longueur relative du rouleau de surface Lr/h_1 du ressaut hydraulique en fonction de $f(Q^*, y_1)$. (♦) Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée. (—) Première bissectrice d'équation : $Lr/h_1 = 4.409(h_1/B)^{-1.20} Q^* - 20.112$

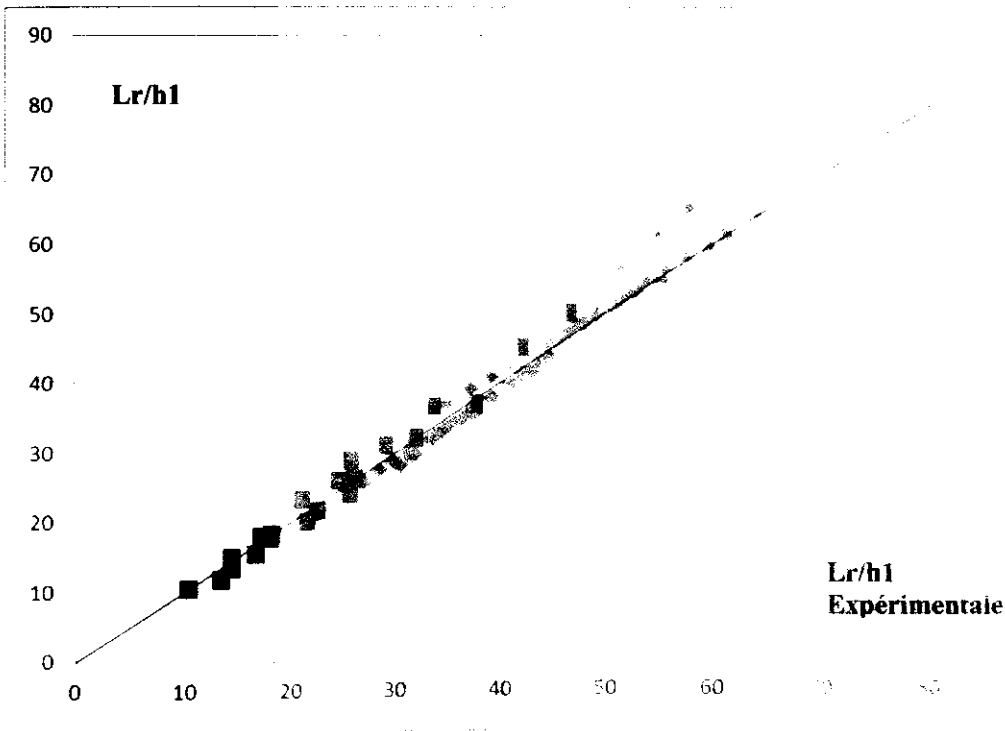


Figure (V.38) : Variation du seuil épais relatif expérimentale Lr/h_1 en fonction des relations globales obtenues $Lr = (y_1, Q^*)$. (■, ♦) Points des mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée.

Conclusion:

On remarque que l'effet réducteur des caractéristiques

longueur de ressaut hydraulique L_j est celle du lit mineur

lit L_r se le lit mineur que celle de lit

hydraulique dès le compose est défavorable

Conclusion La deuxième partie de nous

hydraulique contrôlé par un soubresaut

pente nulle (canal non prismatique)

trouver des approches expérimentales

Ce chapitre a été conçu pour les étudiants

de section droite rectangulaire

premier temps, nous avons expliqué la procédure

En second temps on a exploité toutes les données

Laboratoire LARHYSS de BISKRA pour nous

large gamme du débit relatif Q^* a été étudiée

Finalement les approches expérimentales

A/ le rapport des hauteurs conjuguées

ce fait deux cas ont été obtenus

- **Lit mineur**
 - Pour $\beta = b/b_c$ avec $0.15 \leq \beta \leq 0.3$

- **Lit majeur**
 - Pour $\beta > 0.3$ avec $0.15 \leq \beta \leq 0.3$

B/ le rapport de la hauteur

cas ont été obtenus

à la suite

- 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 $0,033 \leq y_1 \leq 0,066$

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 $0,033 \leq y_1 \leq 0,066$.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Pour cette partie expérimentale de notre contribution a concerné, l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire de section composée.

Il a été procédé, une analyse expérimentale permettant de trouver deux relations fonctionnelles de la forme respectivement $Y = f(Q^*, y_1)$, $S = f(Q^*, y_1)$ pour le canal rectangulaire de section composée dans le lit mineur et celui majeur.

Par ailleurs, une étude expérimentale pour ce type du ressaut hydraulique a été réalisée.

L'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée, a été conçue pour quelques ouvertures h_1 dans les deux lits du canal d'expérimentation de valeurs : 2; 2.5; 3 ; 3,5 et 4cm avec plusieurs seuils testés S au laboratoire de LARHYSS de Biskra pour une large gamme de débit relatif Q^* qui ont été obtenues. Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à la variation du rapport de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil ainsi que celle du rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique dans la section composée en fonction du débit relatif Q^* .

Dans un deuxième temps des différentes relations expérimentales globales obtenues ont été établies et justifiées de telle sorte que la majorités des mesures expérimentales tournent autour de la première bissectrice fiabilisant des mesures expérimentales obtenues au laboratoire.

En dernier temps, on conclue que les approches empiriques (expérimentales) obtenues sont adimensionnelles à caractères générales soit dans le lit mineur ou celui majeur sont validées par la première bissectrice. Ainsi on jugera de l'utilisation au dimensionnement des ouvrages annexes des barrages.

CONCLUSION GENERALE

Notre mémoire de mastère a été consacré à l'étude de l'effet du ressaut hydraulique évoluant dans le canal brusquement élargi aux caractéristiques de l'écoulement contrôlé par seuil épais continu. Le manuscrit est divisé en deux parties : une première partie bibliographique et une seconde partie ayant concerné notre propre contribution.

La première partie a été divisée en trois chapitres :

A travers le premier chapitre nous avons abordé les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique évoluant **dans un canal de section droite rectangulaire**. Nous avons examiné les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut.

Dans le deuxième chapitre de la partie bibliographique nous avons traité le ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi épaisse dans un canal rectangulaire. Nous avons passé en revue les travaux de FORSTER et SKRIDE (1950) et ceux d'ACHOUR (1998).

L'étude de FORSTER et SKRINDE a montré que l'application de l'équation de quantité de mouvement est possible dans le cas du seuil à paroi épaisse dénoyée, les auteurs proposent une relation analytique implicite qui lie la hauteur relative s/h_1 du seuil au nombre de Froude F_1 ; Contrairement au cas du seuil mince, une seule courbe est alors obtenue.

L'étude du ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse franchi par un écoulement en régime critique a été également effectuée par ACHOUR (1998). Deux configurations ont été examinées; la configuration avec la vanne de fond ou le développement théorique a mené à l'établissement d'une relation explicite permettant d'évaluer la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 .

Pour le cas du ressaut précédé d'un déversoir standard, l'étude théorique a montré que le nombre de Froude IF_1 est lié implicitement au paramètre adimensionnel $S=1 - s_2/s_1$ dans lequel s_2 représente la hauteur géométrique du seuil épais et s_1 celle du déversoir standard.

Le dernier chapitre de la partie bibliographique a mis l'accent sur L'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal composé droit à

aboutit à une équation fonctionnelle de forme $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$

Le rapproche est proposée en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire

brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans nos développements, les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapprochées de la réalité.

La deuxième partie de notre contribution a concerné notre propre travail intitulé : étude de l'effet du ressaut hydraulique en canal de section composée aux caractéristiques de l'écoulement hydraulique contrôlé par seuil épais.

Nous avons consacré **pour le quatrième chapitre** à l'étude du modèle expérimental, qui a servi de base dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal de section brusquement élargi, muni d'un seuil. Dans ce chapitre nous avons abordé les appareils de mesure utilisés dans notre travail réalisé au laboratoire de LARHYSS de Biskra .nous les avons illustrés par des photographies, dans le but de prendre toutes les mesures nécessaires qui concernent les caractéristiques du ressaut hydraulique. En ce qui concerne les mesures des débits, nous avons utilisé le débitmètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de Rachdi. Hachemi (2006) vu son efficacité et nous avons abouti à des résultats acceptables.

Le cinquième chapitre de notre mémoire de mastère a concerné l'étude de l'effet du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi épais dans un canal rectangulaire en lit composé à pente nulle (canal non prismatique). L'analyse des résultats expérimentaux nous a permis de trouver des approches expérimentales globales à caractères générales acceptables.

Dans un premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie par les essais. Passant en second temps aux résultats expérimentaux, qui ont été testées par plusieurs seuils s des hauteurs différentes. Une large gamme des débits relatifs a été ainsi obtenue.

En dernier temps on a testé toutes les mesures expérimentales obtenues au niveau du large gamme du débit relatif Q^* a été ainsi obtenue.

Finalement les approches expérimentales globales obtenues sont:

A/ le rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ en fonction du débit relatif Q^* .pour ce fait deux cas ont été étudiés:

- Pour $\beta = b/B = 1$: $Y = 1.033 + 0.0001 Q^{*2} + 0.0001 Q^{*4}$ avec $0.1 \leq y_1 \leq 0.2$
- Pour $\beta = b/B < 1$, $Y = 0.81(1 - \beta)^{0.15} Q^{*0.15} + 20.15(1 - \beta)^{0.15} Q^{*0.15}$ avec $0.033 \leq y_1 \leq 0.066$

CONCLUSION GENERALE

B/ le rapport de la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$ en fonction du débit relatif Q^*

ainsi deux cas ont été étudiés :

➤ Pour $\beta = b/B = 1$ la relation = $83,60 (h_1/b)^{-0,99} Q^{*-1,11} + 0,4 \ln(h_1/b) + 1$

Avec $0,1 \leq y_1 \leq 0,2$

➤ Pour $\beta = b/B < 1$, la relation = $(4,76(h_1/b) + 14,65 \ln(h_1/b) - 98,04) (h_1/b)^{-0,99} Q^{*-1,11} + 55,4(h_1/b) - 0,963$

, avec $0,033 \leq y_1 \leq 0,066$

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

➤ Pour $\beta = b/B = 1$, $Lj/h_1 = 18,21 (h_1/b)^{-0,99} Q^{*-20,181}$, avec

$0,10 < y_1 < 0,20$

➤ Pour $\beta = b/B < 1$, Lj/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 Lr/h_1 en fonction du débit relatif Q^* , deux cas ont été traités :

➤ Pour $\beta = b/B = 1$, Lr/h_1 relation = $14,68(h_1/B)^{-1,25} Q^{*+10,934}$, avec $0,10 < y_1 < 0,20$

➤ Pour $\beta = b/B < 1$, Lr/h_1 relation = $4,409(h_1/b)^{-1,2} Q^{*+20,112}$, avec $0,033 \leq y_1 \leq 0,066$.

En conclusion, d'après l'analyse de nos résultats obtenus nous pourrions dire que l'effet réducteur des caractéristiques de l'écoulement **est positif au lit mineur que celui dans le lit majeur**. Par conséquent la section composée a un effet négatif aux réductions des caractéristiques de l'écoulement.

On espère bien qu'on a contribué à l'étude de l'effet de ressaut hydraulique en canal rectangulaire non prismatique aux caractéristiques de l'écoulement. **par conséquent on recommandera de continuer les travaux dans ce type du ressaut en but d'élaborer d'autres approches expérimentales servant au dimensionnement des ouvrages annexes du barrage.**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Achour, B., Débâche, M., Khattaoui, M., Bedjaoui, A., Ressaut Hydraulique Classique et Contrôlé dans quelques profils de canaux (première partie), „LARHYSS JOURNAL” – Journal du Laboratoire de recherches en Hydraulique Souterraine et de Surface, Université de Biskra, N° 1, pp. 37-72, 2002.
2. Achour, B., Débâche, M., Ressaut contrôlé par seuil dans un canal Triangulaire, Journal of Hydraulic Research, Vol. 41(3), pp. 319-325, 2003.
3. Achour, B., Débâche, M., Ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en U. Journal of hydraulic research, Vol. 41 (01), pp. 97-103, 2003.
4. Achour, B., Débâche, M., Ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en U, Journal of Hydraulic Research, Vol. 41, N°1, pp. 97-103, 2003.
5. Achour, B., Débitmètre à ressaut en canal de section droite triangulaire sans seuil, Journal of Hydraulic Research, Vol. 27, N°2, pp. 205-214, 1989.
6. Achour, B., Dissipation d'énergie par ressaut, thèse d'état. Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil, 1998.
7. Achour, B., Jump flow meter in a channel of triangular cross-section without weir. Journal of hydraulic research, Vol. 27(2), pp. 205-214.
8. Boubeche Brahim ; Korichimed Bachir ., contribution à l'étude de quelques caractéristiques du ressaut hydrauliques en canal rectangulaire de composée Université d'El-Oued ,du Septembre 2018
9. Bretz, N., V., Ressaut Hydraulique Forcé par seuil, Laboratoire de constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, Communication No.2, 1988.ème
10. Debabeche, M., Achour, B., Ressaut forcé de type B-min dans un canal triangulaire, 3 Séminaire National sur Hydraulique, Université de Biskra, 1998.
11. Debabeche, M., Achour, B., Compacité du ressaut contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire, Séminaire National sur les ressources en eau, Université de Mascara, 1999.
12. Debabeche, M., Achour, B., Effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal profilé en U, Colloque méditerranéen sur l'eau – Watmed2, Maroc, Novembre 2005.
13. Debabeche, M., Achour, B., Influence du seuil sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire, „Courrier du savoir” – Périodique Scientifique et Technique de l'Université de Biskra, N° 1, pp. 89-92, 2001.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

14. Debabeche, M., Achour, B., L'influence du seuil sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire, Colloque International l'eau dans le bassin méditerranéen, watmed 2002, Monastir, Tunisie, 2002.
15. Debabeche, M., Achour, B., Ressaut hydraulique classique en canal profilé en „U“. 1^{ER} Séminaire Sur L'eau, Université de Mascara, 2000
16. Debabeche, M., Achour, B., Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, 1^{er} Séminaire Maghrébin sur l'eau, Université de Tiziouzu, 1996.
17. Debabeche, M., Achour, B., Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, 36^{ème} Semaine International des sciences, Université d'Alep, Damas – SYRIE, 1996.
18. Debabeche, M., Contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, Thèse de Magistère, Université de Biskra, 1996.
19. Debabeche, M., Ghomri, A., Kateb, S. and Achour, B., Theoretical study of the hydraulic jump in a triangular channel with rough walls. Dam engineering, IWPDC, Vol. XXII (01), pp. 89-97, 2011.
20. Debabeche, M., Kateb, S., Ghomri, A., Etude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses, Larhyss Journal, N° 5, pp. 187-196, Mai 2006.
21. Debabeche, M., Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état. Département hydraulique, Université de Biskra, Algérie, 2003.
22. Debabeche, M., Achour, B., Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire, 2^{ème} Séminaire Maghrébin sur l'eau, Université de Tizi-Ouzou, 1999.
23. Ead, S. A., Rajaratnam, N. katopodis, C., and Ade , “ Turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts. ” J.Hydraul.Eng., 126(10), pp. 750-757. F, 2000.
24. Ead, S. A., Rajaratnam, N., “plan turbulent wall jets in shallow” J.eng. mech., 128(2), pp. 143-155, 2002.
25. Forster, J. W., Skrinde, R. A., Control of hydraulic jump by sills, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 115, pp. 973-987, 1950.
26. Ghomri, A., Debabeche, M., Riguet, F., Etude de l'approche semi-théorique du ressaut hydraulique dans un canal profilé en “U”, à fond rugueux, colloque international sur la gestion de l'eau, défi du XXI^{ème} siècle , IUT du Limosin, Limoge, France, du 19 au 21 octobre 2011.
27. Ghomri, A., Debabeche, M., Riguet, F., Etude expérimentale du ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en U, à fond rugueux, 5^{ème} conférence sur les ressources en eau dans le bassin méditerranéen, Watmed 5. Lille, France, Novembre 2010.

REFERENCES BLIOGRAPHIQUES

28. Ghomri, A., Debabeche, M., Riguet, F., Etude semi théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en U, à fond rugueux, Revues des sciences fondamentales et appliquées, centre universitaire d'OuedSouf, N° 1 , pp. 41-56,2009.
29. Ghomri, A., Ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en "U" à fond rugueux. Mémoire de magister, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie,2005.
30. Hager, W. H. and LI, D" Dissipateurs d'énergie contrôlé par seuil ", J. Recherches Hydrauliques,30.n°2,165-181,1992.
31. Hager, W. H. and WANOSCHEK, R'Ressaut hydraulique en canal triangulaire ", J recherches hydrauliques, 25,n°5,549-564,1985.
32. Hager, W. H., Wanoschek, R., Hydraulic jump in triangular channel, J. Hydraulic Research, Vol. 25, No 5,pp-549-564,1987.
33. Hager, W., Bremen R., H., Classical Hydraulic jump; sequent depth, J. Hydraulic Research 27(5), 565-585,1989.
34. Hager, W., Bremen R., H., et Kawogoshi N. Classical Hydraulic jump; length of roller, J. Hydraulic Research 28(5), 591-608,1990.
35. Hager, W., H., Der Ablufssim U-Profil. Korrespondenz Abwasser 34(5) : 468-482,1987.
36. Hager, W., H., Hydraulic jump in U-channel, Proc. ASEC, J. Hydraulic Engineering 115(5), 667-675,1989.
37. Kateb, S., Ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal triangulaire à parois rugueuses, Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2006.
38. Khattaoui M ;Achour B ;(2012) ressaut hydraulique en lit composé droit ,J.H.Eng, LJEE N°20.Juin2012
39. McCorquodale , J.A., "chapter 8: Hydraulic jumps and internal flow " Encycloedia of fluid mechanics , N.P. Cheremisinoff, ed., Vol. 2, Gulf Publishing , Houston,1986.
40. Rajaratnam, N., The Forced Hydraulic Jump. Water Power, January, 1419, February, 61-65. 1964.
41. Rajaratnam, N." Discussion of silvester", Proc. ASCE , J. Hydr. Divi., 90(HY4), pp. 314-350. 1964.
42. Riguet, F., Ghomri, A., Effet de la rugosité sur le ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en U à fond rugueux. Séminaire international sur les ressources en eau au Sahara, Université Ouargla, du 19 au 20 janvier2011.
43. Zianisonia ; dissipation d'énergie par ressaut hydraulique dans une conduite circulaire avec banquettes (09.06.2015)