



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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued
Faculté des Sciences et de la 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:

**L'étude de l'effet de réduction sur les
caractéristiques du ressaut hydraulique
évoluant dans un canal rectangulaire de
section composée**

✓ **Présenté par:**

- Ammari Ouassama
- Beda Zecri abdessalam
- Rezzag Mohsen Bachir

- Dirigé par:

GHOMRI Ali

Devant le jury composé de:

Dr.GHOMRI Ali

Université d'El OUED

Promoteur

MEGELATI Soumia

Université d'El OUED

Président

RIGHET Ferhat

Université d'El OUED

Examineurs

Année universitaire: 2018/2019

الملخص

تقترح مساهمتنا في دراسة تأثير القفز الهيدروليكي المتطور في قناة مستطيلة اتسعت فجأة مع خصائص التدفق.

تحقيقاً لهذه الغاية ، ينقسم بحثنا إلى قسمين رئيسيين ، الأول يتعلق بدراسة ببليوغرافية 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: القفز الهيدروليكي، 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'évalue 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

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

- Re Nombre de Reynolds [-]
- R_h Rayon hydraulique correspondant au profil triangulaire [-]
- s Hauteur du seuil [m]
- S Hauteur relative du seuil [-]
- S_f Gradient de perte de charge [-]
- W_x Force de frottement agissant sur le volume de liquide [N]
- V Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiale et finale [m³]
- v_1 Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale [m.s⁻¹]
- v_2 Vitesse moyenne dans la section mouillée finale [m.s⁻¹]
- x Position de seuil [m]
- X Position relative de seuil [-]
- Y^* Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique [-]
- Y_s Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil [-]
- ν Viscosité cinématique [m².s⁻¹]

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Ressaut Hydraulique	10
Figure I.2.a : Ressaut ondulé	11
Figure I.2.b : Le pré-ressaut	11
Figure I.2.c : Le ressaut de transition	12
Figure I.2.d : Le ressaut stable	12
Figure I.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut	13
Figure I.4 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828)	15
Figure I.5 : Hauteur du ressaut	15
Figure I.6 : Aspect du ressaut classique	16
Figure I.7 : (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique	18
Figure I.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)	20
Figure II.1 : Ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince	24
Figure II.2 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative X/h_2 du seuil (Forster et Skinde, 1950).	24
Figure II.3 : Schéma simplifié du dispositif expérimental.	26
Figure II.4 : Variation expérimentale de C_0 en fonction de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince.	28
Figure II.5: Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de X/h_2 .	29
Figure II.6 : Contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour $X \cong L_j$	29
Figure II.7: Variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut	30
Figure II.8 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident ($X \cong L_j$).	
Figure II.9 : Variation expérimentale de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude incident F_1 lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire($X \cong L_j$).	32
Figure II.10: Variation expérimentale de la position relative X/h_1 du seuil à paroi mince en fonction de $(F_1 - 1)$ lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ($X \cong L_j$).	32

Figure III.1 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit	35
Figure III.2 : Variation de Y , calculé par (3.4), en fonction de Fr_1 . (- - -) : $\beta = 1$.	37
Figure III.3 : Variation de Y en fonction de Fr_1 . (o) : équation (3.6), (+) : équation (3.4).	38
Figure III.4 : Variation de η en fonction de Fr_1 . (- - -) : $\beta = 1$. Y est calculé par l'équation (3.3).	39
Figure III.5 : Variation de η en fonction de Fr_1 . (0) : équation (3.2), (+) : équation (3.1)	39
Figure IV.1: Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composé	48
Figure IV.2 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique	51
Figure V.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince En canal rectangulaire de section composée	56
Figure V.2: Variation du rapport des hauteurs du ressaut Y en fonction du débit relatif Q^* .	58
Figure V.3: Variation du rapport des hauteurs du ressaut hydraulique Y en fonction du débit relatif Q^* .	59
Figure V.4: Variation du coefficient a_1 en fonction de la hauteur relative amont y_1	60
Figure V.5 : Variation du coefficient b_1 en fonction de la hauteur relative aval y_1	60
Figure V.6 : Variation de la hauteur relative aval Y en fonction de (y_1, Q^*) .	61
Figure V.7 : Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^*	62
Figure V.8: Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^* .	63
Figure V.9 : Variation du coefficient a_2 en fonction de la hauteur relative aval y_1	63
Figure V.10 : Variation du coefficient b_2 en fonction de la hauteur relative amont y_1	64
Figure V.11 : Variation du rapport Y exp en fonction de $Y = f(y_1, Q^*)$.	64
Figure V.12 : Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^* .	65
Figure V.13: Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^* .	66
Figure V.14 : Variation du rapport Y en fonction de (y_1, Q^*) .	67
Figure V.15 : Variation de la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$ en fonction du débit relatif Q^*	68
Figure V.16 : Ressaut contrôlé en canal rectangulaire de forme composée. Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction du débit relatif Q^* ,	69
Figure V.17 : Variation du coefficient a_3 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	70
Figure V.18: Variation du coefficient b_3 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .	70
figure V.19 : Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction de $f(Q^*, y_1)$	71
Figure V.20 : Ressaut contrôlé en canal rectangulaire de forme composée en lit majeur.	71

Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction du débit relatif Q^*

Figure V.21 : Variation de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ en fonction du débit relatif Q^* 72

Figure V.22 : Variation du coefficient a_4 en fonction de la hauteur relative amont y_1 . 73

Figure V.23 : Variation du coefficient b_4 en fonction de la hauteur relative amont y_1 . 73

Figure V.24 : Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction de $f(Q^*, y_1)$ 74

Figure V.25: Variation du rapport seuil relatif $S= s/h_1$ en fonction du débit relatif Q^* . 75

Figure V.26: Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^* . 76

Figure V.27 : Variation du seuil relatif expérimentale $S=s/h_1$ en fonction des relations globales obtenues $S= (y_1, Q^*)$. 77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (II.1): Valeurs expérimentales C_o pour quelques positions relatives X/h_2 du seuil à paroi mince	27
Tableau (V.1) : récapitulation des résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du Q^* pour chaque ouverture h_1	59
tableau (V.2) regroupe les valeurs des coefficients de a_2 et b_2	63
tableau (V.3) regroupe les valeurs des coefficients de a_i et b_i	66
Tableau(V.4) récapitulation des couples de valeurs (a_3, b_3) de l'ajustement dans le tableau ci-dessous.	69
tableau (V.5) regroupe les valeurs des coefficients a_4 et b_4 .	72
Le tableau (V.6) regroupe les valeurs des coefficients de a_i et b_i	76

LISTE DES FOTOS

Photo II.1:Dispositif expérimental ayant servi à l'étude du ressaut contrôlé par un seuil dans un canal rectangulaire	25
Photo II.2 :Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire	30
Photo IV.1 : Photographie du model expérimentale du canal	49
Photo IV.2 : Pompe centrifuge axial	50
Photo IV.3:Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit	50
Photo IV.4 : Section de contrôle	50
Photo IV.5 : Photographie de convergent	52
Photo IV.6 : Photographie d'une boite en charge	53
Photo IV.7 : Photographie des seuils minces testés	53
Photo IV.8 Vanne de régulation	48
Photo IV.9 : Les ouvertures	49

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Abréviations

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES PHOTOS

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	01
INTRODUCTION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE.....	05

Chapitre I:

RESSAUTHYDRAULIQUE CLASSIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

I.1. Introduction.....	09
I.2. Définition.....	10
I.3. Ressaut hydraulique classique.....	10
I.3.1 Classification du ressaut classique	11
I.3.2 Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut	13
I.3.3 Caractéristiques géométriques du ressaut	15
I.3.3.1. Hauteurs du ressaut.....	15
I.3.3.2. Longueur du rouleau.....	16
I.3.3.3. Longueur du ressaut.....	17
I.3.3.4 Rendement du ressaut.....	18
I.4 CONCLUSION.....	21

Chapitre II

RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL MINCE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

II.1.Introduction.....	23
II. 2. Ressaut contrôlé par un seuil continu a paroi mince.....	24

II. 2.1 Approche de Forster et Skrinde.....	24
II. 2.2 Essais actuels pour $X \approx L_r$	25
II. 2.3 Essais actuels pour $X \approx L_j$	29
II. 3 CONCLUSIO.....	33

Chapitre III

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSEE

III. 1 INTRODUCTION.....	35
III.2. Rapport des hauteurs conjuguée	35
III.3. Rendement du	38
III. 4 CONCLUSIO.....	40
CONCLUSIO De La Partie Bibliographique.....	42
Deuxième Partie étude expérimentale.....	45

Chapitre IV

DESCRIPTION DU MODEL EXPERIMENTAL

IV .1 NTRODUCTION.....	47
IV.1 DESCRIPTION DU CANAL.....	47
IV.2 Limnimètre	51
IV.3. Le seuil à paroi mince.....	52
IV . 4 Les ouvertures	53
IV.5 CONCLUSION	54

CHAPITRE V

ETUDE EXPERIMENTALE

V.1 INTRODUCTION.....	56
V.1.1 Détermination expérimentale de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en lit composé.....	56
V .1.2 Description des essais.....	56
V .2. Rapport des hauteurs conjuguées	58
V.2.1 premier cas : ($\beta = b/B = 1$).....	58

V.2.2 Deuxième cas : ($\beta=b/B<1$).....	61
V.2.3.Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du débit relatif Q^* dans la section composée.....	65
V.3. Hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil en fonction du débit relatif Q^*	67
V . 3.1 Premier cas ($\beta=1, b=B$).....	67
V.3.2 Deuxième cas ($\beta=b/B<1$)($b=20\text{cm}$, $B=60\text{ cm}$).....	71
V.3.3. Hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil en fonction du débit relatif Q^*	74
V. 4 CONCLUSION.....	78
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE.....	80
CONCLUSION GENERALE.....	82
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	85

Le ressaut 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 F_1 à l'amont du ressaut. Les auteurs concluent que pour la gamme pratique des nombres de Froude tels que $4 < F_1 < 12$, 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 F_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 brusquement élargi aux caractéristiques de l'écoulement et d'en déduire permettent des relations expérimentales adimensionnelles à caractère générales permettant au dimensionnement des ouvrages annexes du barrages tel que le bassin d'amortissement.

Notre contribution est scindée en deux parties primordiales

➤ 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 mince dans un canal rectangulaire de (Forster et Skinde, 1950; Achour, 1997)

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 aux caractéristiques de

l'écoulement . L'objectif essentiel de cette recherche est d'étudier expérimentalement les relations fonctionnelles liant les différents paramètres 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 phénomène régissant le ressaut hydraulique, dans un canal rectangulaire de forme composée

- ✓ Le cinquième et dernier chapitre de cette étude expérimentale sera le ressaut hydraulique en canal rectangulaire de forme composé, les seuls travaux sur ce type de ressaut c'est ceux du ressaut classique (Khattaoui et Achour 2011), à travers cette contribution expérimentale on va analyser l'effet des ouvertures caractéristiques du ressaut hydraulique et pour atteindre cet objectif deux cas seront étudiés : cas où l'écoulement s'effectuera au niveau du lit mineur du canal, et le deuxième cas où l'écoulement s'effectuera au niveau du lit majeur et finalement on déduira des relations fonctionnelles entre la section composée. Des relations fonctionnelles seront établies, qui sont adimensionnels, le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées, le rapport $S=s/h_1$ du seuil, du ressaut en fonction du débit relatif Q^* .

Ce chapitre sera consacré à l'établissement des relations fonctionnelles entre le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée et une analyse expérimentale des équations empiriques existantes.

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 de citer 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 nul, 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 mince dans un canal rectangulaire a été expérimentalement testé. Lorsque le seuil est placé à une distance X environ égale à la longueur L_r du ressaut.

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. 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 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).

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 : $F_1 = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$ (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 (1986), 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).

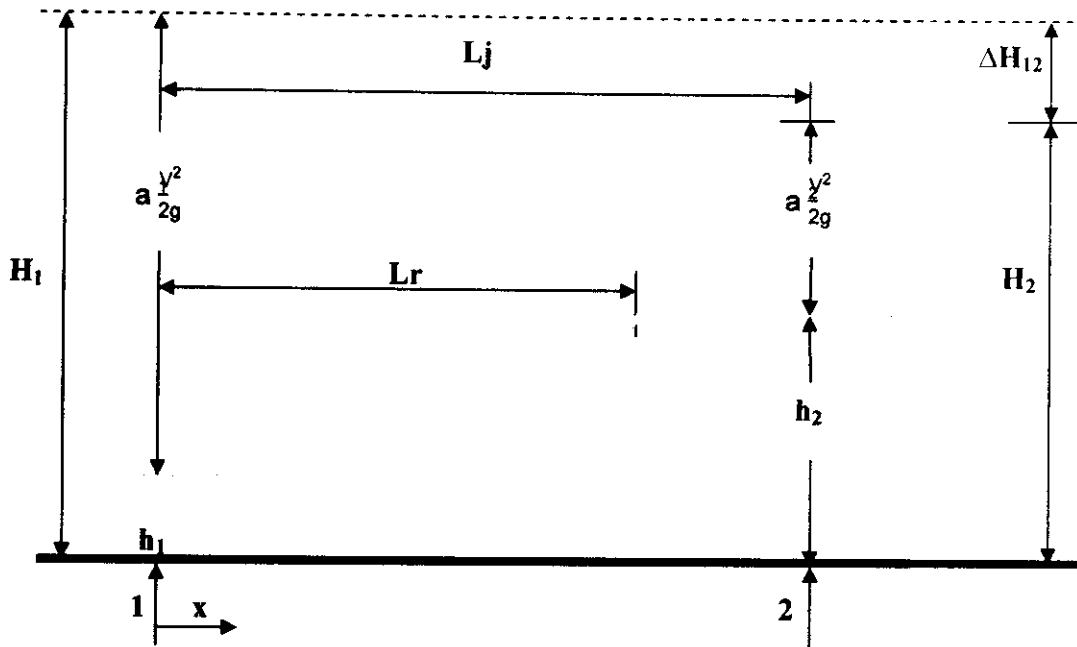


Figure I.1: Ressaut Hydraulique

Les hauteurs h_1 et h_2 sont appelées profondeurs conjuguées 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).

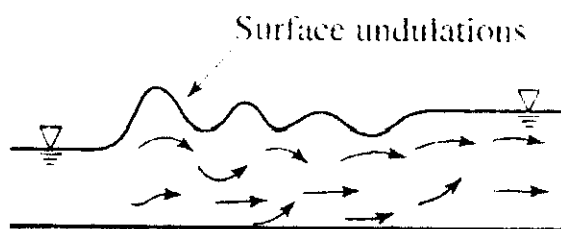


Figure 1.2.a : Ressaut ondulé

Selon la classification de Bradly et Peterka (1957) on distingue quatre formes de ressaut classique.

- 1- 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).

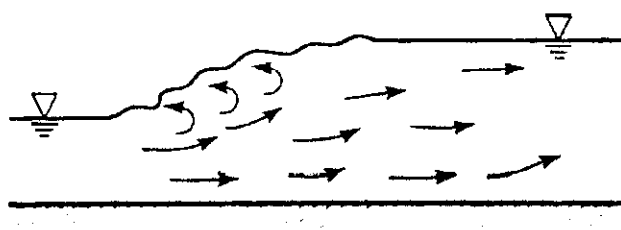


Figure 1.2.b : Le pré-ressaut

- 2- 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.

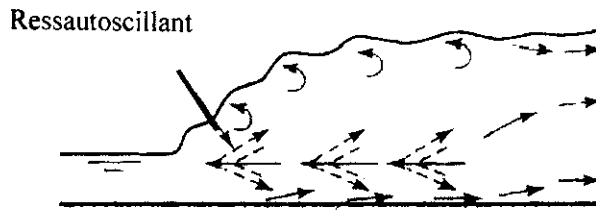


Figure 1.2.c : Le ressaut de transition

- 3- 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

- 4- 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)

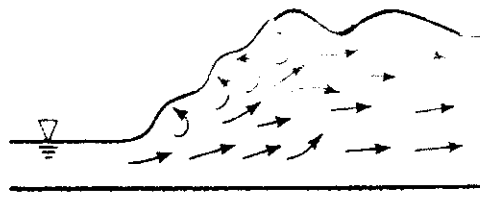


Figure 1.2.e : Le ressaut clapoteux

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 $\frac{V^2}{2g}$ représente la perte de charge, n'est pas connu et que les formules du régime uniforme sont pas applicables. C'est le théorème d'Euler qui permet de résoudre ce problème. Considérons un ressaut classique évoluant entre la section initiale et finale respectivement 1 et 2 (figure 1.3).

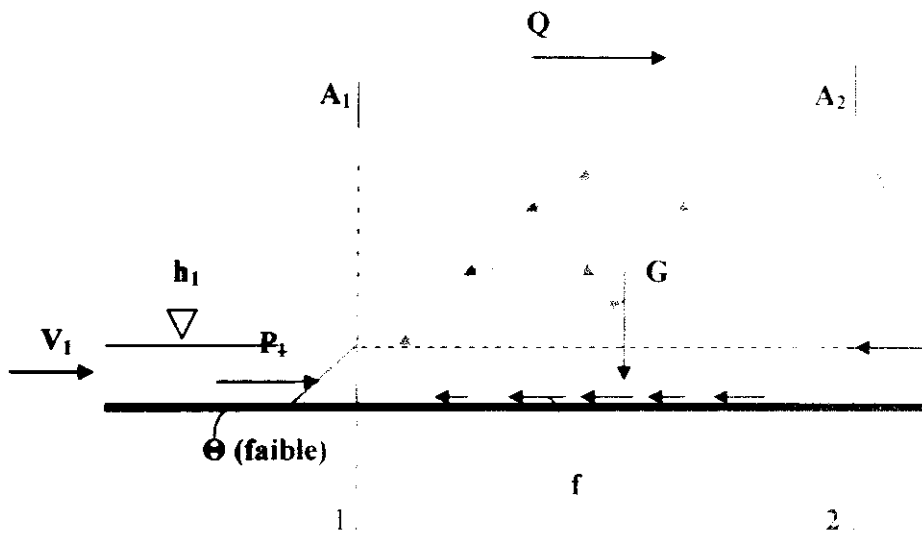


Figure 1.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut

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

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

$$A_1 = b \cdot h_1$$

D'après le résultat classique dû à Bélanger (1828-1905) et basé sur le théorème d'Euler qui ne fait intervenir que les forces de pression, on a :

On détermine les profondeurs conjuguées en négligeant 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 :

$$B_2 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_2 - \beta_1 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_1 = P_1 - P_2 + G \cdot \sin \theta - f \quad (1.3)$$

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 :

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

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

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

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

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

1.3.3.2. Longueur du rouleau

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

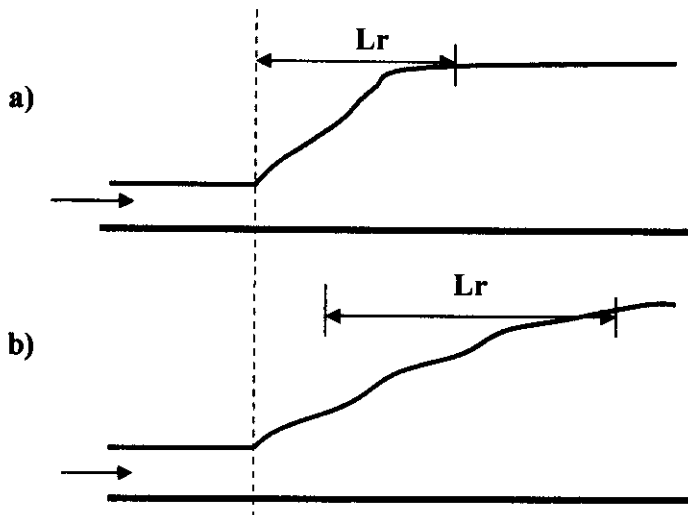


Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique
a) Rouleau développé, b) Rouleau non développé

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 $w = \frac{h_1}{b}$

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

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

<<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 de pente 8.

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

1.3.3.3. 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 varié 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 :

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

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 (1980) on a :

$$\bullet \text{ formule de Smetana (1933) } L_j = 6(h_2 - h_1) \quad (1.13) \quad \text{Pour}$$

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

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

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.

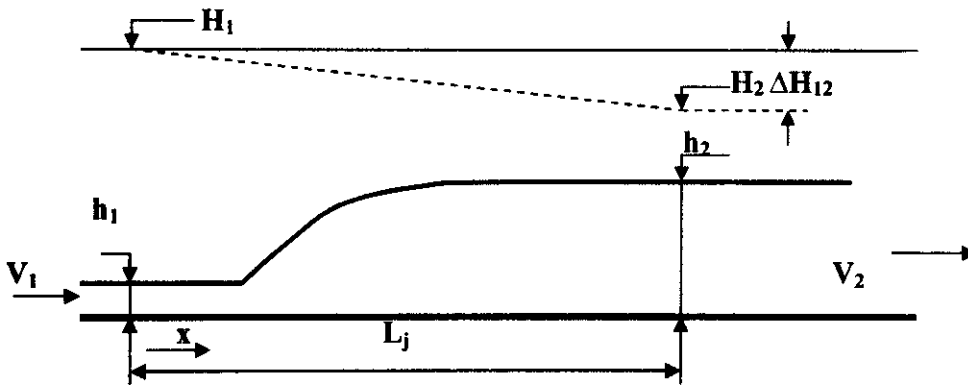


Figure 1.7 : (----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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 calculs faits, l'expression classique de la perte de charge due au ressaut en canal rectangulaire de pente faible ou nulle.

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

$q = \frac{Q}{b}$ 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 :

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

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

Où Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique définit 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 :

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

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)

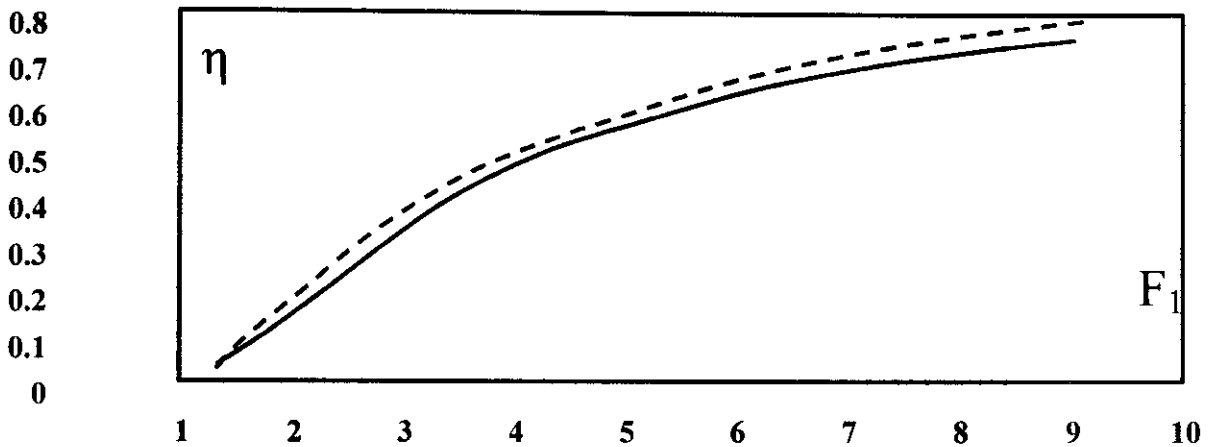


Figure 1.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 (—) Courbe tracée selon la relation (1.25), (-----) courbe tracée Selon la relation (1.26)

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%.

1.4 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.

II.1 INTRODUCTION

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse (Forster et Skinde, 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). L'analyse dimensionnelle montre que la relation liante :

- Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident
- La hauteur géométrique s du seuil
- La hauteur initiale h_1 du ressaut
- La hauteur h_2 à l'amont immédiat du seuil
- La position X du seuil comptée à partir du pied du ressaut
- La profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval du seuil

Peut s'écrire sous la forme $s / h_1 = f(F_1, X / h_2, h_3 / h_1)$. La position X du seuil ne peut-être analytiquement déterminée et la fonction f doit être définie par la voie expérimentale.

Pour le cas d'un seuil continu à paroi mince de hauteur géométrique s supérieure à la hauteur minimale d'apparition du ressaut, Forster et Skrinde (1950) ont établi des courbes expérimentales montrant la variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 . Le seuil testé est dénoyé et la profondeur h_3 n'a aucune influence sur l'écoulement amont. La relation fonctionnelle ci-dessus indiquée se réduit alors à $s / h_1 = f(F_1, X / h_2)$.

Le ressaut est tel que son rouleau de surface, de longueur L_r , coïncide avec la position X du seuil. Trois valeurs seulement de la position relative X/h_2 ont été considérées (3, 5 et 10).

Notre étude s'intéresse au ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal de section droite rectangulaire. Deux configurations du ressaut sont considérées. La première configuration répond aux conditions expérimentales de Forster et Skrinde (1950) ($X \neq L_r$). Nos essais ont eu pour but de définir la fonction f pour un grand nombre de valeurs de X/h_2 et ont permis ainsi d'aboutir à des résultats significatifs.

La deuxième configuration correspond à un ressaut contrôlé dont la longueur L_j coïncide avec la position X du seuil. L'analyse des mesures expérimentales a également permis de corréler les divers paramètres intervenant au phénomène. Une approche théorique est enfin proposée à

l'étude du ressaut contrôlé dont l'écoulement incident est généré par la mise en place d'un déversoir.

II.2 Ressaut contrôlé par un seuil continu a paroi mince

II.2.1 Approche de Forster et Skrinde

La figure (2.1) montre un ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince dans un canal rectangulaire. Le seuil de hauteur s est dénoyé et fonctionne alors comme un déversoir. La profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval du seuil n'a aucune influence sur le comportement du ressaut et répond à l'inégalité : $h_3 < h_2 \frac{3}{4} s$ (2.1)

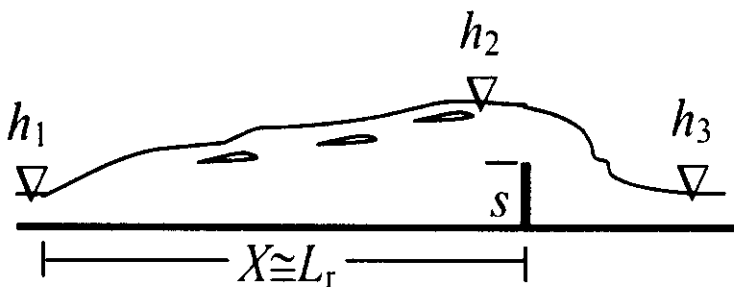


Figure II.1 : Ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince

La figure (2.2) montre la variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les valeurs 3, 5 et 10 de la position relative X/h_2 du seuil.

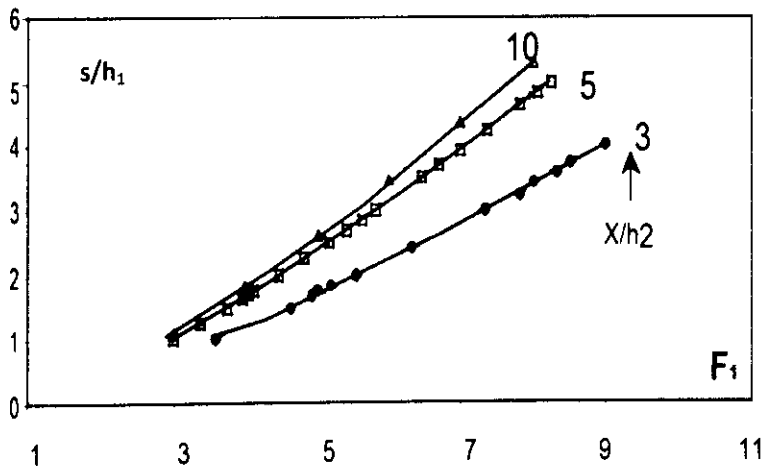


Figure II.2 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative X/h_2 du seuil (Forster et Skinde, 1950).

La figure (2.2) montre que tout point du diagramme est représenté par la paire de coordonnées $(F_1, s/h_1)$. Lorsque les valeurs de ces coordonnées sont définies, le diagramme permet de déterminer le paramètre X indiquant l'emplacement du seuil. Si le point défini par $(F_1, s/h_1)$ se situe :

- Entre deux courbes du diagramme, la valeur de la position relative X/h_2 doit être déterminée par interpolation.
- Au-dessus de l'une des courbes du diagramme, le seuil de hauteur s est trop haut et le ressaut peut se déplacer vers l'amont sous l'influence du seuil.
- Au-dessous de l'une des courbes du diagramme, le seuil est trop bas et le ressaut peut se déplacer vers l'aval en laissant place à un écoulement torrentiel sur le radier du bassin amortisseur.

Ainsi, le diagramme représenté sur la figure (2.2) est à la base du dimensionnement du bassin amortisseur à ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince. La méthode est cependant graphique, nécessitant en règle générale des interpolations, et seules trois courbes sont proposées.

Nos essais, que nous exposerons dans ce qui suit, ont eu pour principal objectif de compléter les résultats de Forster et Skrinde (1950) et de définir de manière explicite la relation fonctionnelle $f(F_1, S, X/h_2) = 0$

II.2.2 Essais actuels pour $X \approx L_r$

L'expérimentation a été menée dans un canal rectangulaire de largeur $b=0,30\text{m}$ et d'une longueur de 10 m, alimenté en circuit fermé par une pompe débitant 35 l/s. Les parois du canal sont en verre tandis que son fond est métallique. Des limnimètres à vernier sont disposés le long du canal par le biais de traverses supportées de part et d'autre par les parois du banc d'essais photo (2.1) et figure (2.4).



Photo II.1: Dispositif expérimental ayant servi à l'étude du ressaut contrôlé par un seuil dans un canal rectangulaire.

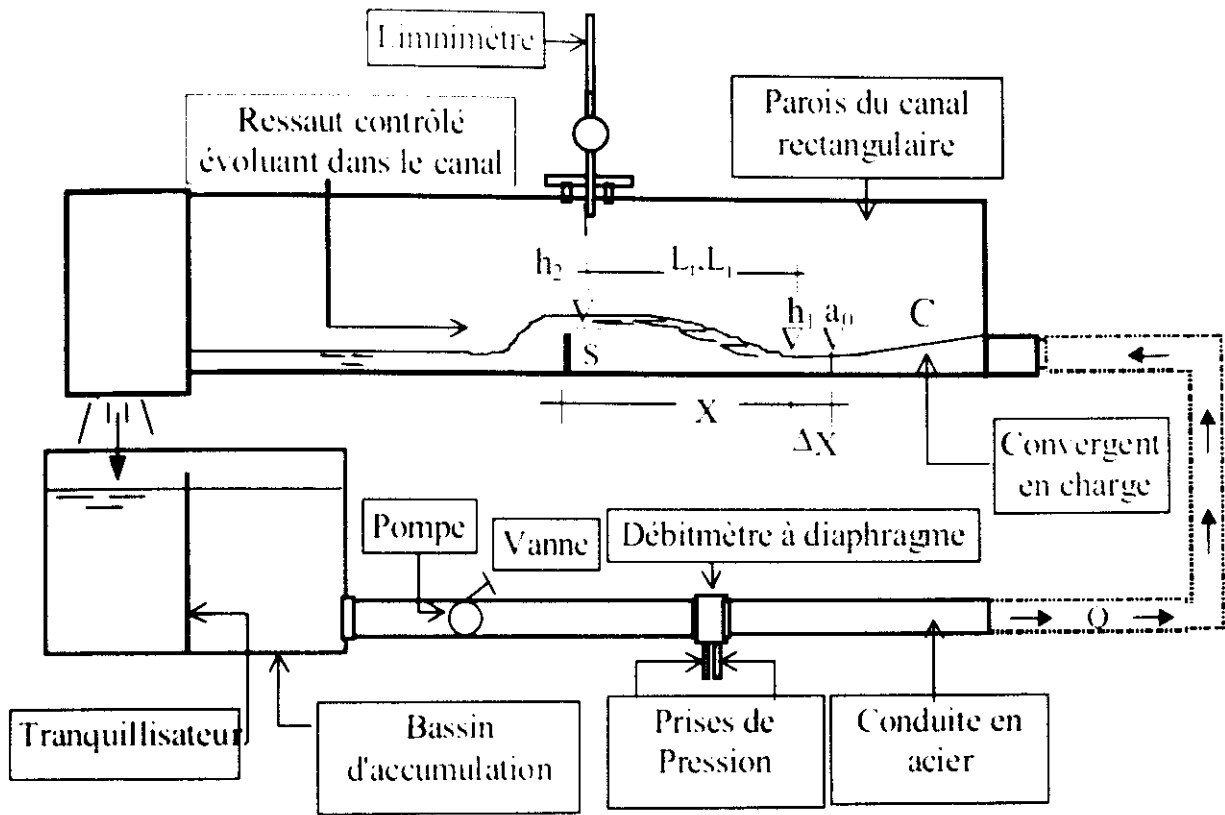


Figure II.3 : Schéma simplifié du dispositif expérimental.

L'écoulement incident est généré par un convergent en charge "C" d'un mètre de longueur et de même largeur que le canal de mesure. Ses ouvertures initiale et finale sont respectivement de 2 cm et 15 cm et il est connecté à une boîte sous pression étanche de même largeur. L'ensemble boîte-convergent est directement alimenté par la pompe par le biais d'une tuyauterie flexible.

La boîte sous pression ainsi que le convergent sont munis de guideaux soigneusement disposés afin d'assurer au mieux la stabilité et l'uniformité de l'écoulement incident. Une paroi verticale étanche est disposée au-dessus de la boîte et sur toute sa largeur afin d'éviter toute submersion lorsque le ressaut est noyé et le canal de mesure inondé. L'ensemble du dispositif constitué du convergent et de la boîte sous pression peut se déplacer horizontalement afin de régler la position X du seuil à la valeur désirée.

Cette opération peut également être réalisée par le déplacement horizontal du seuil, mais elle est cependant beaucoup plus contraignante du fait que le seuil est soigneusement fixé et son étanchéité assurée.

Chapitre II RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL MINCE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

La hauteur géométrique s du seuil ainsi que sa position X sont choisies de telle sorte que le rapport X/h_2 prenne des valeurs comprises entre 3 et 10 ; les essais sont exécutés avec un pas de variation $\Delta (X/h_2) \cong 0,5$.

L'ouverture a_0 du convergent peut être réglée à volonté ainsi que la hauteur géométrique s du seuil ; ceci permet d'obtenir une très large gamme de valeurs de la hauteur relative s/h_1 .

Le pied du ressaut est réglé à une distance $\Delta X \cong 5\text{ cm}$ et la hauteur initiale h_1 peut être raisonnablement assimilée à l'ouverture a_0 du convergent. La mesure limnimétrique de h_1 est très délicate en raison du caractère fortement torrentiel de l'écoulement incident.

Les résultats que nous allons présenter concernent la gamme pratique du nombre de Froude F_1 tel que $3 \leq F_1 \leq 9$. Les valeurs de la hauteur relative s/h_1 du seuil qui correspondent à cette gamme de F_1 sont telles que $1 \leq s/h_1 \leq 6$.

En raison du fait que le pas de variation de X/h_2 choisi lors de nos essais est faible, les courbes expérimentales de $s/h_1 = f(F_1)$ qui en résultent sont très rapprochées et ne seront pas toutes représentées.

L'analyse des mesures expérimentales obtenues a surtout montré que la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil est liée au nombre de Froude $F = \sqrt{q^2/gh_1^3}$ par une relation de type puissance; q est le débit unitaire et g est l'accélération de la pesanteur:

S = C₀ (F₁- 1)^β (2.2)

Le principal résultat que nous pouvons retenir est que l'exposant β figurant dans la relation (2.2) prend une valeur quasi constante d'environ 5/4 pour toute la gamme $3 \leq X/h_2 \leq 10$; seul le paramètre C_0 varie et sa variation peut être liée à celle de la position relative X/h_2 du seuil. Nous tenterons alors de définir la fonction $C_0 = \psi (X/h_2)$ à partir des résultats expérimentaux. Le tableau(2.1) regroupe les valeurs expérimentales de C_0 qui correspondent aux diverses positions relatives X/h_2 choisies.

Tableau II.1: Valeurs expérimentales C_0 pour quelques positions relatives X/h_2 du seuil à paroi mince

X/h ₂	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
C ₀	0,300	0,330	0,360	0,390	0,421	0,425	0,429	0,433	0,444
X/h ₂	7,5	8	8,5	9	9,5	10			
C ₀	0,447	0,450	0,453	0,456	0,459	0,463			

Les valeurs expérimentales de C_0 ci-dessus indiquées sont traduites graphiquement sur la figure (2.5). Celle-ci montre que la courbe de variation $C_0 = \psi(X/h_2)$

peut être assimilée à deux tronçons de droites D_1 et D_2 sur l'ensemble de l'intervalle $3 \leq X/h_2 \leq 10$. Un ajustement linéaire basé sur la méthode des moindres carrés a permis d'écrire que :

$$C_0 = 0.0604 (X / h_2) + 0.1186 , 3 \leq X/ h_2 \leq 5 , R^2 = 1 \tag{2.3}$$

$$C_0 = 0.0086 (X / h_2) + 0.379 , 5 \leq X/ h_2 \leq 10 , R^2 = 0.973 \tag{2.4}$$

Les valeurs expérimentales de la hauteur relative S du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 sont représentées graphiquement sur la figure (2.6). Celle-ci montre que les courbes se rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que X/h_2 augmente. Il apparaît ainsi que dans la gamme relativement large $5 \leq X/ h_2 \leq 7$, voire même $5 \leq X/ h_2 \leq 10$, la variation que subit la hauteur relative S pour le même nombre de Froude F_1 n'est pas significative.

En outre, l'allure des courbes expérimentales obtenues semble indiquer que pour F_1 tendant vers l'unité la hauteur relative S tend vers zéro. L'égalité $F_1 = 1$ traduit la condition de criticité ($q^2/gh^3 = 1$) et implique un rapport des hauteurs conjuguées du ressaut $Y = h_2/h_1 = 1$ ($h_2 = h_1$ = profondeur critique). Cette dernière égalité ne peut être satisfaite que si la hauteur géométrique s du seuil, et par conséquent la hauteur relative S , est nulle.

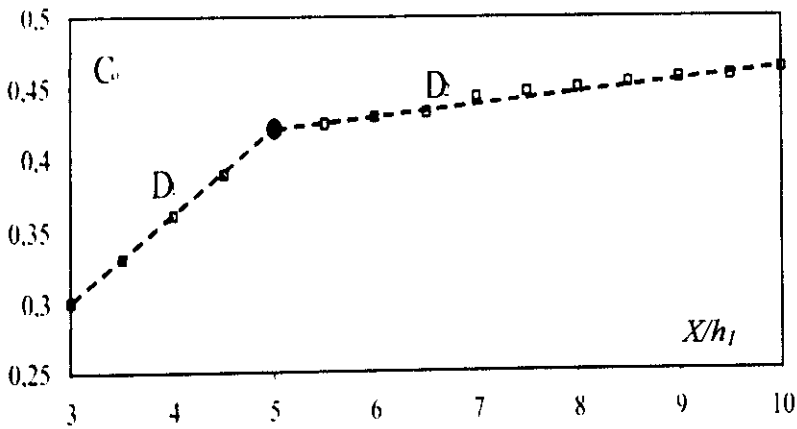


Figure II.4 : Variation expérimentale de C_0 en fonction de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince.

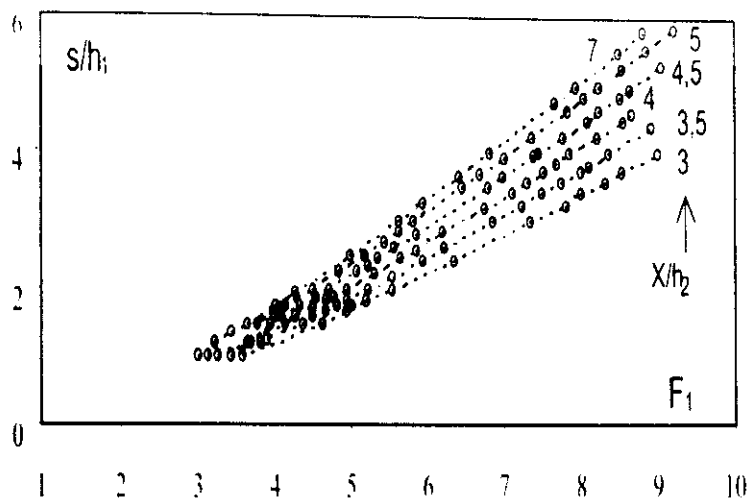


Figure II.5: Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de X/h_2

II.2.3 Essais actuels pour $X \cong L_j$

Cette partie de notre étude s'intéresse au ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince placé à une distance X environ égale à la longueur L_j du ressaut (figure (2.7) et photo(2.2)).

Les essais ont été effectués sous une large gamme de valeurs du nombre de Froude incident F_1 tel que $1.5 \leq F_1 \leq 25$, mais nous nous limiterons à la gamme pratique $3 \leq F_1 \leq 9$. Au-delà de la valeur 9 du nombre de Froude F_1 , le ressaut est considéré comme étant fort et le rapport Y des hauteurs conjuguées ne satisfait pas l'équation de Belanger. Les valeurs mesurées de Y sont en effet inférieures à celles calculées et ceci peut être dû au changement des caractéristiques du ressaut et au frottement. Aux valeurs élevées de F_1 , la répartition de la pression n'est plus hydrostatique notamment à l'aval du ressaut et la distribution de la vitesse n'est plus uniforme comme le suppose le développement théorique qui a servi de base à l'établissement de l'équation de Belanger, applicable au ressaut classique.

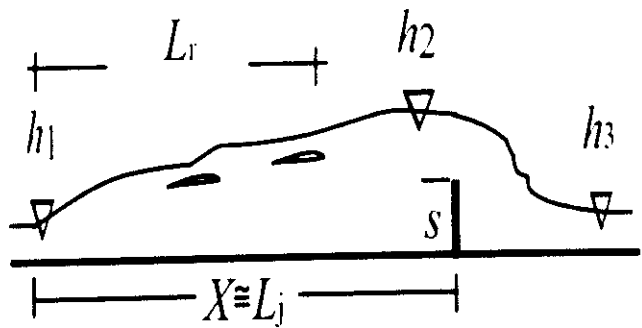


Figure II.6 : Contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour $X \cong L_j$



Photo II.2 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire

$F_1 = 7.74$, $h_1 = 2.5$ cm, $s = 14$ cm et $X = 184$ cm.

Dans la gamme de valeurs $3 \leq F_1 \leq 9$, les essais n'ont montré aucun effet de frottement et le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées peut donc être évalué par application de la relation:

$$Y = (1/2)[(1 + 8F_1^2)^{1/2} - 1] \quad (2.5)$$

Dans un premier temps, notre étude s'est intéressée à la détermination de la hauteur relative s/h_1 du seuil nécessaire à la formation du ressaut tel qu'il est représenté sur la figure (2.9) et pour la gamme pratique ci-dessus indiquée de F_1 . Les mesures expérimentales sont représentées graphiquement sur les figures (2.9) et (2.10) montrant respectivement la variation de

$\xi(Y, s/h_1) = 0$ et $\zeta(F_1, s/h_1) = 0$

Ainsi, des courbes uniques sont obtenues et un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés a permis de corrélérer avec une excellente approximation les paramètres Y , s/h_1 et F_1 :

$$Y = 2.37 (s/h_1)^{0.8} + 1, R^2 = 0.996 \quad (2.6)$$

$$s/h_1 = 0.562(F_1 - 1)^{1.225}, R^2 = 0.993 \quad (2.7)$$

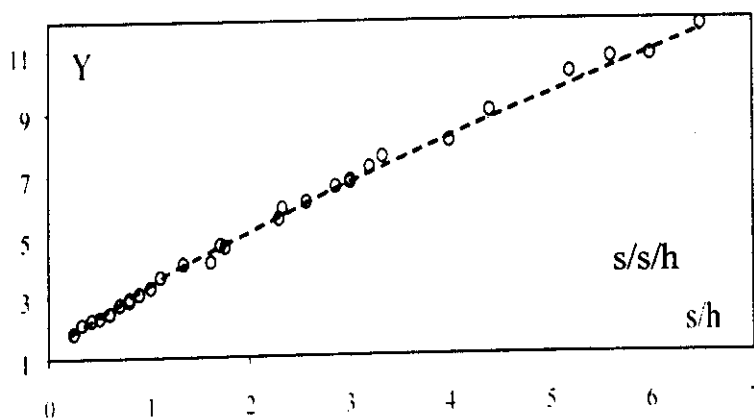


Figure II.7: Variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince ($X \cong L_j$)

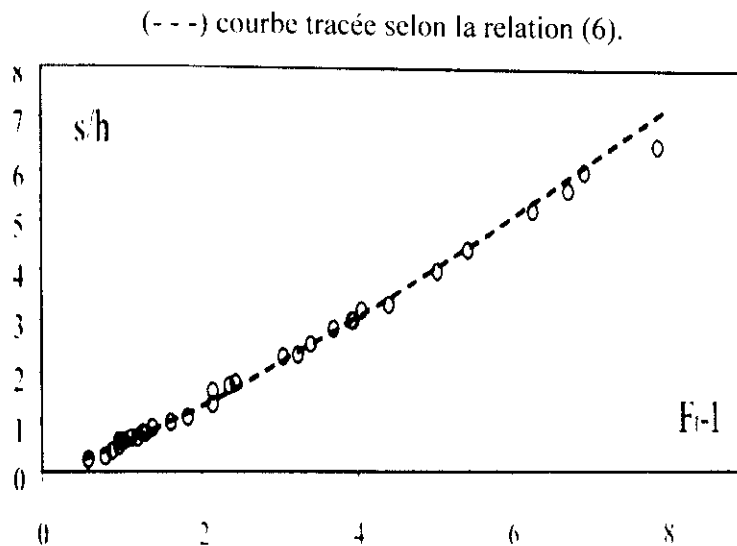


Figure II.8 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident ($X \cong L_j$).

(- - -) courbe tracée selon la relation (2.7).

Notre étude s'est enfin intéressée à l'évaluation de la position X du seuil nécessaire à la formation complète du ressaut. Lorsque le seuil est placé à une distance $X = L_j$, le ressaut peut être considéré comme un ressaut classique caractérisé par un rapport X/h_2 environ égal à 6 (Peterka, 1983). Cette tendance semble être confirmée par nos mesures expérimentales représentées graphiquement sur la figure (2.11), notamment pour les valeurs élevées du nombre de Froude incident F_1 .

La figure (2.11) n'indique aucune influence significative du nombre de Froude incident F_1 ($F_1 > 3$) sur la position relative X/h_2 du seuil. A ces valeurs élevées de F_1 , la surface libre de l'écoulement à l'aval du ressaut subit des perturbations plus ou moins importantes rendant imprécise la mesure limnimétrique de la profondeur h_2 ($\Delta h_2 = \pm 1,5$ cm). Les mesures expérimentales obtenues se traduisent alors par un nuage de points réparti toutefois autour de la valeur moyenne $X/h_2 = 6$. L'analyse des mesures expérimentales nous a permis de corréler de manière plus significative la position relative X/h_1 du seuil au nombre de Froude incident F_1 . La figure (2.12) montre la variation expérimentale de la fonction $\varphi(F_1, X/h_1) = 0$, en rappelant que F_1 est lié à la hauteur relative $S = s/h_1$ par la relation (2.7). Un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés a permis d'écrire

$$X / h_1 = 10 (F_1 - 1), R^2 = 0.995 \quad (2.8)$$

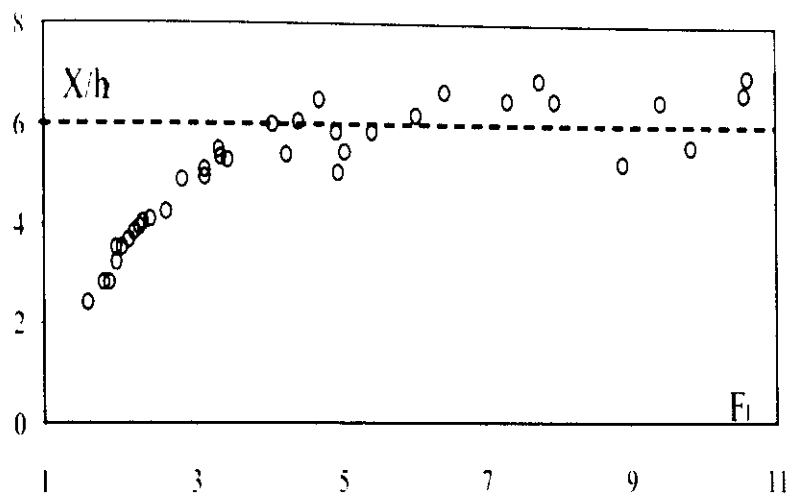


Figure II.9 : Variation expérimentale de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude incident F_1 lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire($X \cong L_j$).

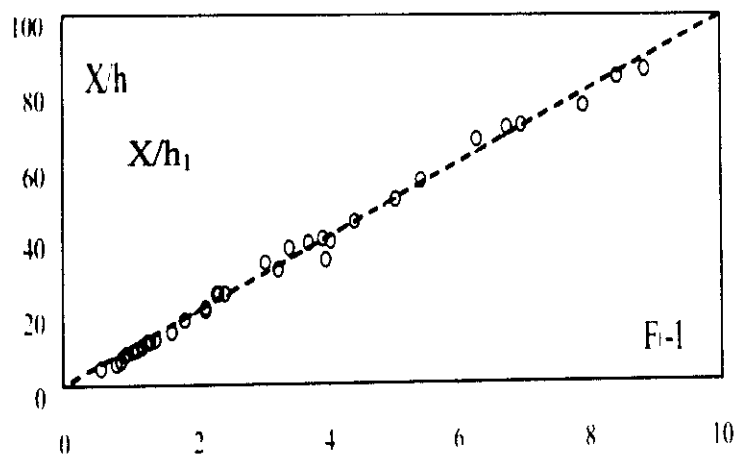


Figure II.10: Variation expérimentale de la position relative X/h_1 du seuil à paroi mince en fonction de $(F_1 - 1)$ lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ($X \cong L_j$).
(- - -) courbe tracée selon la relation (2.8).

II.3 CONCLUSION

Le ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince dans un canal rectangulaire 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 telle que $S = C_0 \cdot (F_1 - 1)^{5/4}$. Le paramètre C_0 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.

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 (3.1) montre les différentes caractéristiques géométriques et hydrauliques du ressaut hydraulique en lit composé droit.

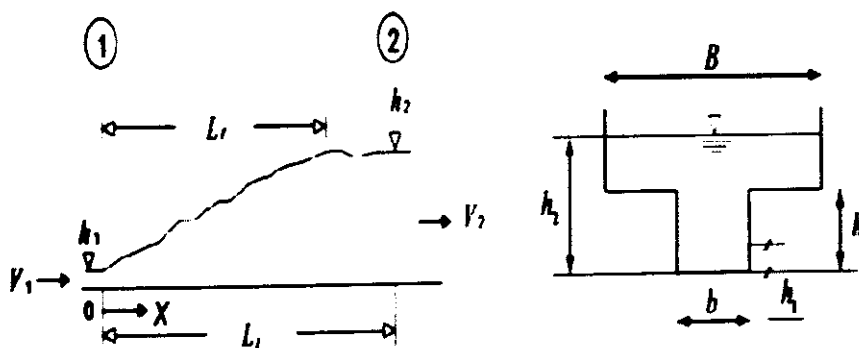


Figure III.1 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit

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 Borda-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 :

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

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 :

$$2Fr_1^2 \left(\frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} - \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta} - \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (3.4)$$

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

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 minimal $Fr_{1min} = \left[\frac{1}{(2\sqrt{2})} \right] \sqrt{\left(\frac{2}{\tau} \right)^2} - 1$ 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 .

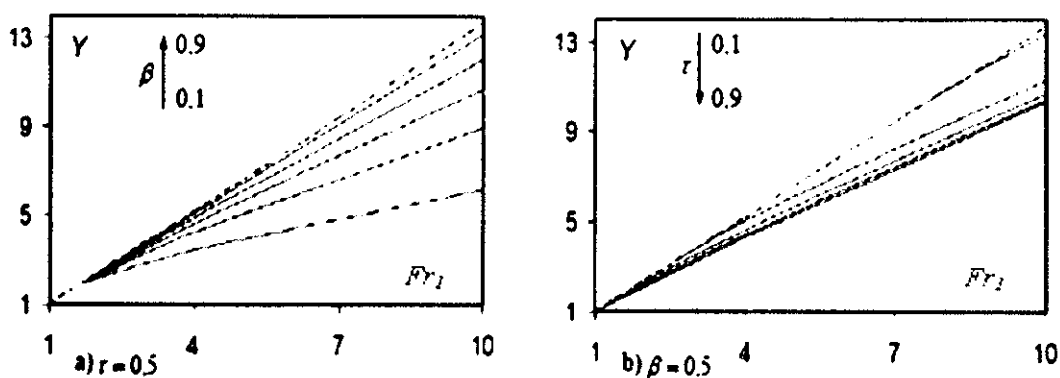


Figure III.2 : Variation de Y , calculé par (3.4), en fonction de Fr_1 . (---) : $\beta = 1$.

Sur la (figure 3.2) nous avons représenté la variation de Y en fonction de Fr_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. On voit clairement que les Y calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée 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_x traduit les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

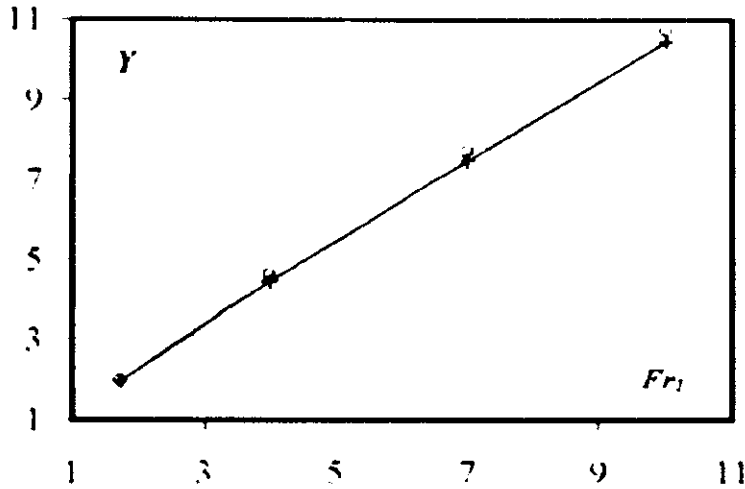


Figure III.3 : Variation de Y en fonction de Fr_1 . (o) : équation (3.6), (+) : équation (3.4).

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 illustrer 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 connu, en fixant Fr_1 , η diminue avec l'augmentation de β . Pour un β et un Fr_1 fixés, on peut aisément voir que le η augmente avec l'accroissement de τ .

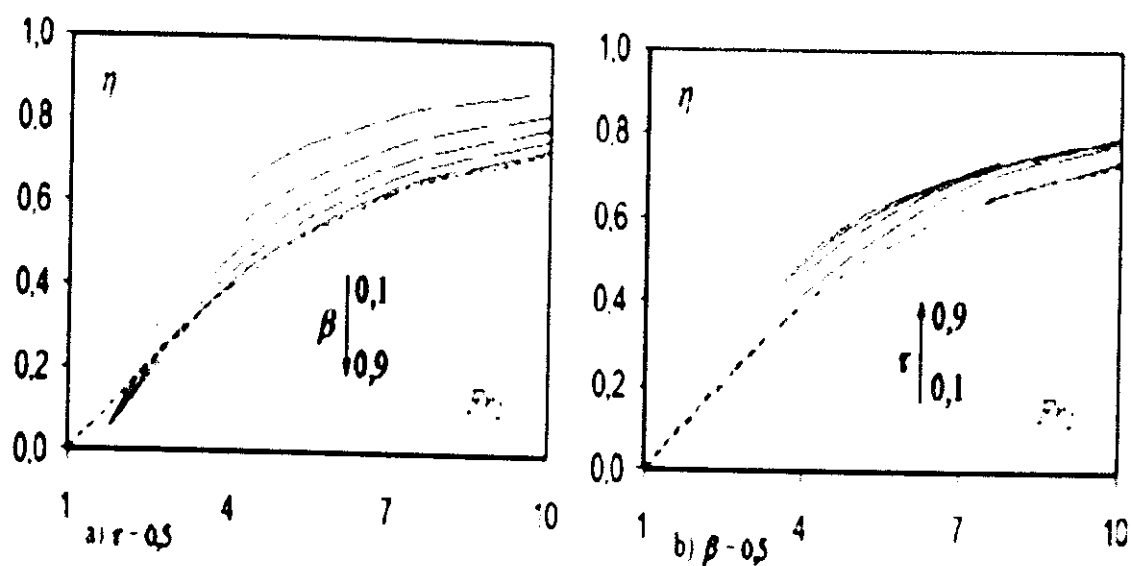


Figure III.4 : Variation de η en fonction de Fr_1 . (---) : $\beta = 1$. η est calculé par l'équation (3.3).

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.

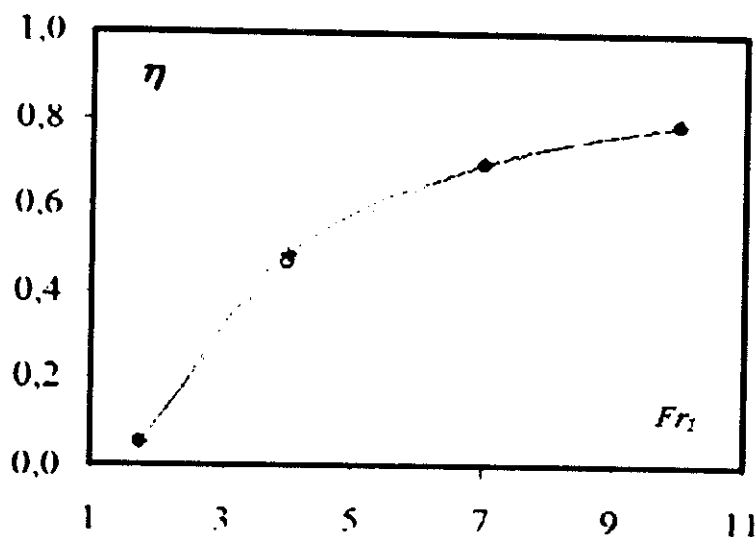


Figure III.5 : Variation de η en fonction de Fr_1 . (0) : équation (3.2), (+) : équation (3.1)

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

CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

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 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.

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 (4.1) et la photo (4.2). 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 (4.3) qui alimente un convergent en charge (permettant de générer un écoulement à grande vitesse) photo (4.6), 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 à 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 (4.5), permettant la mesure du débit.

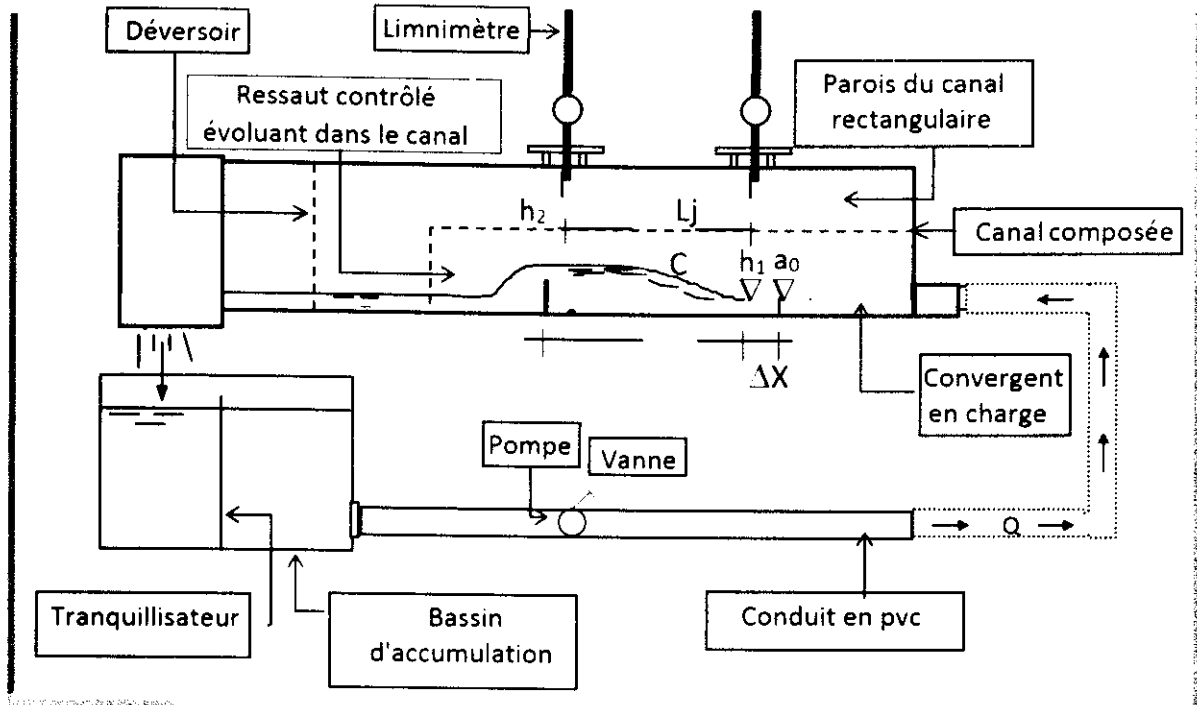


Figure IV.1: Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composé

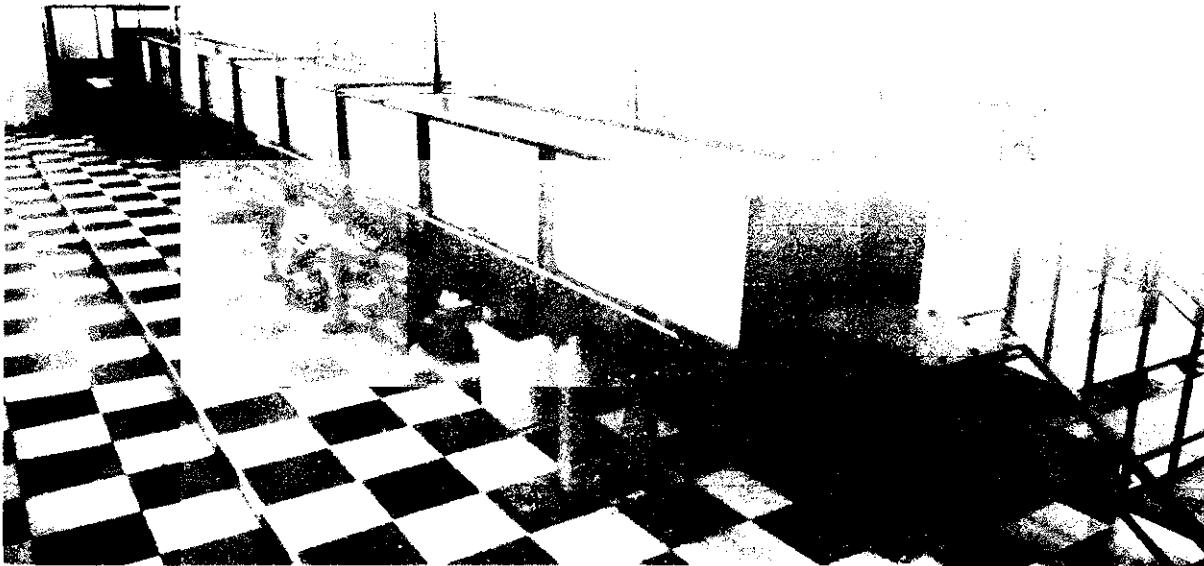


Photo IV.1 : Photographie du model expérimentale du canal



Photo IV.2 : Pompe centrifuge axial

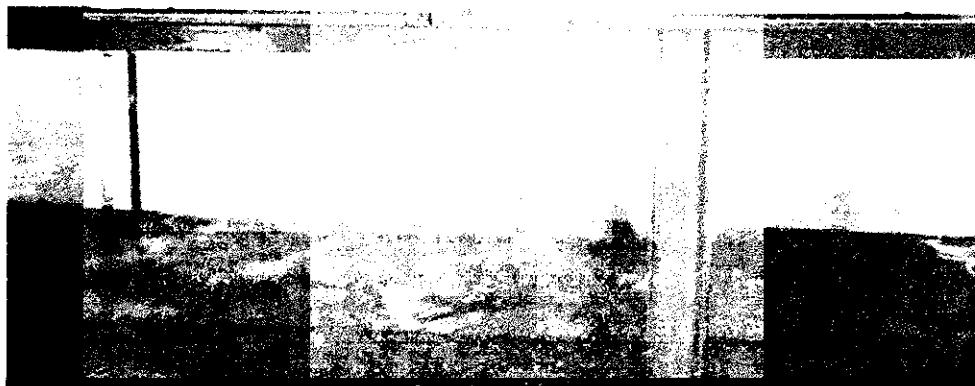


Photo IV.3: Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit

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 *Hachemi Rachedi L. (2006)*

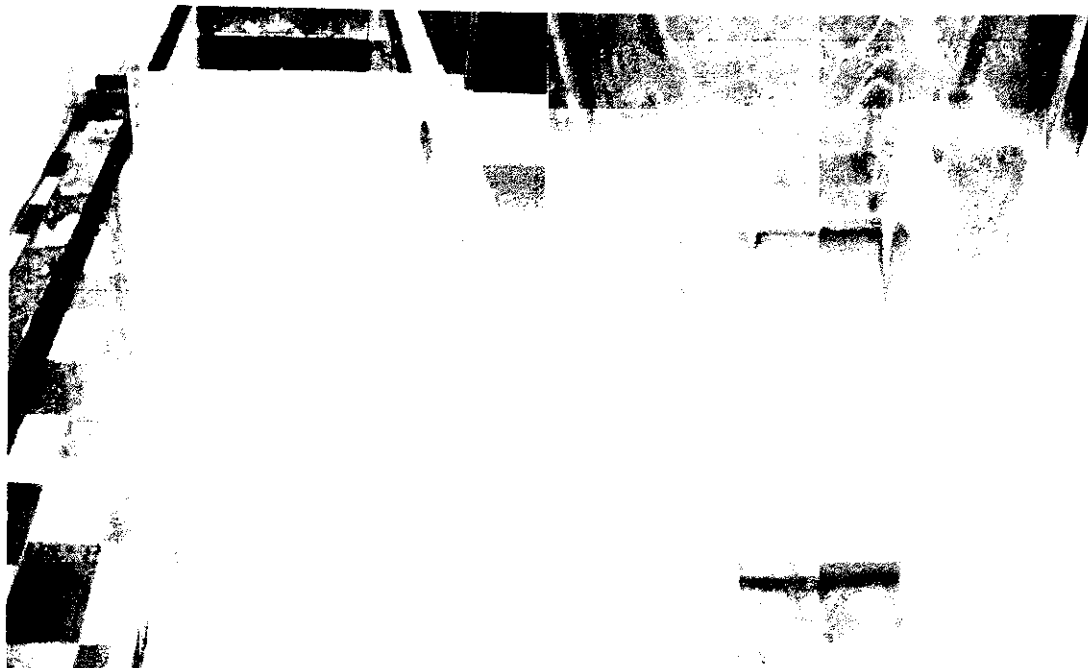


Photo IV.4 : Section de contrôle

Photo 4.5 : Photographie de convergent



Photo IV.6 : Photographie d'une boîte en charge

IV.2 Limnimètre :

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 limnimétrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau figure (4.8).

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.

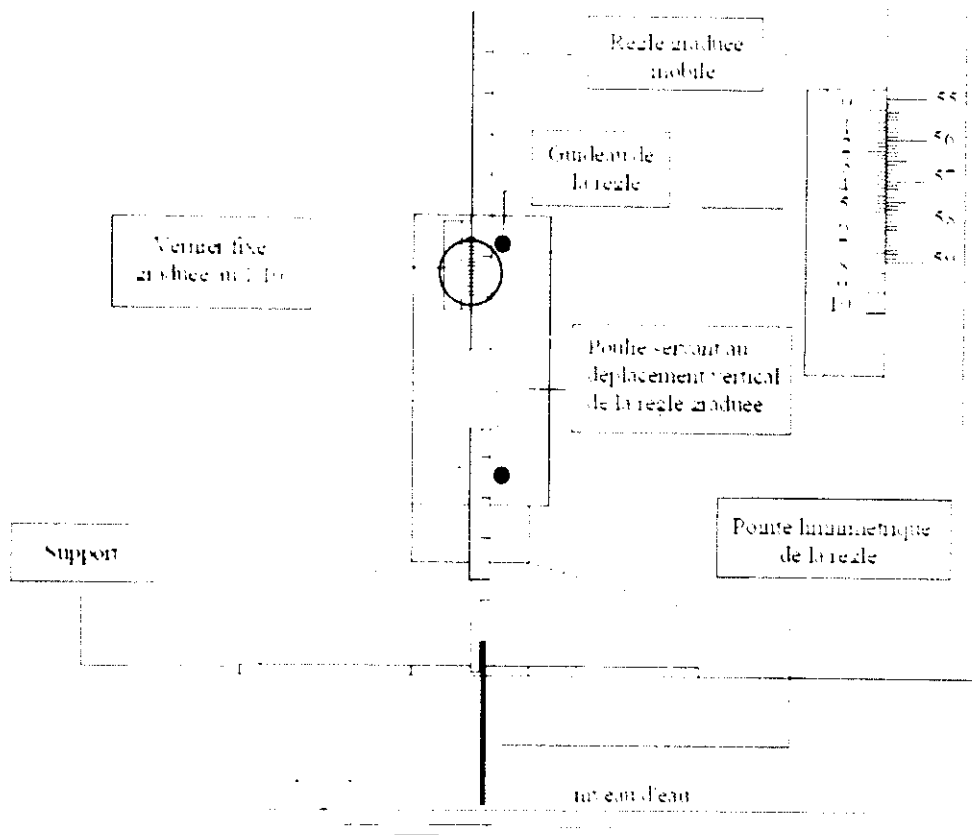


Figure IV.2 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique

IV.3 Le seuil à paroi mince

Les seuils utilisés dans notre dispositif expérimental, sont façonnées de fer en forme rectangulaire.

Dans le but d'obtenir un nombre important de points de mesures, nous avons préparé 18 seuils minces de différentes hauteurs photo (4.9) :

$s = 2 \text{ cm}; 3 \text{ cm}; 4 \text{ cm}; 5 \text{ cm}; 6 \text{ cm}; 7 \text{ cm}; 8 \text{ cm}; 9 \text{ cm}; 10 \text{ cm}; 11 \text{ cm}; 12 \text{ cm}; 13 \text{ cm}; 14 \text{ cm}; 15 \text{ cm}; 16 \text{ cm}; 17 \text{ cm}; 18 \text{ cm}; 19 \text{ cm}; 20 \text{ cm}.$



Photo IV.7 : Photographie des seuils minces testés



Photo IV.8 Vanne de régulation

IV.4 Les 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 torontionnel . nous avons préparé 05 ouvertures de différentes hauteurs photo (4.11) : $s = 2$ cm; 2.5 cm; 3 cm; 3.5 cm; 4 cm.

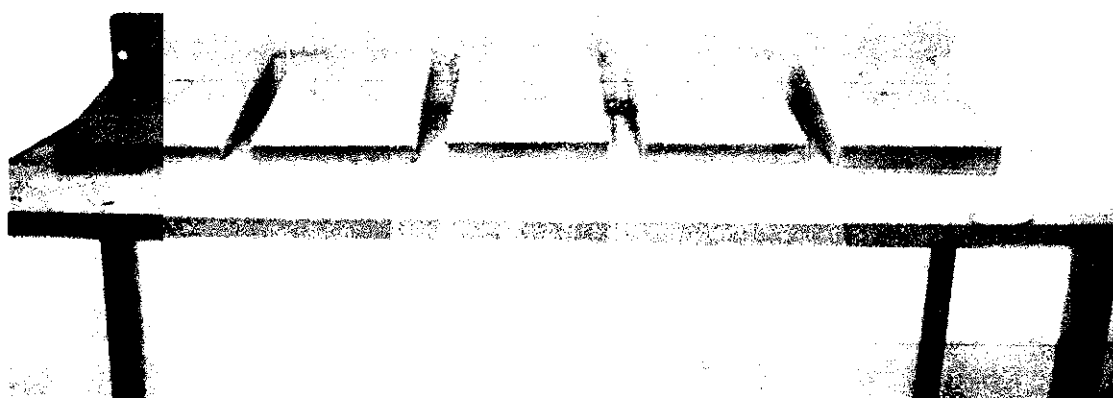


Photo IV.9 : Les ouvertures

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. 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.

V.1 INTRODUCTION

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince 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 L_r/h_1 du ressaut ;

La figure (5.1) montre clairement les différents paramètres qui constituent le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince.

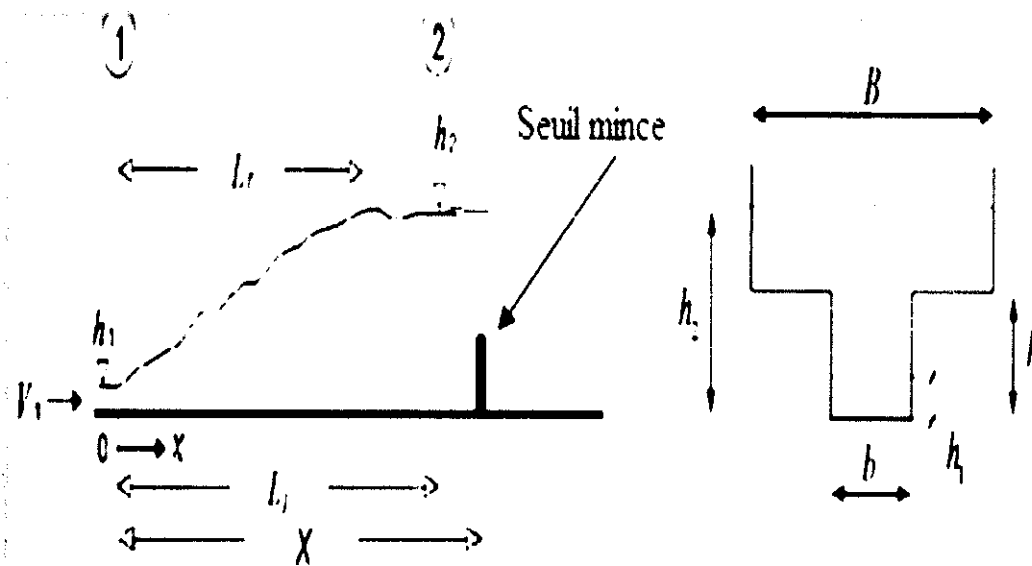


Figure V.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince
En canal rectangulaire de section composée

V.1.2 Description des essais

Un échantillon constitué 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

Le nombre de Froude F_1 est tel que :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{b^2 h_1^3 g}, \quad Q^* = Q / (g D^5)^{0.5}, \quad (5.1)$$

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. Lecture de la hauteur déversant h_q du déversoir rectangulaire.
2. Calcul du débit volume correspondant, par application de la relation du débitmètre rectangulaire (Hachemi . Rachedi L.2006):

$$Q = 0.3794 B \sqrt{2g\beta} (1 + 0.16496 \beta^{2.0716})^{3/2} h_q^{3/2} \quad (5.2)$$

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/s^2).

$\tau = h_1/h$: 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:

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 des points expérimentaux ci-dessous 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.

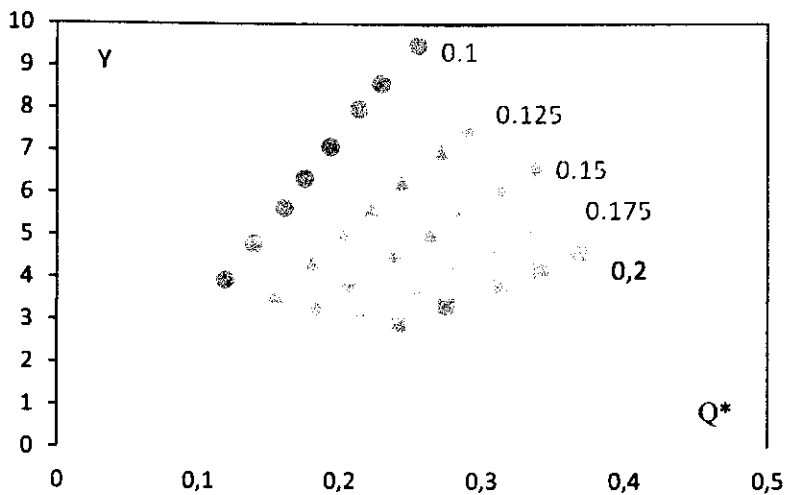


Figure V .2: Variation du rapport des hauteurs du ressaut Y en fonction du débit relatif Q^* . les motifs différents vides noirs représentent les points de mesures expérimentales.

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 (5.2) 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 .

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 : $Y = a_1 Q^* + b_1$

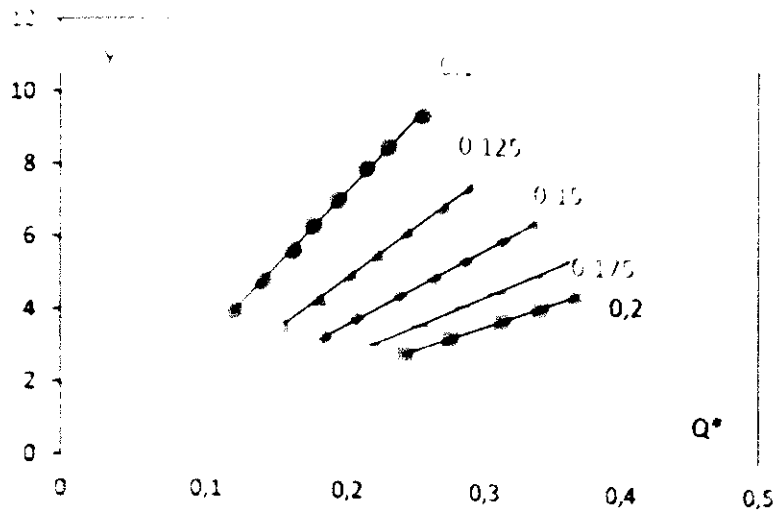


Figure V.3: Variation du rapport des hauteurs du ressaut hydraulique Y en fonction du débit relatif Q^* . les motifs pleins oranges représentent les points de mesures expérimentales. (—) Courbes d'ajustements pour les cinq valeurs de y_1 : 0,1 ; 0,125 ; 0,15 ; 0,175 et 0,2.

Le tableau (5.3) regroupe les valeurs des coefficients de a_1 et b_1 issus de l'ajustement des moindres carrés.

Tableau (V.1) : recapitulation des résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du Q^* pour chaque ouverture h_1 .

$h_1(\text{cm})$	$y = h_1/b$	a_1	b_1	Equation d'ajustement	R^2
2	0,100	41,63	-0,997	$Y = 41,63Q^* - 0,997$	0,998
2,5	0,125	29,25	-0,909	$Y = 29,25Q^* - 0,909$	0,999
3	0,150	21,5	-0,656	$Y = 21,50Q^* - 0,656$	0,999
3,5	0,175	17,05	-0,622	$Y = 17,05Q^* - 0,622$	0,997
4	0,200	13,74	-0,460	$Y = 13,74Q^* - 0,46$	0,999

Le tableau (V.1) montre la diminution progressive des coefficients a_1 et b_1 avec l'augmentation de la hauteur relative amont y_1 . L'ajustement statistique des couples des valeurs (y_1, a_1) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type puissance d'équation :

$a_1 = 119,0e^{-11,7y_1}$ avec $R^2 = 0,988$ celle-ci est illustrée par la figure ci-dessous :

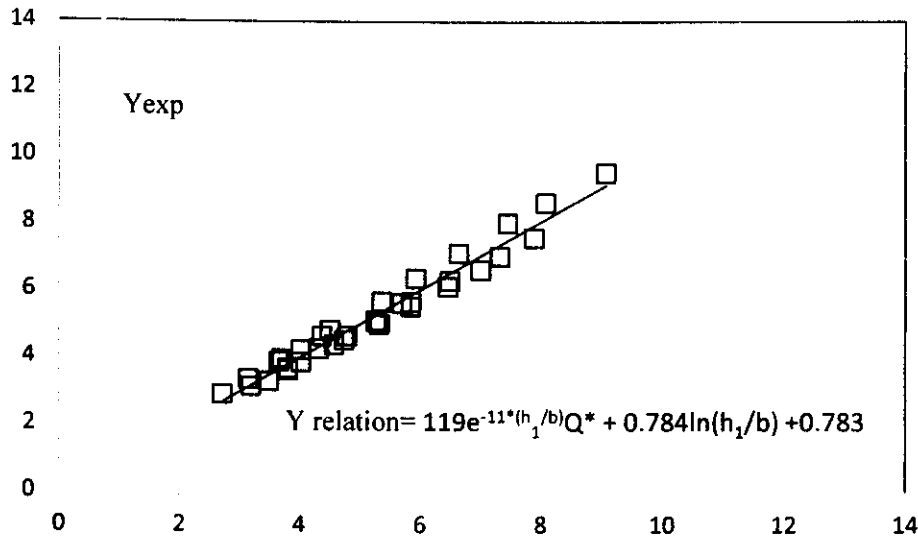


Figure V.6 : Variation de la hauteur relative aval Y en fonction de (y_1, Q^*) . (0) Points

Expérimentaux du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de lit mineur (—) Première bissectrice d'équation

$$Y = 119e^{-11*(h_1/b)}Q^* + 0.784\ln(x) + 0.783 \quad (5.1)$$

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

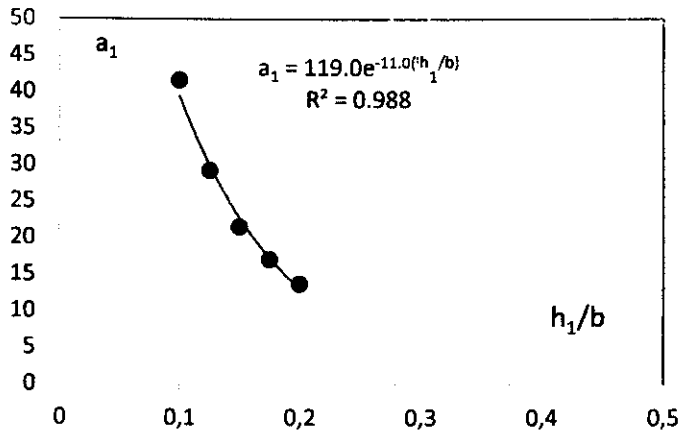


Figure V.4: Variation du coefficient a_1 en fonction de la hauteur relative amont y_1

et l'ajustement des couples des valeurs (y_1, b_1) par la méthode des moindres carrés donne une

relation de type linéaire $b_1 = 0.784 \ln(h_1/b) + 0.783$

avec $R^2 = 0.955$. celle-ci est indiquée par la figure ci-dessous :

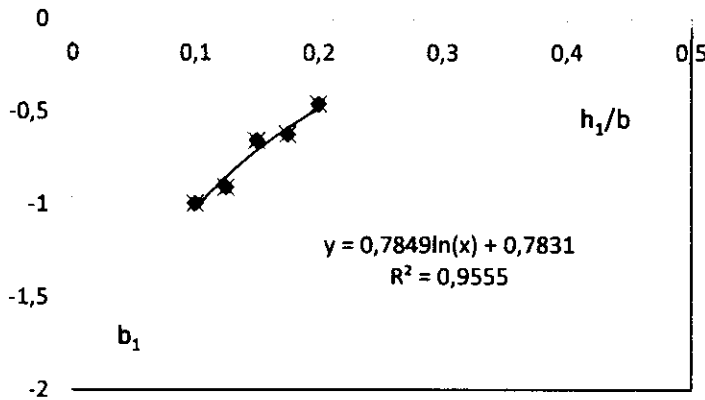


Figure V.5 : Variation du coefficient b_1 en fonction de la hauteur relative aval y_1

En effet, en remplaçant les coefficients a_1 et b_1 par leur expressions dans la relation $Y = a_1 Q^* + b_1$, 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 : $Y = 119e^{-11 \cdot (h_1/b)} Q^* + 0.784 \ln(x) + 0.783$

pour $0.1 \leq y_1 \leq 0.2$. La figure (5.6) montre que la relation $Y = f(Q^*, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ses derniers suivent parfaitement la première bissectrice.

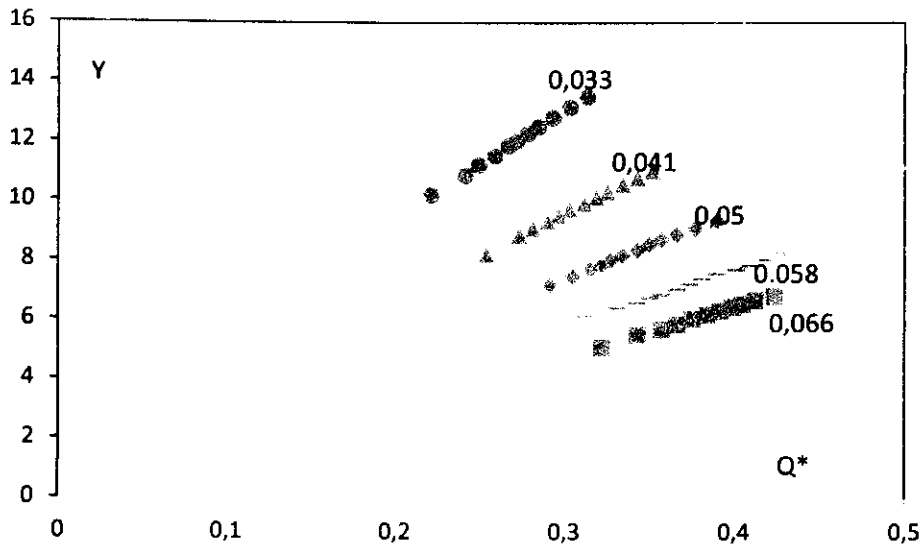


Figure V.7 : Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^* . les motifs différents vides représentent les points de mesures expérimentales pour les cinq valeurs de y_1 : 0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 et 0,066.

La figure (5.8) 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 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 : $Y = a_2 Q^* + b_2$

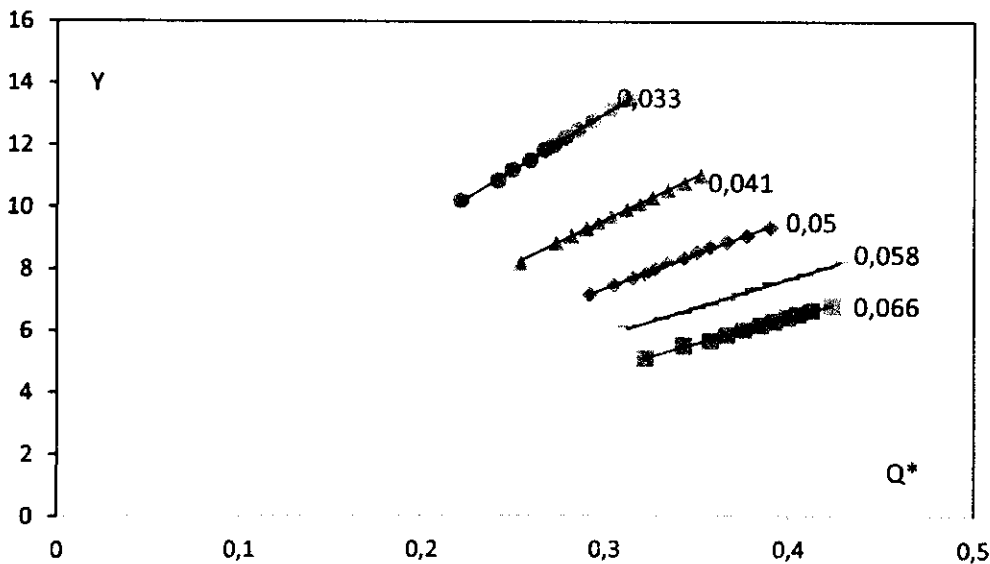


Figure V.8: Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^* . les motifs différents pleins bleus représentent les points de mesures expérimentales pour les cinq valeurs de y_1 : 0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 et 0,066 (—) trait continu représente l'ajustement

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 courbes d'ajustement pour différentes ouvertures y_1

$h_1(\text{cm})$	$y_1 = h_1/B$	a_2	b_2	Equation d'ajustement	R^2
2	0,0333	36.28	2.139	$Y = 36.28x + 2,139$	0,999
2,5	0,0410	28.56	1.013	$Y = 28.56x + 1,013$	0,998
3	0,0500	22.36	0.659	$Y = 22.36x + 0,659$	0,997
3,5	0,0583	18.43	0.307	$Y = 18.43x + 0,307$	0,995
4	0,0660	17.09	-	$Y = 17.09x - 0,407$	0,998

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 exponentiel d'équation : $a_2 = 75.82e^{-23,3(h_1/B)}$ avec $R^2 = 0,970$ celle-ci est illustrée par la figure ci-dessous :

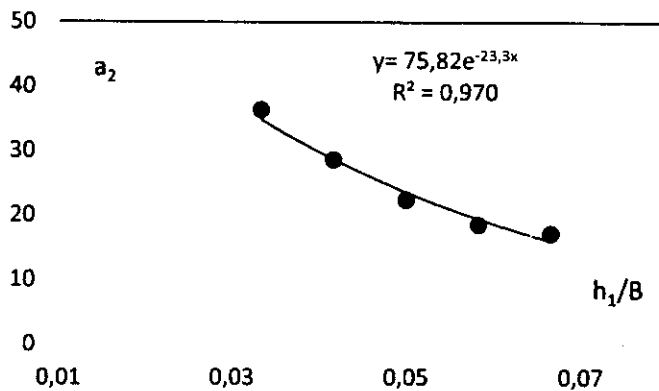


Figure V.9 : Variation du coefficient a_2 en fonction de la hauteur relative aval y_1

et l'ajustement des couples des valeurs (y_1, b_2) par la méthode des moindres carrés donne une relation aussi de type exponentiel $b_2 = 25,34e^{-75,0x}$ avec $R^2 = 0,989$. celle-ci est montrée par la figure ci-dessous :

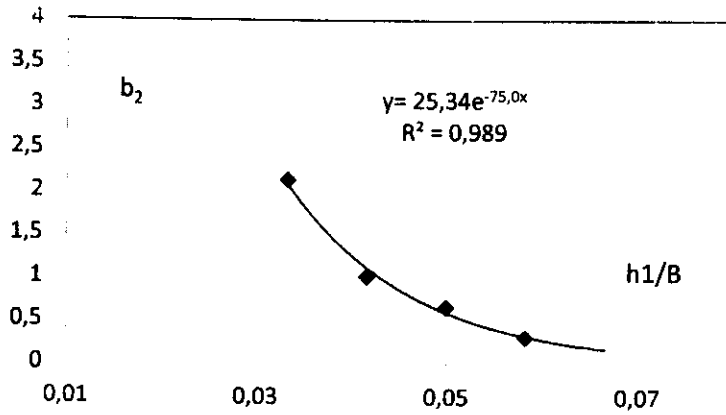


Figure V.10 : Variation du coefficient b_2 en fonction de la hauteur relative amont y_1

En effet, en remplaçant les coefficients a_2 et b_2 par leurs expressions dans la relation $Y = a_2 Q^* + b_2$, l'équation liant le rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ au nombre de débit relatif Q^* et à la hauteur relative amont y_1 devient :

$$Y = 75.82e^{-23,3(h_1/B)} Q^* + 25,34e^{-75,0(h_1/B)} \quad (5.2)$$

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

La figure (5.11) montre clairement que la relation $Y = f(Q^*, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ces derniers tournent en majorités autour de la première bissectrice ce qui fiabilisent la relation globale obtenue.

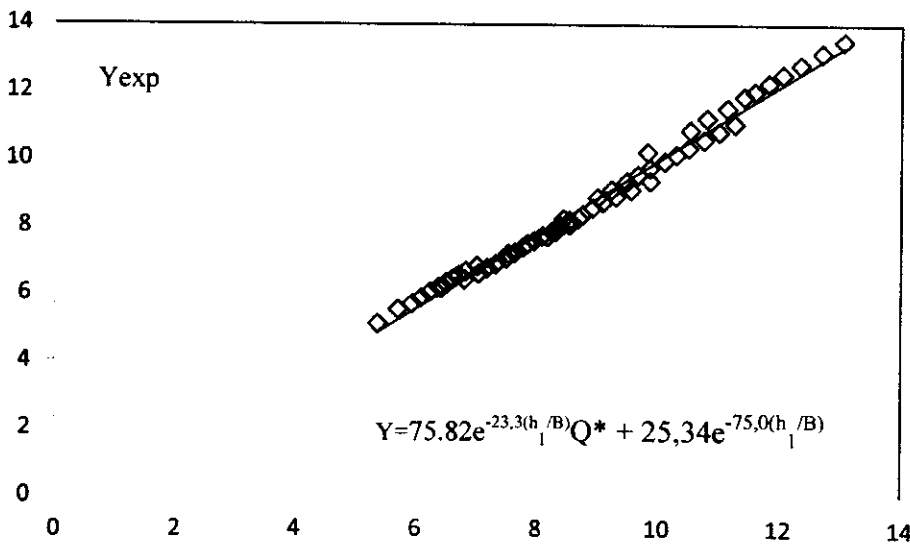


Figure V.11 : Variation du rapport Y_{exp} en fonction de $Y = f(y_1, Q^*)$. (□) Points Expérimentaux du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de lit majeur.

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 (5.12) 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.

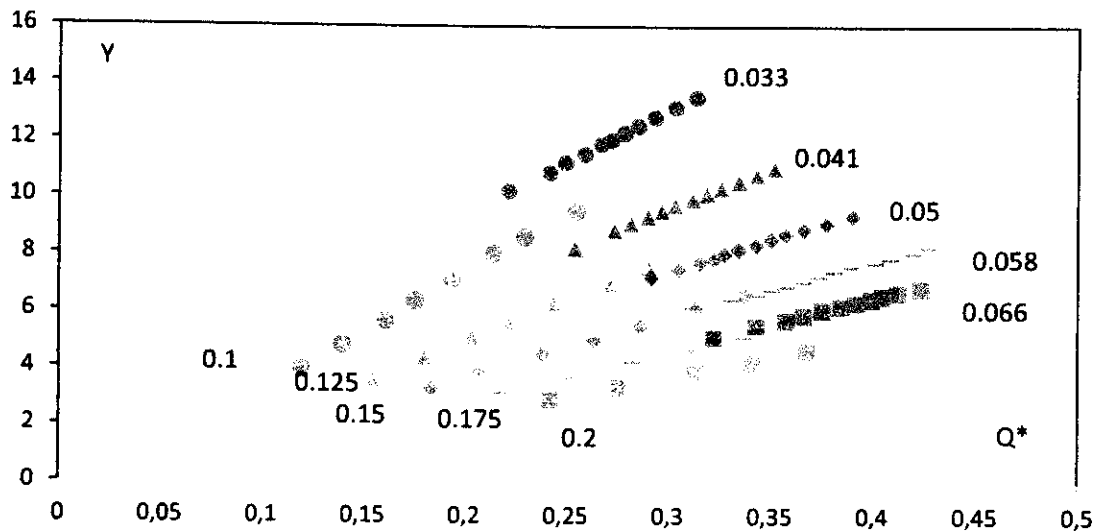


Figure V.12 : Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^* . Les motifs colorés différents pleins représentent les points de mesures expérimentales pour les cinq valeurs de y_1 : 0,1 ; 0,125 ; 0,15 ; 0,175 ; 0,2. 0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 et 0,066. respectivement le lit mineur 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 que pour le même nombre de débit relatif Q^* , Y diminue avec l'augmentation de y_1 pour les deux lits.

La figure (5.13) 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.

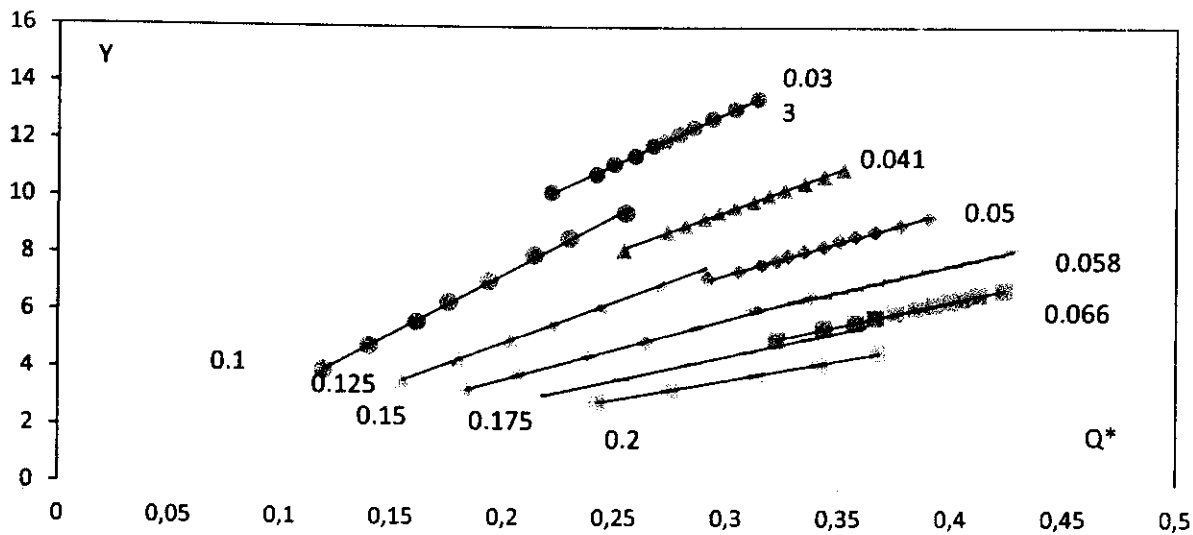


Figure V.13: Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^* . Les motifs colorés oranges et bleus représentent successivement les points de mesures expérimentales dans le lit mineur et le lit majeur pour les cinq valeurs de y_1 : 0,1 ; 0,125 ; 0,15 ; 0,175 ; 0,2. 0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 et 0,066. respectivement le lit mineur et celui du lit majeur. (—) les traits continus représentent l'ajustement dans les deux lits de la section composée.

Les résultats des ajustement obtenus sont mentionnées dans le tableau (5.3).

Le tableau (V.3) regroupe les valeurs des coefficients de a_i et b_i

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 (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	41.63	-0.997	36.28	2.139	$Y = 41,63Q^* - 0,997$	0,998	$Y = 36,28x + 2,139$	0,999
2,5	0.125	0,041	29.25	-0.909	28.56	1.013	$Y = 29,25Q^* - 0,909$	0,999	$Y = 28,56x + 1,013$	0,998
3	0.15	0,05	21.5	-0.656	22.36	0.659	$Y = 21,50Q^* - 0,656$	0,999	$Y = 22,36x + 0,659$	0,997
3,5	0.175	0,0583	17.05	-0.622	18.43	0.307	$Y = 17,05Q^* - 0,622$	0,997	$Y = 18,43x + 0,307$	0,995
4	0.20	0,066	13.74	-0.46	17.09	-	$Y = 13,74Q^* - 0,46$	0,999	$Y = 17,09x - 0,407$	0,998

L'exploitation de tous ces résultats qui sont récapitulés dans le tableau (5.3) sont concrétisés dans la figure (V.14).

Les motifs en couleurs bleus indiquent les mesures expérimentales issues de l'équation globale d'ajustements dans le lit mineur, par contre les motifs pleins rouges représentent les mesures expérimentales issues de l'approche empirique globale obtenue dans le lit majeur.

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.

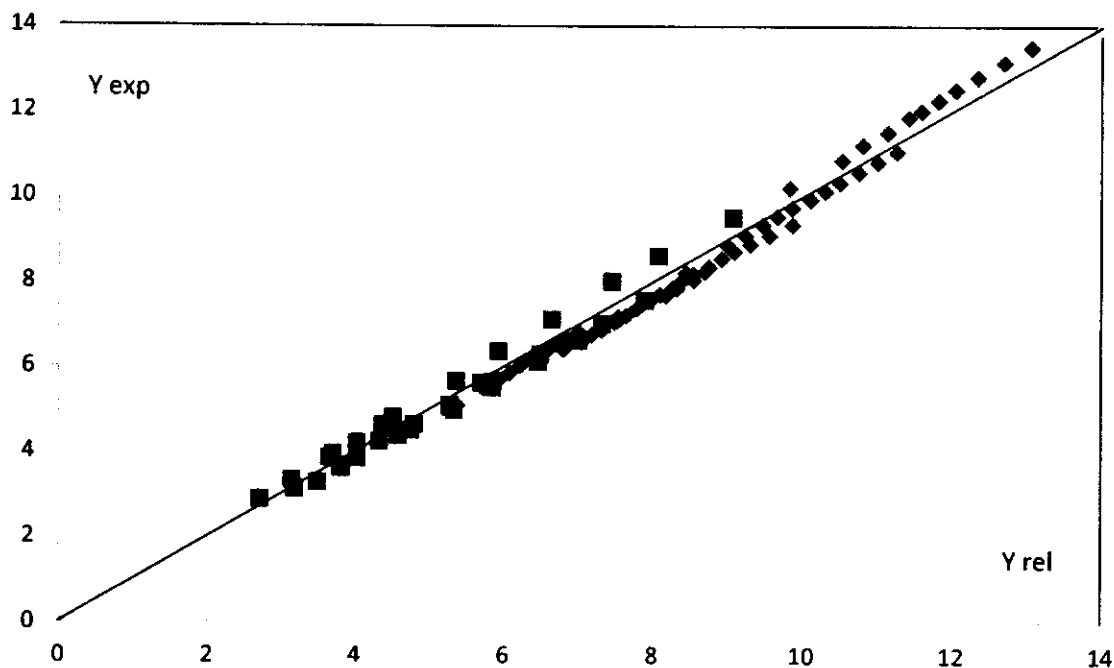


Figure V.14 : Variation du rapport Y en fonction de (y_1, Q^*) . (0) Points Expérimentaux du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée successivement dans le lit mineur et le lit majeur .

$$Y = 119e^{-11 \cdot (h_1/b) Q^*} + 0.784 \ln(h_1/b) + 0.783 \quad (5.1)$$

$$Y = 75.82e^{-23.3(h_1/B) Q^*} + 25.34e^{-75.0(h_1/B) Q^*} \quad (5.2)$$

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 (5.15) 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 .

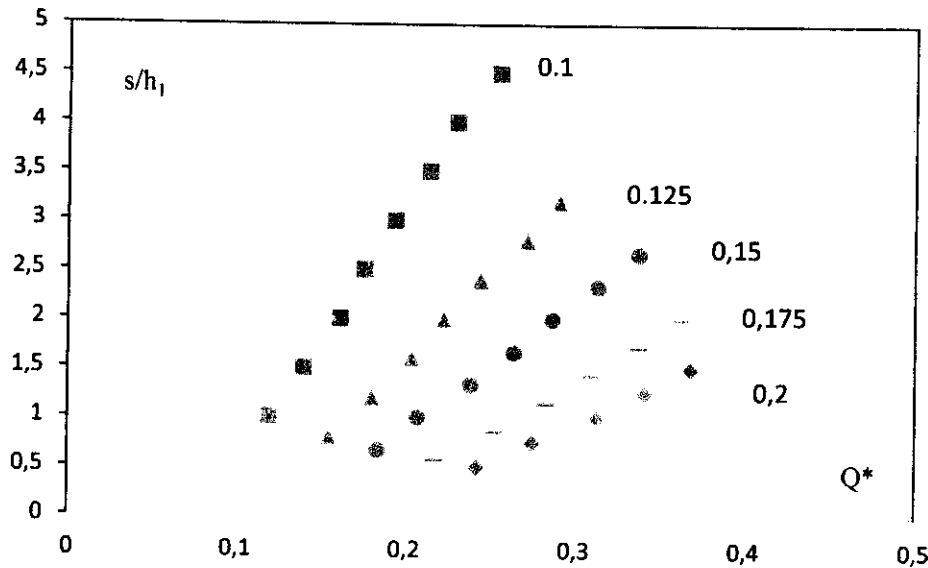


Figure V.15 : Variation de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 . Les motifs colorés représentent les points de mesures expérimentales.

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

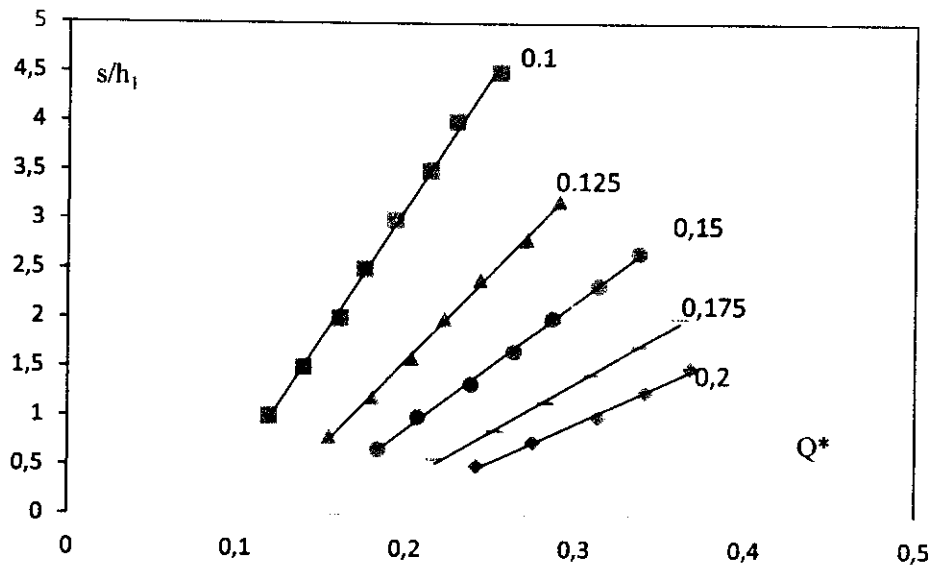


Figure V.16 : Ressaut contrôlé en canal rectangulaire de forme composée. Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction du débit relatif Q^* , pour quatre valeurs différents de y_1 : 0,10 ; 0,125 ; 0,15 ; 0,175 et 0,20. (-) Courbes d'ajustements.

Le tableau (V.4) montre clairement que les coefficients a_3 diminuent progressivement avec

l'augmentation de la hauteur relative amont y_1 .

Tableau(V.4) récapitulation des couples de valeurs (a_3, b_3) de l'ajustement dans le tableau ci-dessous.

$h_1(\text{cm})$	$y_1 = h_1/b$	Coefficient a_3	Coefficient b_3	Equation d'ajustement	R^2
2	0,1	26.6	-2.196	$Y=26,6x-2,196$	0,997
2,5	0,125	17.78	-1.982	$Y=17,78x-1,982$	0,998
3	0,150	12.9	-1.708	$Y=12,9x-1,708$	0,998
3,5	0,175	9.944	-1.634	$Y=9,944x-1,634$	0,996
4.0	0,20	7.825	-1.41	$Y=7,825x-1,41$	0,994

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 et logarithmique comme le montre les figures 5.17 et 5.18:

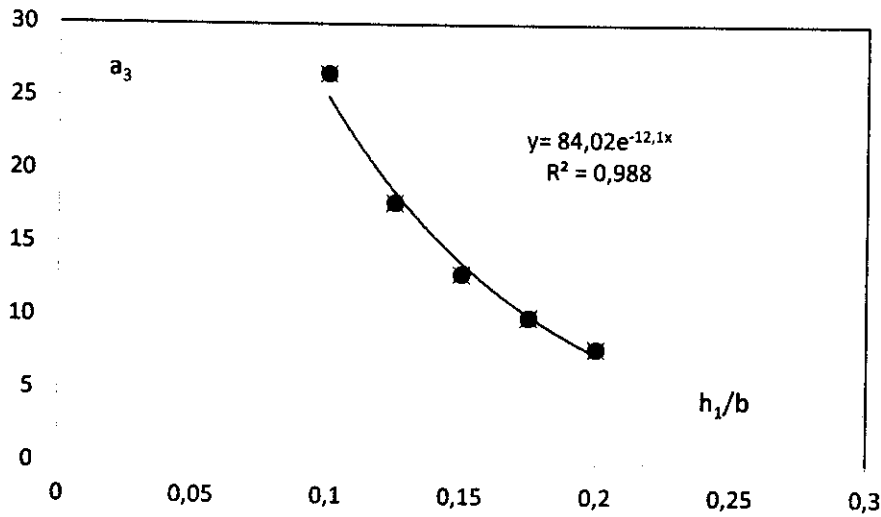


Figure V.17 : Variation du coefficient a_3 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

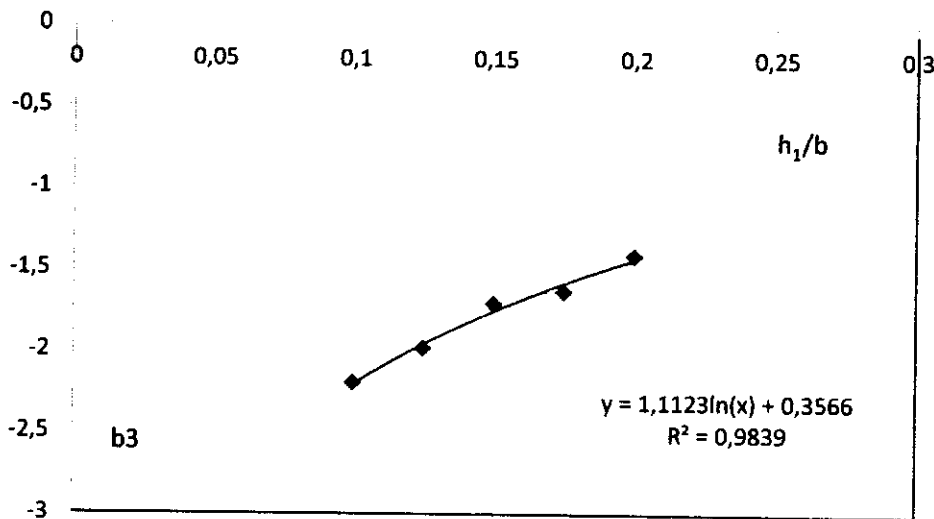


Figure V.18: Variation du coefficient b_3 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

En effet, en remplaçant les coefficients a_3 et b_3 par leurs expressions dans la relation $S = a_3 Q^* + b_3$, le débit relatif Q^* , la hauteur relative S du seuil et la hauteur relative amont y_1 devient : $S = 84,02e^{-12,1(h_1/b)} Q^* + 1,112\ln(x) + 0,356$ avec $0,1 \leq y_1 \leq 0,20$.

La figure (5.19) montre que la relation obtenue $S = f(Q^*, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentaux. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice dans le lit mineur.

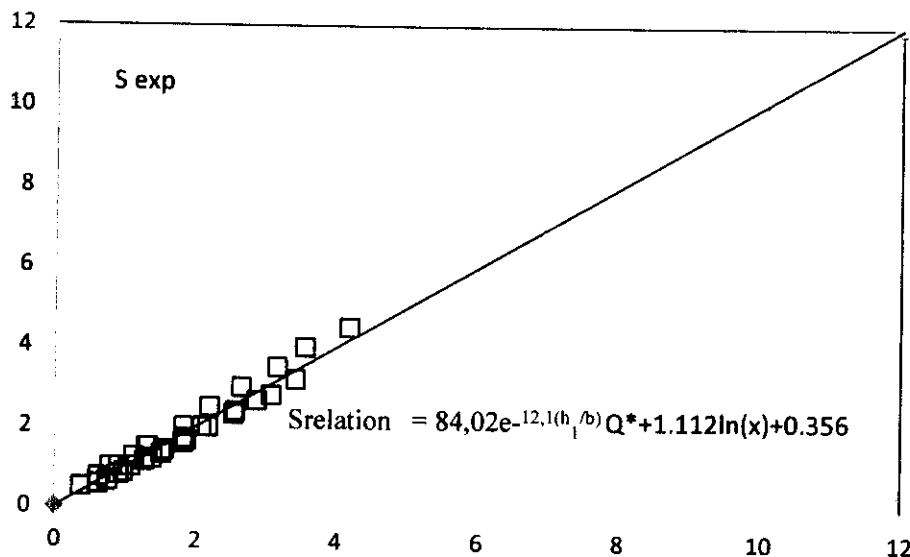


figure V.19 : Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction de $f(Q^*, y_1)$. (□) Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée pour le lit mineur. (—) Première bissectrice d'équation : $S_{\text{relation}} = 84,02e^{-12,1(h_1/b)} Q^* + 1.112 \ln(x) + 0.356$ (5.3)

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

La figure (5.20) 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 en canal rectangulaire de forme composée dans le lit majeur pour cinq valeurs distincts de y_1 .

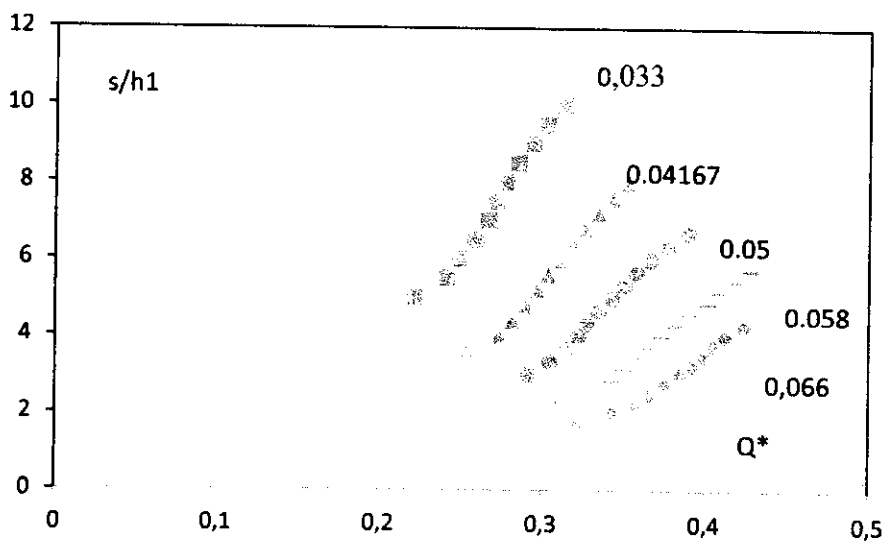


Figure V.20 : Ressaut contrôlé en canal rectangulaire de forme composée en lit majeur. Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction du débit relatif Q^* , pour quatre valeurs différentes de y_1 : 0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 et 0,066. (-) Courbes d'ajustements.

la figure ci-dessus montre que les mesures expérimentales obtenues du ressaut contrôlé par seuil à paroi mince dans le lit majeur sont différents, 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 remarque 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 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 5.21

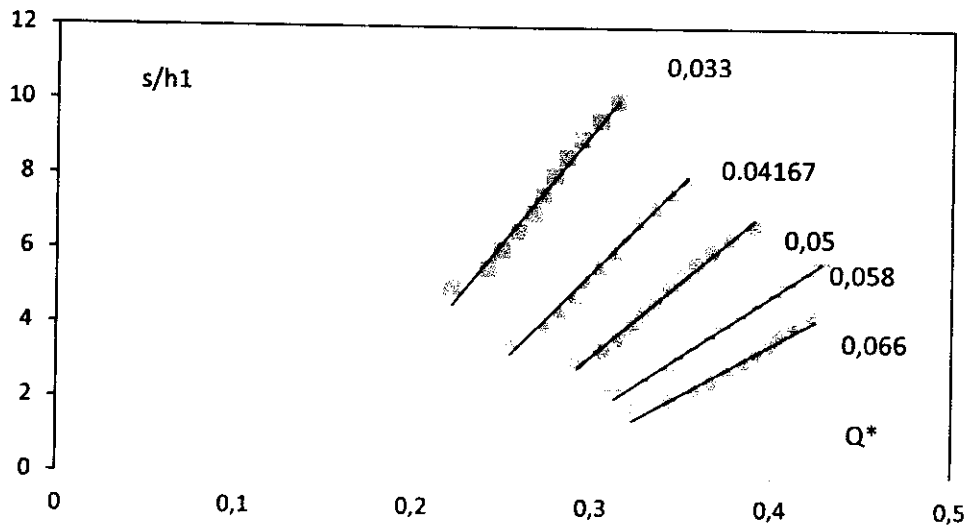


Figure V.21 : Variation de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ en fonction du débit relatif Q^* pour cinq valeurs distinctes de y_1 . Les motifs colorés représentent les points de mesures expérimentales.

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	59.62	-8.674	$S = 59.62 (h_1/B) - 8.674$	0,981
2,5	0,041	48.63	-9.137	$S = 48.63 (h_1/B) - 9.137$	0,988
3	0,050	40.37	-8.896	$S = 40.37(h_1/B) - 8.896$	0,991
3,5	0,058	31.61	-7.823	$S = 31.61(h_1/B) - 7.823$	0,991
4	0,066	26.51	-7.077	$S = 26.51(h_1/B) - 7.077$	0,971

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 exponentiel et polynomiale comme le montre les figures V.22 et V.23:

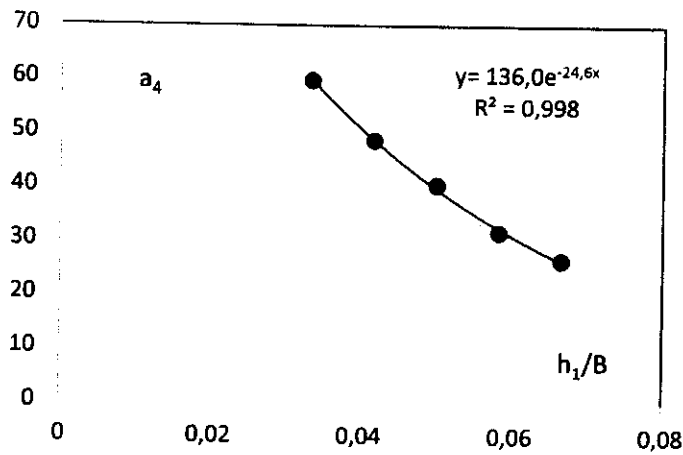


Figure V.22 : Variation du coefficient a_4 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

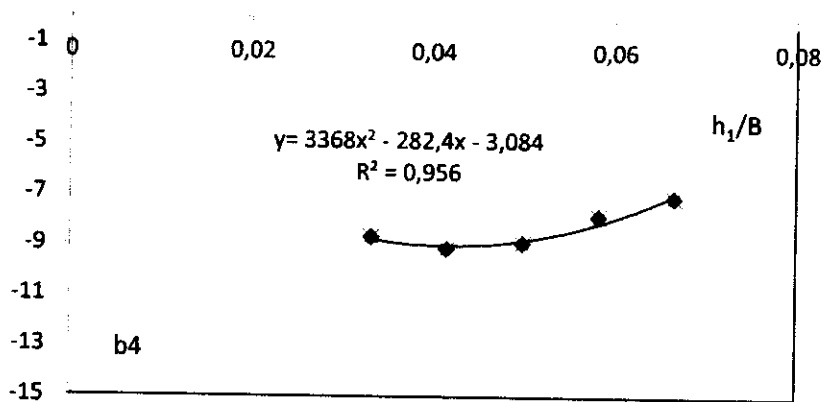


Figure V.23 : Variation du coefficient b_4 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

L'ajustement des couples de valeurs b_4 et y_1 par la méthode des moindres carrés donne l'expression suivante : $b_4 = 3368(h_1/B)^2 - 282,4(h_1/B) - 3,084$

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 :

$$S_{\text{relation}} = 136e^{-24,6(h_1/B)} Q^* + 3368(h_1/B)^2 - 282,4(h_1/B) - 3,084, \quad \text{avec } 0,033 \leq y_1 \leq 0,066.$$

La figure (5.24) 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.

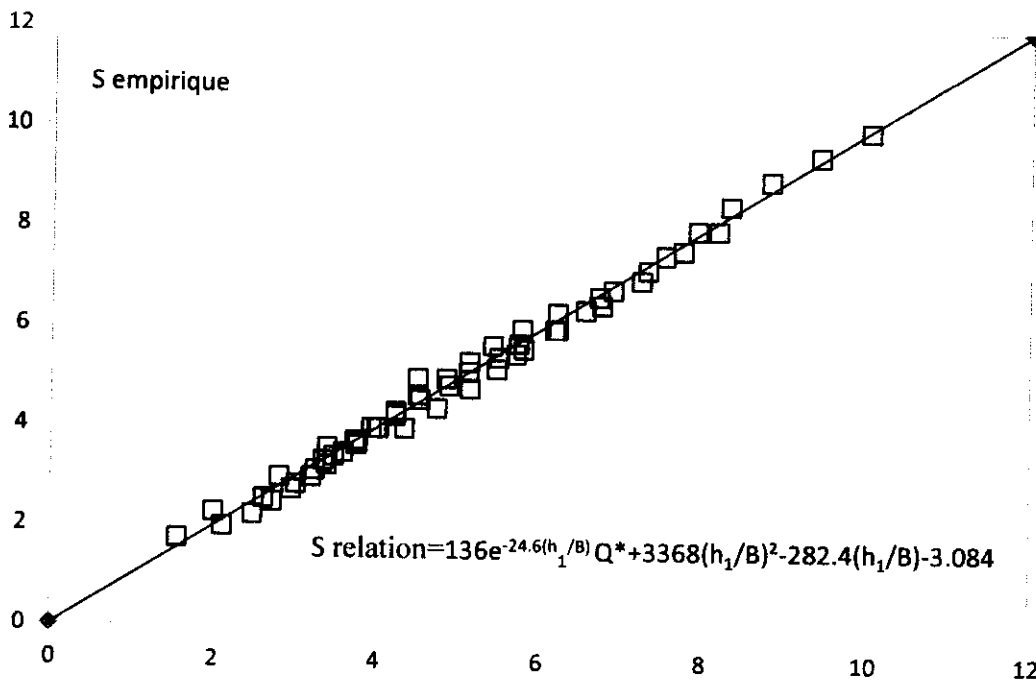


Figure V.24 : Variation de la hauteur relative S du seuil en fonction de $f(Q^*, y_1)$. Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de section composée du lit majeur. Première bissectrice d'équation:

$$S \text{ relation} = 136e^{-24.6(h_1/B)} Q^* + 3368(h_1/B)^2 - 282.4(h_1/B) - 3.084 \quad (5.4)$$

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

La représentation graphique des points expérimentaux dans la figure (5.25) montre la variation du rapport du seuil relatif $S = s/h_1$ du ressaut hydraulique en fonction du débit relatif Q^* , pour les cinq ouvertures dans la section composée du lit mineur et celui majeur successivement y_1 : 0.1 ; 0.125 ; 0.150 ; 0.175 ; 0.2 et 0.033 ; 0.041 ; 0.050 ; 0.058 ; 0.066.

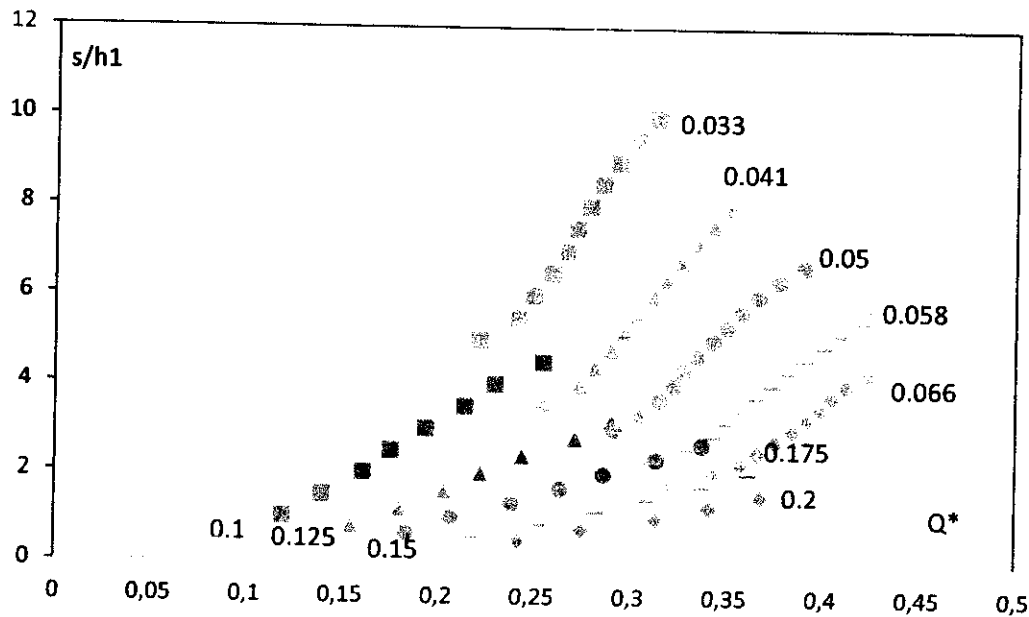


Figure V.25: Variation du rapport seuil relatif $S = s/h_1$ en fonction du débit relatif Q^* . les motifs colorés différents pleins représentent les points de mesures expérimentales pour les cinq valeurs de y_1 : 0,1 ; 0,125 ; 0,15 ; 0,175 ; 0,2 et 0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066. respectivement 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 (5.26) 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 : $Y = \Lambda Q^* + B$, pour le lit mineur et le lit majeur.

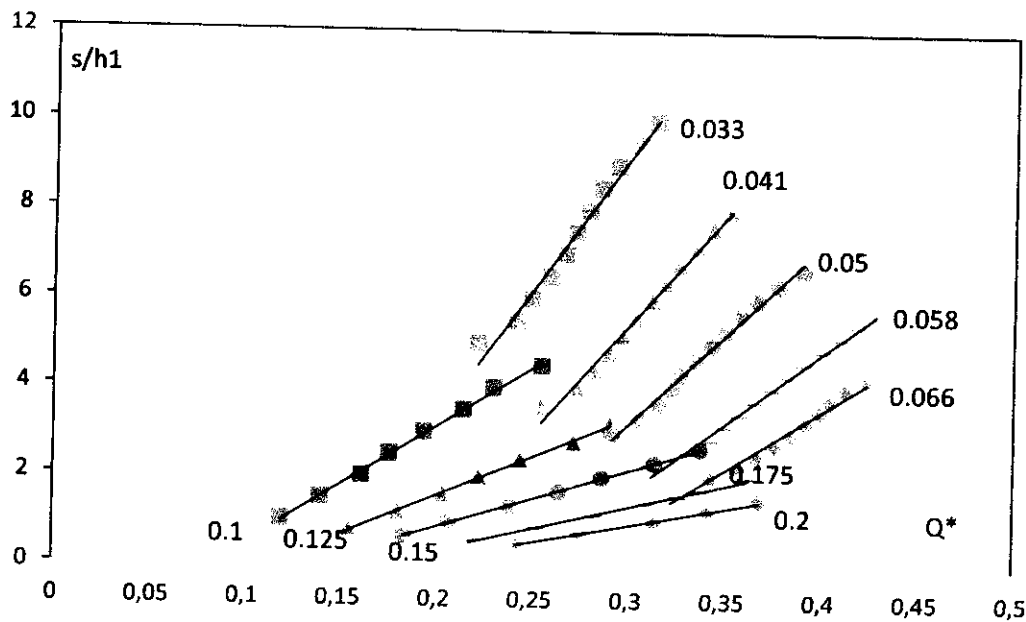


Figure 5.26: Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du débit relatif Q^* . Les motifs colorés oranges et bleus représentent successivement les points de mesures expérimentales dans le lit mineur et le lit majeur pour les cinq valeurs de y_1 : 0,1 ; 0,125 ; 0,15 ; 0,175 ; 0,2 et 0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066. respectivement le lit mineur et celui du lit majeur. (—) les traits continus représentent l'ajustement dans les deux lits de la section composée.

Les résultats des ajustements obtenus sont mentionnés dans le tableau (5.6).

Le tableau (V.6) regroupe les valeurs des coefficients de a_i et b_i .

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.

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	26.6	-2.196	59.62	-8.674	$Y=26,6x-2,196$	0,997	$Y= 59.62x-8.674$	0,981
2,5	0,125	0,041	17.78	-1.982	48.63	-9.137	$Y=17,78x-1,982$	0,998	$Y= 48.63x-9.137$	0,988
3	0,150	0,050	12.9	-1.708	40.37	-8.896	$Y=12,9x-1,708$	0,998	$Y= 40.37x-8.896$	0,991
3,5	0,175	0,058	9.944	-1.634	31.61	-7.823	$Y=9,944x-1,634$	0,996	$Y= 31.61x-7.823$	0,991
4	0,20	0,066	7.825	-1.41	26.51	-7.077	$Y=7,825x-1,41$	0,994	$Y= 26.51x-7.077$	0,971

Les motifs en couleurs bleus indiquent les mesures expérimentales issues de l'équation globale d'ajustements dans le lit mineur, par contre les motifs pleins rouges représentent les mesures expérimentales issues de l'approche empirique globale obtenue dans le lit majeur.

La figure V.27 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 annexes des barrages.

En conclusion on constate clairement que l'effet réducteur des profondeurs relatives Y et du seuil relatif S du ressaut hydraulique évoluant dans le canal de section composée est positif dans le lit mineur que celui du lit majeur.

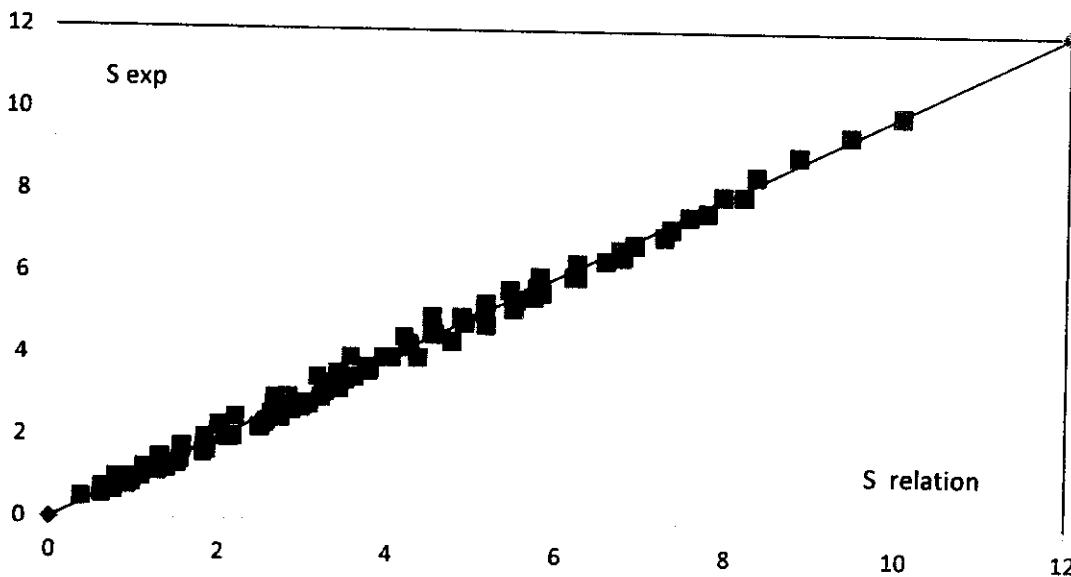


Figure V.27 : Variation du seuil relatif expérimentale $S=s/h_1$ en fonction des relations globales obtenues $S=(y_1, Q^*)$. (, □) Points des mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal rectangulaire de la section composée. $S \text{ relation} = 84,02e^{-12,1(h_1/b)} Q^{*+1.112} \ln(x)+0.356$ (5.3)

et l'équation globale dans le lit majeur $S \text{ relation} = 136e^{-24,6(h_1/B)} Q^{*+3368(h_1/B)^2-282.4(h_1/B)-3.084}$ (5.4)

V.4 CONCLUSION

La deuxième partie de notre étude a concerné l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince 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 adimensionnelles à caractère général.

Ce dernier chapitre a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal de section droite rectangulaire en lit composé contrôlé par seuil à paroi mince.

Dans un premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie par les essais.

En second temps on a exploité toutes les mesures expérimentales obtenues au niveau du Laboratoire LARHYSS de BISKRA pour cinq ouvertures h_1 : 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 et 4cm. Une large gamme du débit relatif Q^* a été ainsi obtenue. **En finalité 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 $\beta = b/B = 1$, $Y = 1.19e^{-1.1 \cdot (h_1/b)} Q^* + 0.784 \ln(h_1/b) + 0.783$
avec $0.1 \leq y_1 \leq 0.2$.
- Pour $\beta = b/B < 1$, $Y = 75.82e^{-23.3(h_1/B)} Q^* + 25.34e^{-75.0(h_1/B)}$ avec
 $0.033 \leq y_1 \leq 0.066$.

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 $\beta = b/B = 1$, $S \text{ relation} = 84.02e^{-1.2 \cdot (h_1/b)} Q^* + 1.112 \ln(x) - 0.356$
avec $0.1 \leq y_1 \leq 0.2$.
- Pour $\beta = b/B < 1$, $S \text{ relation} = 136e^{-24.6(h_1/B)} Q^* + 3368 (h_1/B)^2 - 282.4 (h_1/B) - 3.084$,
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 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 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 mince dans un canal rectangulaire 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 telle que $= C_0.(F_1 - 1)^{5/4}$. Le paramètre C_0 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.

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

CONCLUSION GENERALE

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 mince.

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 Rachedi. 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 mince 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 Laboratoire LARHYSS de BISKRA pour cinq ouvertures h_1 : 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 et 4cm. Une large gamme du débit relatif Q^* a été ainsi obtenue. **En finalité 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 $\beta = b/B = 1$ $Y = 119e^{-11*(h_1/b)}Q^* + 0.784\ln(h_1/b) + 0.783$
avec $0,1 \leq y_1 \leq 0,2$
- Pour $\beta = b/B < 1$, $Y = 75.82e^{-23,3(h_1/B)}Q^* + 25,34e^{-75,0(h_1/B)}$
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 $\beta=b/B=1$, $S_{relation} = 84,02e^{-12,1(h_1/B)} Q^* + 1,112 \ln(x) + 0,356$

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

➤ Pour $\beta=b/B<1$, $S_{relation} = 136e^{-24,6(h_1/B)} Q^* + 3368 (h_1/B)^2 - 282,4 (h_1/B) - 3,084$

, 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.

PRINCIPALES NOTATIONS

1. Achour, B., Debabeche, 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., Debabeche, M., Ressaut contrôlé par seuil dans un canal Triangulaire, Journal of Hydraulic Research, Vol. 41(3), pp. 319-325, 2003.
3. Achour, B., Debabeche, 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., Debabeche, 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 ; Korichi med Bachir ., contribution a l'étude de quelques caractéristiques du ressaut hydrauliques en canal rectangular 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.
10. Debabeche, M., Achour, B., Ressaut forcé de type B-min dans un canal triangulaire, 3^{ème} Séminaire National sur l'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.

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, 1er Séminaire Maghrébin sur l'eau, Université de Tizi ousou, 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 d'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.

PRINCIPALES NOTATIONS

28. Ghomri, A., Debabeche, M., Riguët, 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'Oued Souf, 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 Ablufss im 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.Juin 2012
39. Mc Corquodale , J.A., "chapter 8: Hydraulic jumps and internal flow " Encycloedia of fluid mechanics , N.P. Chermisinoff, 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. Riguët, 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 janvier 2011.
43. Ziani sonia ; dissipation d'énergie par ressaut hydraulique dans une conduite circulaire avec banquettes (09.06.2015)

