

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie civil et Hydraulique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الهندسة المدنية والري
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister en : Hydraulique

Option : Hydraulique Urbaine et Ouvrages Hydrotechniques

**EFFET DU SEUIL SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE EN
CANAL TRAPEZOIDAL**

Présenté par :
ZAID Zaid

Soutenu publiquement le 23 / 04 / 2015

Devant le jury composé de :

ACHOUR Bachir
DEBABECHE Mahmoud
OUAMANE Ahmed
BOUZIANE M. Tewfik

Professeur
Professeur
Professeur
Professeur

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur

Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra

REMERCIEMENT

Pour ce travail, j'ai bénéficié des orientations, encouragements et précieux conseils de mon encadreur, Professeur DEBABECHE Mahmoud, Directeur du Laboratoire de Génie civil et Hydraulique développement durable et environnement «LARGHYDE», que je remercie vivement et auquel j'exprime ma profonde reconnaissance pour l'aide scientifique et morale qu'il n'a cessé de me donner.

Mes remerciements vont également au professeur ACHOUR Bachir pour avoir accepté de m'honorer par sa présence en qualité de président de jury.

Je remercie également, le Professeur OUAMANE Ahmed et le Professeur BOUZIANE Tewfik en leur qualité de membres de jury, pour avoir lu et accepté d'examiner mon mémoire de magistère.

Enfin, je tiens également à remercier Mr BENMALEK Ahmed pour toute l'aide qu'il m'a prodigué au cours de l'élaboration de cette étude, sans oublier Mr SIAD Rafik et toutes les personnes qui m'ont permis de réaliser cette recherche et m'ont fait bénéficier de leur aide, conseils et encouragements.

Résumé

Cette étude se propose d'examiner, par la voie de l'expérimentation au laboratoire, l'influence d'un seuil sur les caractéristiques du ressaut hydraulique en canal de section droite symétrique trapézoïdal.

Deux grandes parties se sont avérées nécessaires : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine ; une seconde partie à caractère expérimental a permis d'obtenir avec de bonnes corrélations des relations empiriques, montrant l'effet du seuil sur les caractéristiques de ce type de ressaut. Les équations obtenues sont représentées en termes adimensionnels, afin de permettre leur utilisation dans la pratique.

Mots clés : Ressaut hydraulique, Canal trapézoïdal, Bassin de dissipation, seuil mince, compacité du bassin.

Abstract

This study proposes to examine, by the way of the experimentation in the laboratory, the influence of a sill on the characteristics of the hydraulic jump a symmetrical trapezoidal channel.

This study consists of two main parts: the first one is bibliographical through which we reviewed the current works achieved in this field ; the second part is experimental, which allowed us to find, with a good correlation, empirical relations, showing the effect of the step on the characteristics of this type of jump. The obtained equations are represented in non-dimensional terms to allow their use in the practice.

Keywords: Hydraulic jump, trapezoidal Channel, Stilling basin, sill, compactness of the basin.

ملخص

هذه الدراسة تقترح فحص بالطريقة التجريبية في المختبر لتأثير العتبة على خصائص القفزة المائية داخل قناة مفتوحة شبه منحرفة الشكل.

جزئت هذه الدراسة إلى قسمين : يختص القسم الأول بالأبحاث المتعلقة بالأعمال المنجزة في هذا المجال أما القسم الثاني ذو طابع تجريبي حيث سمح لنا بإيجاد علاقات تجريبية جيدة تظهر اثر العتبة على خصائص القفزة المائية. المعادلات التي تم الحصول عليها هي بدون أبعاد و ذلك لاستعمالها في الواقع.

الكلمات المفتاحية : القفزة المائية، قناة شبه منحرفة الشكل، حوض التبريد، عتبة رقيقة، الاكتناز للحوض.

SOMMAIRE

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

Première Partie

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE	1
---	---

Chapitre I

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

I.1. Introduction.....	2
I.2. Définition.....	3
I.3. Ressaut hydraulique classique.....	3
I.3.1. Classification du ressaut classique.....	4
I.3.2. Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut.....	6
I.3.3. Caractéristique géométriques du ressaut.....	8
I.3.3.1. Hauteur du ressaut.....	8
I.3.3.2. Longueur du rouleau.....	9
I.3.3.3. Longueur du ressaut.....	10
I.3.3.4. Rendement du ressaut.....	11
I.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire.....	13
I.4.1. Approche de Forster et Skrinde (1950).....	13
I.4.1.1. Seuil continue à paroi mince.....	13
I.4.1.2. Seuil continue à paroi épaisse.....	15
I.4.1.3. La marche positive.....	16
I.5. Ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire.....	17
I.5.1. Approche de Rand (1957).....	17
I.5.2. Approche de Bretz (1988).....	19
I.5.2.1. Généralités.....	19
I.5.2.2. Procédures expérimentales.....	21
I.5.2.3. Hauteur conjuguées du ressaut.....	21
I.5.2.4. Longueur relative du bassin.....	23
I.6. Conclusion.....	25

Chapitre II

ETUDE DE LA COMPACITE DU RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

II.1. Approche de Debabeche (2003).....	26
II.2. Introduction.....	26
II.3. Position du problème.....	26
II.4. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma \leq 0,9$	27
II.5. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma > 0,9$	27
II.6. Hauteur relative du seuil.....	29
II.7. Relation entre le rapport γ de compacité et la position relative x/h_2 du seuil.....	30
II.8. Profil de surface du ressaut.....	31
II.9. Conclusion.....	32

Chapitre III

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOIDAL

III.1. Introduction.....	33
III.2. Caractéristique du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal.....	34
III.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	34
III.2.1.1. Cas particulier du canal rectangulaire.....	35
III.2.1.2. Cas particulier du canal triangulaire.....	36
III.2.2. Longueur du ressaut.....	36
III.2.3. Perte de charge relative du ressaut hydraulique.....	37
III.2.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire.....	38
III.2.3.2. Cas particulier du canal triangulaire.....	38
III.3. Conclusion.....	39
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....	40

Deuxième Partie

ETUDE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE.....	42
--	----

Chapitre I

DESCRIPTION DU MODELE

I.1. Introduction.....	43
I.2. Description du canal.....	43
I.3. Limnimètre.....	47
I.4. Les seuils minces.....	48
I.5. Conclusion.....	50

Chapitre II

ETUDE EXPERIMENTALE

II.1. Introduction.....	51
II.2. Effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdale.....	51
II.2.1. Position du problème.....	51
II.2.2. Description des essais	52
II.2.3. Résultats expérimentaux.....	56
II.2.3.1. Variation de la longueur relative L_r^*/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F_1	56
II.2.3.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma \leq 0,9$	57
II.2.3.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma > 0,9$	57
II.2.3.4. Hauteur relative du seuil.....	63
II.2.3.5. Relation entre le rapport γ de compacité et la position relative x/h_2 du seuil.....	68
II.2.3.6. Profil de surface du ressaut.....	70
II.3. Conclusion.....	77
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE.....	78
CONCLUSION GENERALE.....	79
LISTE DES FIGURES.....	82
LISTE DES TABLEAUX.....	86

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine des constructions hydrauliques, les ouvrages de dissipation d'énergie occupent une place prépondérante. Ces structures doivent permettre une restitution de l'eau à la rivière sans engendrer d'érosions. Pour permettre cette dissipation d'énergie, une des solutions envisageables consiste en la mise en place d'un bassin amortisseur. Le fonctionnement de ces bassins se base sur le phénomène du ressaut hydraulique permettant de dissiper une importante quantité de l'énergie cinétique de l'eau.

Ces dernières années le ressaut hydraulique a fait l'objet de plusieurs recherches fondamentales et appliquées. La bibliographie montre que 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, la rugosité du fond, ...etc) peut conduire à différentes configurations du ressaut.

L'étude des paramètres hydrauliques du ressaut, tels que, le rapport des profondeurs conjuguées, la perte d'énergie ainsi que la longueur du ressaut, a attiré l'attention de divers chercheurs. En effet, plusieurs auteurs ont abordé la question du ressaut hydraulique dans différents profils géométriques. Nous pouvons citer, entre autres, Hager et Sinniger (1990), Hager et Bretz (1987), Rajaratnam (1964, 1965, 1967 et 2002), Rajaratnam et Murahari (1971), Rajaratnam N, Subramania K (1967) et Rand (1957 et 1965) qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal. En outre, Hager et Wanoschek (1987), Achour et Debabeche (2003) et Debabeche et Achour (2007) ont étudié le ressaut hydraulique triangulaire horizontal.

Pratiquement, on a besoin de déterminer les dimensions du bassin dissipateur pour donner une bonne configuration à ce dernier qui doit répondre aux exigences de l'écoulement. Ces dimensions sont liées physiquement aux caractéristiques du ressaut et à la forme géométrique de la section du canal dans lequel il évolue.

Toutes les études sont effectuées dans le domaine du ressaut hydraulique, pour aboutir à une meilleure configuration du bassin d'amortissement, tel que : la forme géométrique et le type d'obstacles, qui servent dans la plus part des cas à dissiper une grande partie de l'énergie cinétique dans le bassin. Donc, le choix de tel ou tel type se fait à la base des études expérimentales effectuées au laboratoire.

Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier, d'un point de vue expérimental, le ressaut hydraulique, dans un canal trapézoïdal symétrique. Des relations fonctionnelles, en terme

adimensionnel, liant les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'influence d'un seuil mince sur les caractéristiques du ressaut hydraulique en canal de section droite trapézoïdal symétrique, seront proposées.

Notre présent mémoire comporte deux grandes parties. La première partie est divisée en trois chapitres. Le premier chapitre consiste à passer en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique ; si ce dernier est en canal rectangulaire, nous étudierons la classification effectuée par Bradley et Peterka (1957). Nous citerons aussi les travaux de Hager et Sinniger (1986), Hager et al (1990) et ceux de Forster et Skrinde (1950).

Le deuxième chapitre traite l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire (compacité du ressaut), nous examinerons les travaux les plus récents de Debabeche (2003) qui seront l'objet de base de notre étude bibliographique, sur le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal rectangulaire.

A travers le troisième chapitre de notre étude bibliographique, nous exposerons les travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal, à savoir, ceux de Silvester (1964), Wanoschek et Hager (1989).

La deuxième partie de notre étude sera, cependant, entièrement consacrée à notre propre contribution dans l'étude du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, en examinant l'influence du paramètre seuil sur les autres caractéristiques. L'étude sera abordée d'une manière expérimentale.

Première Partie :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction à la première partie

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

La présente partie se divise en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à 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 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 l'influence du seuil sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire (compacité du ressaut), nous examinerons les travaux les plus récents de Debabeche (2003) qui seront l'objet de base de notre étude bibliographique, sur le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal rectangulaire.

En fin, le dernier chapitre sera consacré aux travaux effectués par Silvester (1964), Wanoschek et Hager (1989), sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal. Signalons ici que ce type de ressaut n'a connu que très peu d'étude.

Premier Chapitre :
RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL
RECTANGULAIRE

Chapitre I

Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

I.1. Introduction

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

On s'accorde à dire que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation liant le rapport Y^* des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude IF_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. Définition

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. (Figure 1.1).

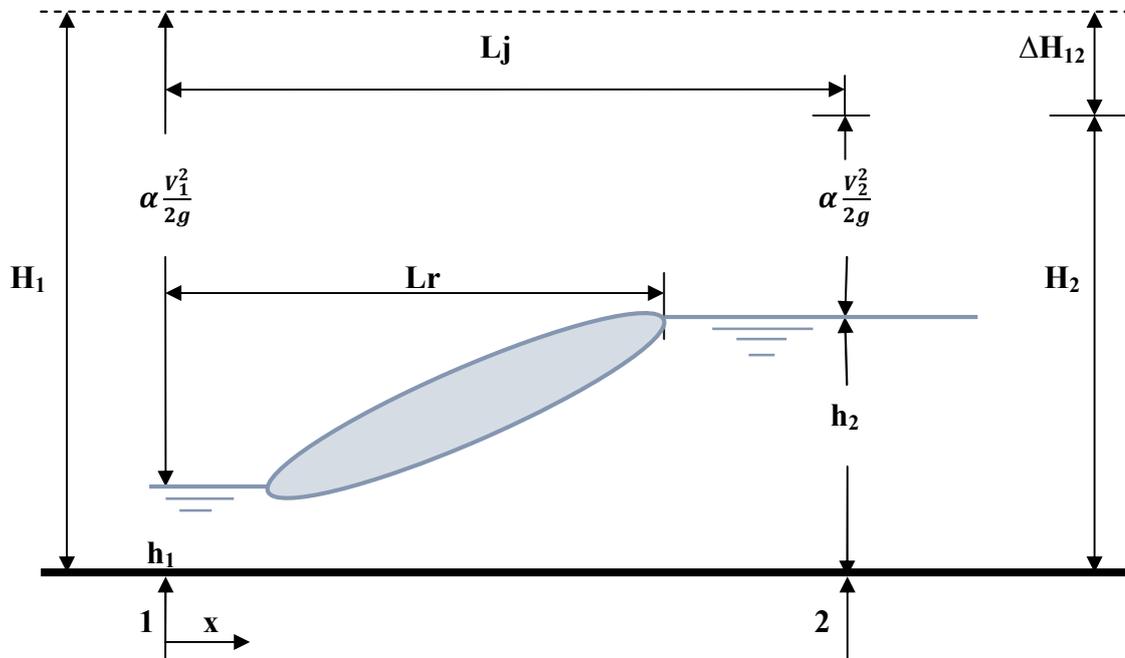


Figure 1.1: Ressaut Hydraulique

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

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

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

I.3. Ressaut hydraulique classique

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

I.3.1. Classification du ressaut classique

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

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

Surface ondulé

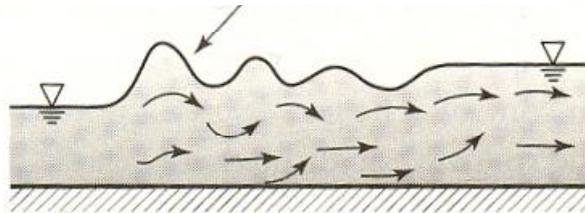


Figure 1.2.a : Ressaut ondulé

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).

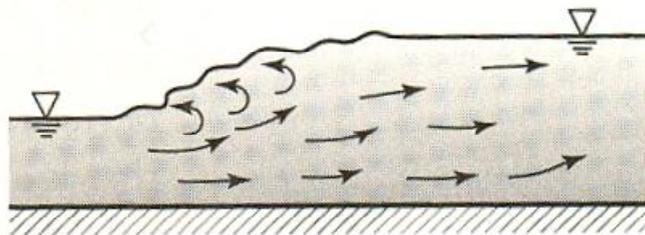


Figure 1.2.b : Le pré-ressaut

- 2- Pour des valeurs de $2.5 < F_1 < 4.5$ l'écoulement est pulsative ; 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.

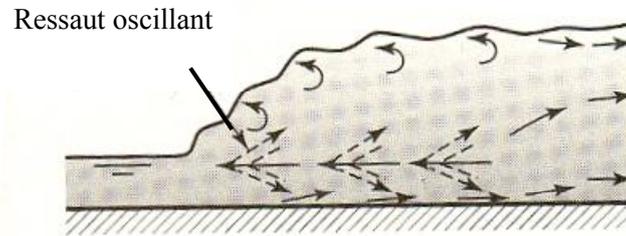


Figure 1.2.c : Le ressaut de transition

- 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).

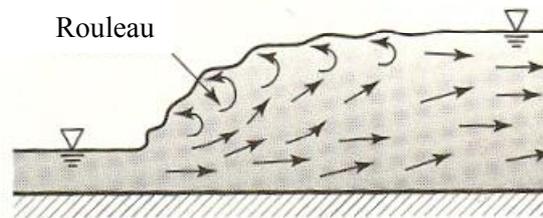


Figure 1.2.d : Le ressaut stable

- 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)

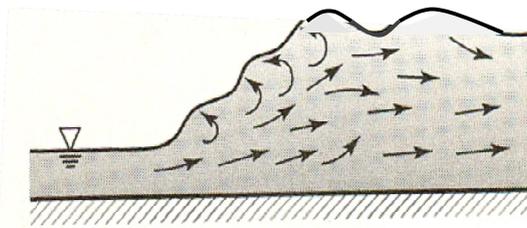


Figure 1.2.e : Le ressaut clapoteux

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 ΔH_{12} , qui représente la perte de charge, n'est pas connu et que les formules du régime uniforme ne sont pas applicables. C'est le théorème d'Euler qui permet de résoudre ce problème.

Considérons un ressaut classique évoluant entre la section initiale et finale respectivement 1 et 2 (figure 1.3).

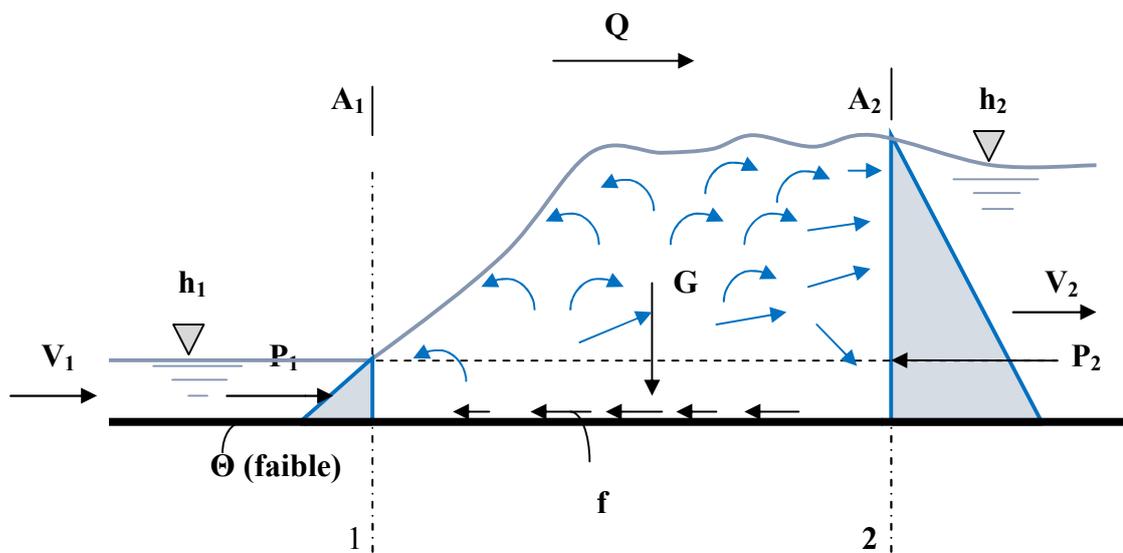


Figure 1.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut

L'équation de continuité permet d'écrire :

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} \quad (1.1)$$

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

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

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

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

- la répartition des pressions dans les sections (A_1) et (A_2) est hydrostatique.
- les frottements sur les parois et le fond du canal le long de la faible distance séparant (A_1) et (A_2) sont négligeables par rapport à la perte de charge due à la turbulence créée par le ressaut.
- les vitesses des différents filets liquides dans chacune des sections (A_1) et (A_2) sont parallèles à la vitesse moyenne V , et considérées uniformes.
- la résistance de l'air est négligeable.

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

$$\beta_2 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_2 - \beta_1 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_1 = P_1 - P_2 + G \cdot \sin\theta - f \quad (1.3)$$

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 :

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

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 :

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

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

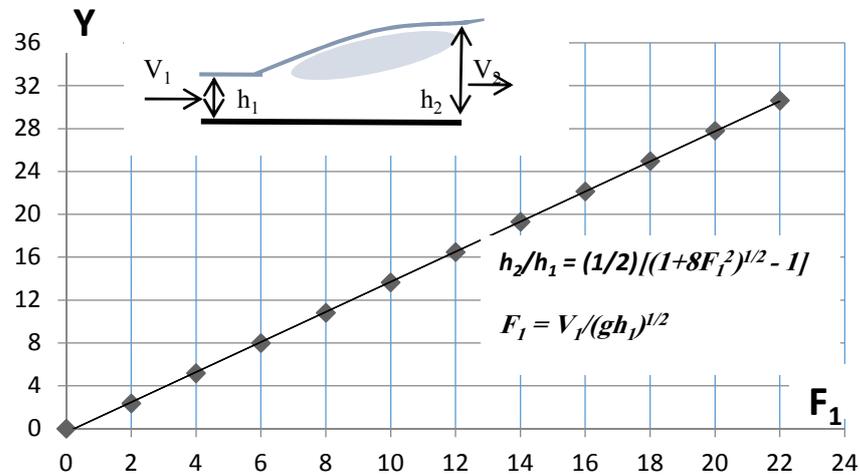


Figure 1.4 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828)

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

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

I.3.3. Caractéristiques géométriques du ressaut

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

I.3.3.1. Hauteurs du ressaut

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

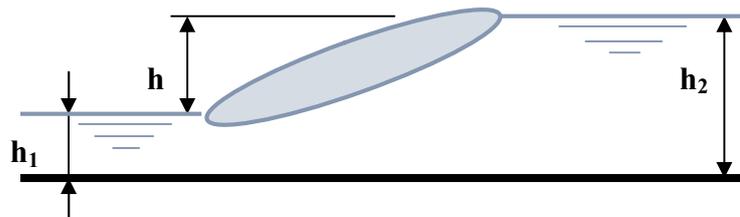


Figure 1.5 : Hauteur du ressaut

I.3.3.2. Longueur du rouleau

En 1990 Hager et al. définissent deux types de longueur du rouleau tous dépendent de forme 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.

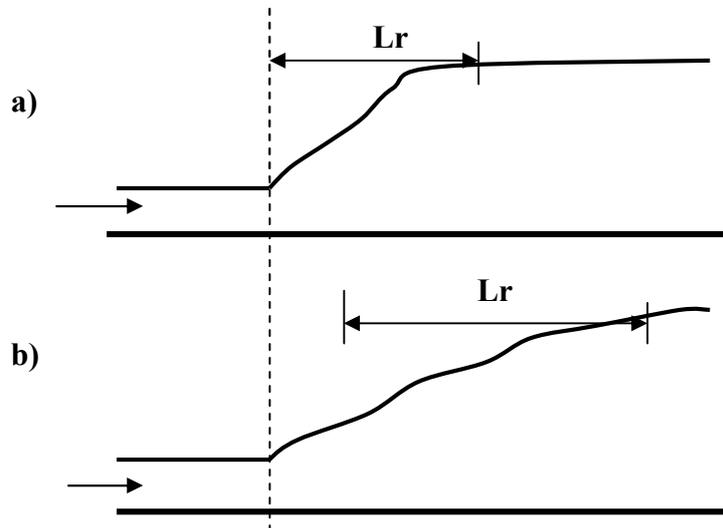


Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique
a) Rouleau développé, b) Rouleau non développé

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. $W = \frac{h_1}{b}$

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

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

«Tgh» indique la tangente hyperbolique.

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

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

I.3.3.3. Longueur du ressaut

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

- la surface libre est pratiquement horizontale.
- la surface de turbulence du rouleau est faible.
- les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.
- l'écoulement graduellement varie apparait 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 :

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

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

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

D'autres formules ont été proposées, pour un canal de section droite rectangulaire, selon Carlier (1980) on a :

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

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

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

Et qui conduit aux mêmes résultats.

I.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.

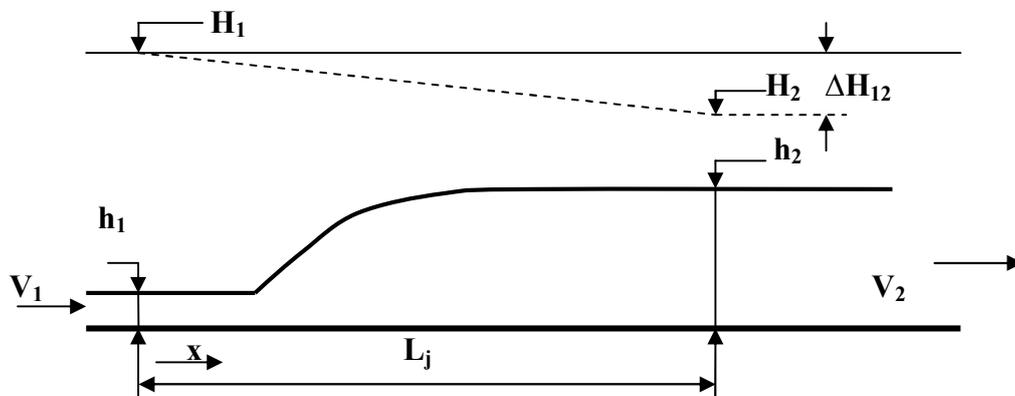


Figure 1.7 : (-----) Liègne de charge totale le long du ressaut classicaue

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

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

$$\text{Où : } A_1 = b \cdot h_1$$

$$A_2 = b \cdot h_2$$

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

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

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

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

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

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

(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 défini par la relation (1.6) de Bélanger (1828).

En remplaçant (1.23) et (1.24) dans l'expression du rendement du ressaut (1.22) on obtiendra :

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

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

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

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

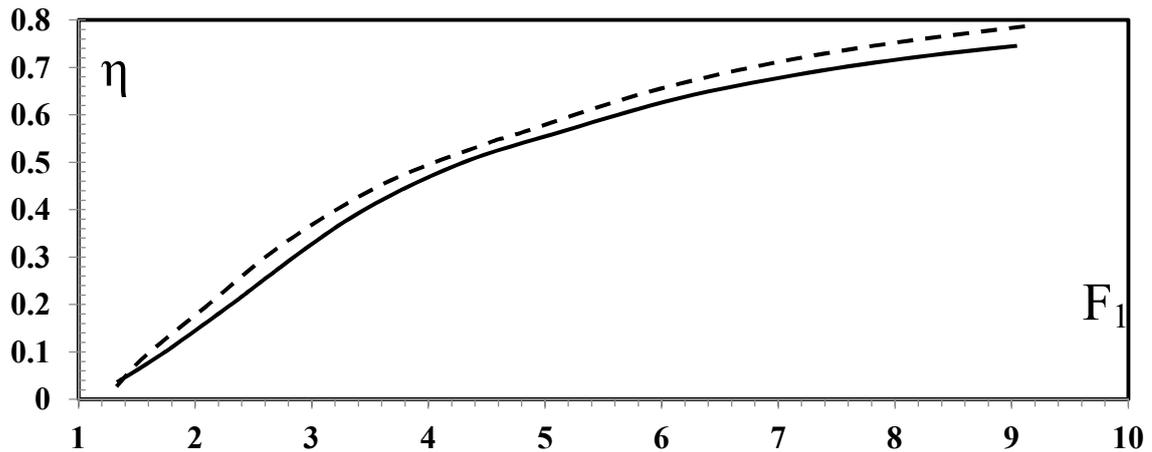


Figure 1.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1
 (—) Courbe tracée selon la relation (1.25), (-----) courbe tracée
 Selon la relation (1.26)

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

I.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire

I.4.1. Approche de Forster et Skrinde (1950)

I.4.1.1. Seuil continu à paroi mince

En admettant une répartition hydrostatique des pressions et une distribution uniforme des vitesses dans les sections de part et d'autre du ressaut, Forster et Skrinde (1950) ont aboutis à un diagramme, liant les trois paramètres adimensionnels suivants :

- le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.
- la position relative du seuil x / h_2 .
- la hauteur relative du seuil s / h_1 .

L'étude expérimentale de Forster et Skrinde (1950) vise à définir la variation de la hauteur relative s / h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour des valeurs données de la position x / h_2 du seuil.

Pour chaque essai effectué, le rapport x / h_2 est maintenu tout en assurant la formation complète du ressaut. La longueur du bassin amortisseur est à la limite égale à la position x du seuil comptée à partir du ressaut (figure 1.9).

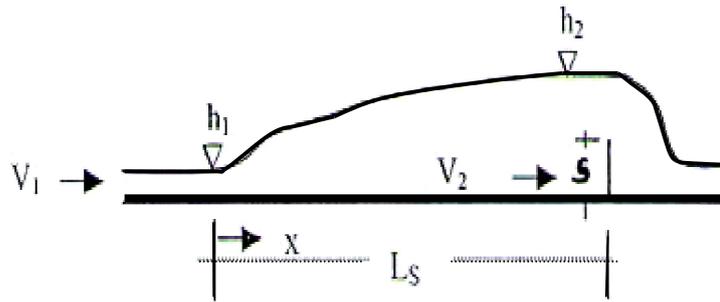


Figure 1.9: Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

Le seuil de hauteur s est dénoyé et fonctionne comme un déversoir ; la profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval n'a ainsi aucune influence sur le débit franchissant le seuil. Cette condition est satisfaite lorsque :

$$h_3 < h_2 - 0,75 \cdot s \quad (1.27)$$

Les mesures expérimentales obtenues sont traduites graphiquement sur la figure (1.10)

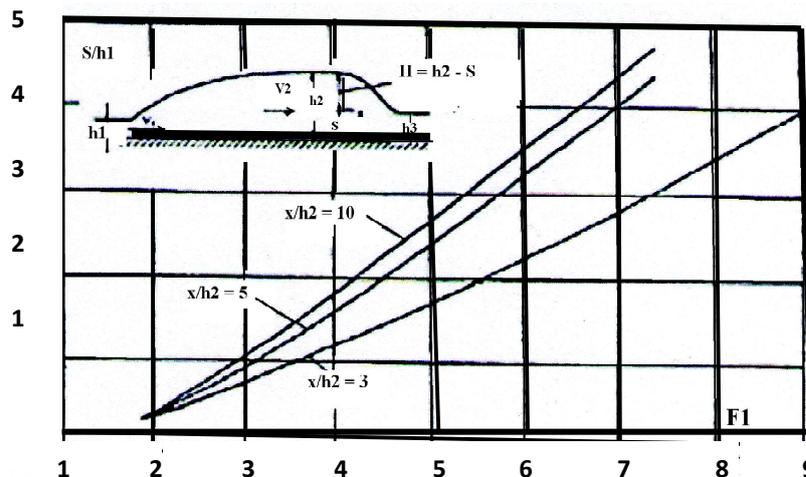


Figure 1.10 : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince quelques valeurs de x/h_2 , selon Forster et Skrinde (1950)

Trois courbes sont alors déterminées pour des valeurs 3,5 et 10 de x / h_2 . On peut constater que pour l'ensemble des valeurs du nombre de Froude F_1 , les courbes expérimentales obtenues se rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que x / h_2 augmente et pour x / h_2 compris entre 5 et 10, la hauteur relative s / h_1 du seuil ne subit pas des grandes variations. Pratiquement, on considère que la position relative x / h_2 du seuil est approximativement égale à 6.

I.4.1.2. Seuil continu à paroi épaisse

Le seuil est considéré comme épais lorsque le profil liquide s'y écoulant est presque parallèle au fond, pour peu que la longueur L du seuil soit suffisante (figure 1.11). La notion de seuil épais est également liée aux caractéristiques de l'écoulement et suivant la classification de Rao et Murlidhar (1963), le seuil est considéré comme étant épais lorsque :

$$0,1 \leq \frac{(h_2 - s)}{L} \leq 0,35 \quad (1.28)$$

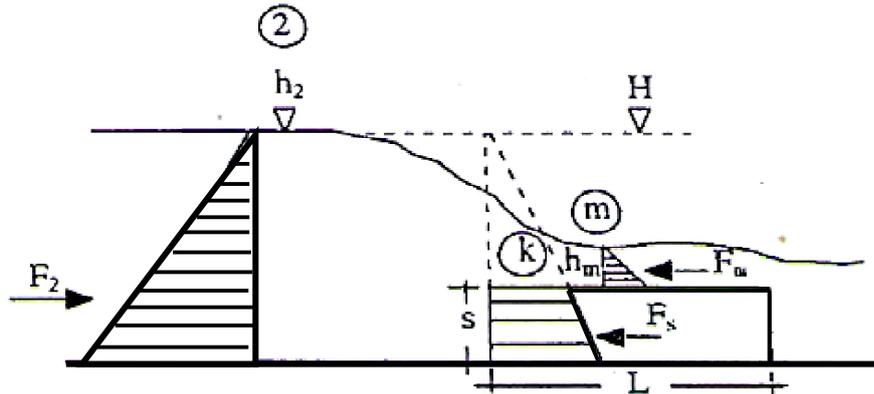


Figure 1.11 : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des

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

L'étude théorique basée sur l'équation de la quantité de mouvement, appliquée entre la section initiale du ressaut et la section au droit du seuil, a abouti à une relation fortement implicite liant la hauteur relative s / h_1 du seuil et le nombre de Froude F_1 (1.29). Le paramètre x / h_2 n'a ainsi théoriquement aucune influence sur le contrôle du ressaut.

$$\frac{21,33.F_1^2}{\sqrt{1+8F_1^2}-1} = \frac{\left(\sqrt{1+8F_1^2}-1-2\frac{s}{h_1}\right)^3}{\sqrt{1+8F_1^2}-1+2\frac{s}{h_1}} \quad (1.29)$$

Contrairement au cas du seuil à paroi mince, une seule courbe est obtenue (figure 1.12) traduisant la variation de s / h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 . Cette courbe peut être utilisée à condition que :

$$h_3 < \frac{(2h_2 + s)}{3} \quad (1.30)$$

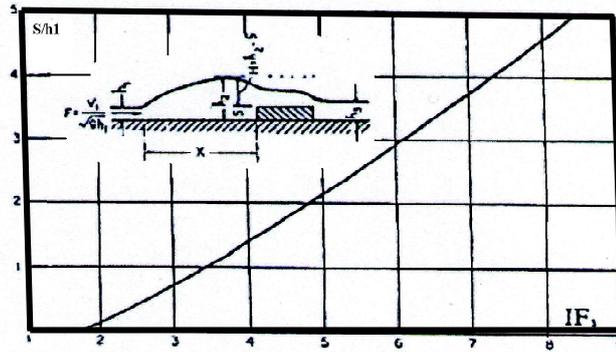


Figure 1.12: Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950) Courbe tracée selon la relation (1.30)

I.4.1.3. La marche positive

Soit la figure (1.13), qui représente un ressaut hydraulique forcé par marche positive de hauteur ‘s’ franchi par un écoulement de profondeur h_3 .

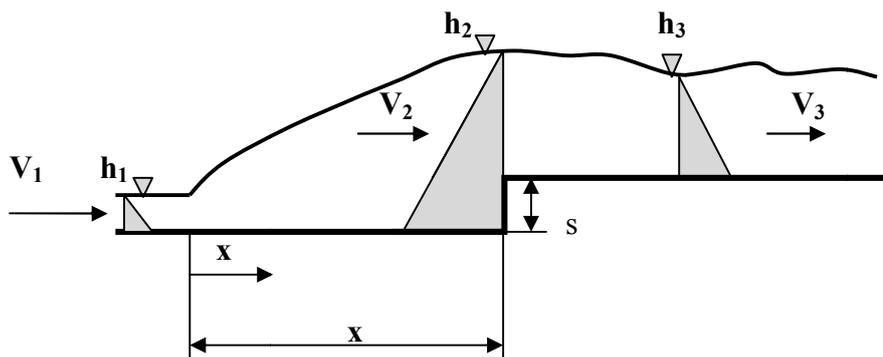


Figure 1.13 : Ressaut forcé par marche positive de hauteur ‘s’, les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions

A la base des études expérimentales effectuées au laboratoire, Forster et Skrinde (1950), ont constaté qu’il y a une relation entre le nombre de Froude F_1 de l’écoulement en amont du ressaut, et la hauteur relative $\frac{h_3}{h_1}$, pour des différentes valeurs de la hauteur relative $\frac{s}{h_1}$ de la marche et pour $x = 5(s + h_3)$.

A cet effet, les auteurs ont développé un diagramme (figure 1.14) qui peut être servi pour déterminer les paramètres caractéristiques du bassin d’amortissement tel que : la longueur et la hauteur du bassin ainsi que la hauteur minimale de la marche positive nécessaire à la formation du ressaut.

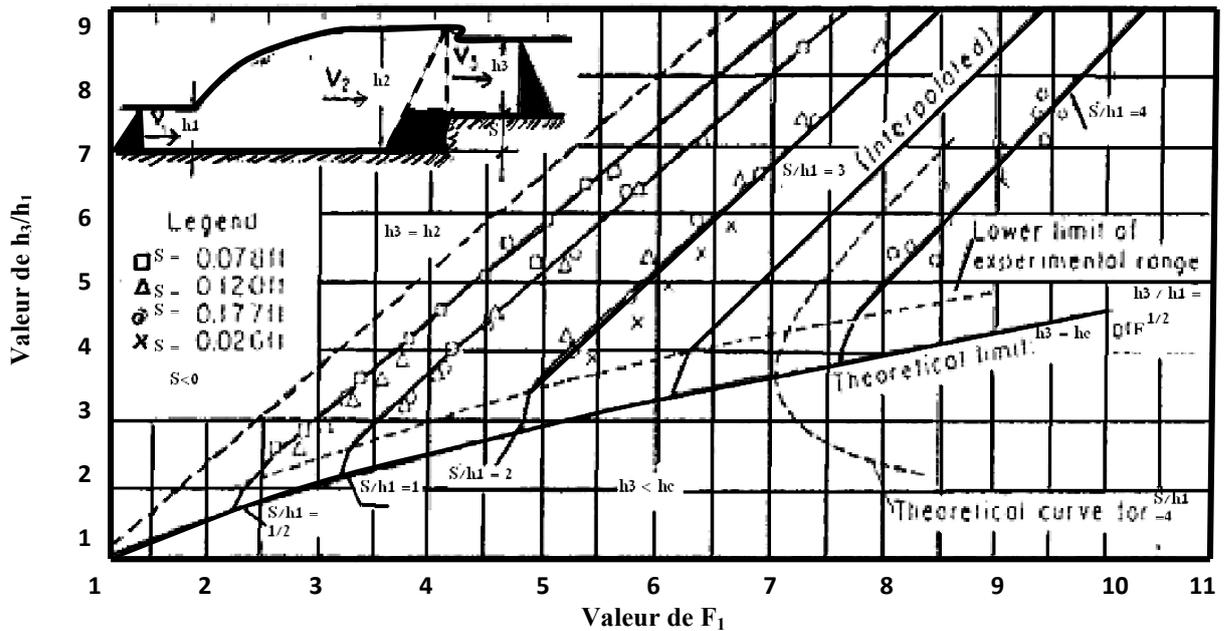


Figure 1.14: Variation du nombre de Froude F_1 , en fonction de h_3/h_1 et de la hauteur relative s/h_1 de la marche positive, selon Forster et Skrinde (1950)

I.5. Ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire

I.5.1. Approche de Rand

En 1957, Rand a proposé d'établir une certaine classification pour le bassin avec seuil continu à son extrémité. Il était le premier qui a classifié le ressaut forcé par seuil en 10 cas typiques, se rapportant aux effets de la hauteur du seuil et de sa position, le ressaut classique servant du cas de référence.

Ces cas peuvent être groupés en trois classes se distinguant par la position du seuil par rapport au pied du ressaut (figure 1.15) :

1. Position minimale en amont L_s , min.
2. Position intermédiaire L_s .
3. Position maximale L_s , max.

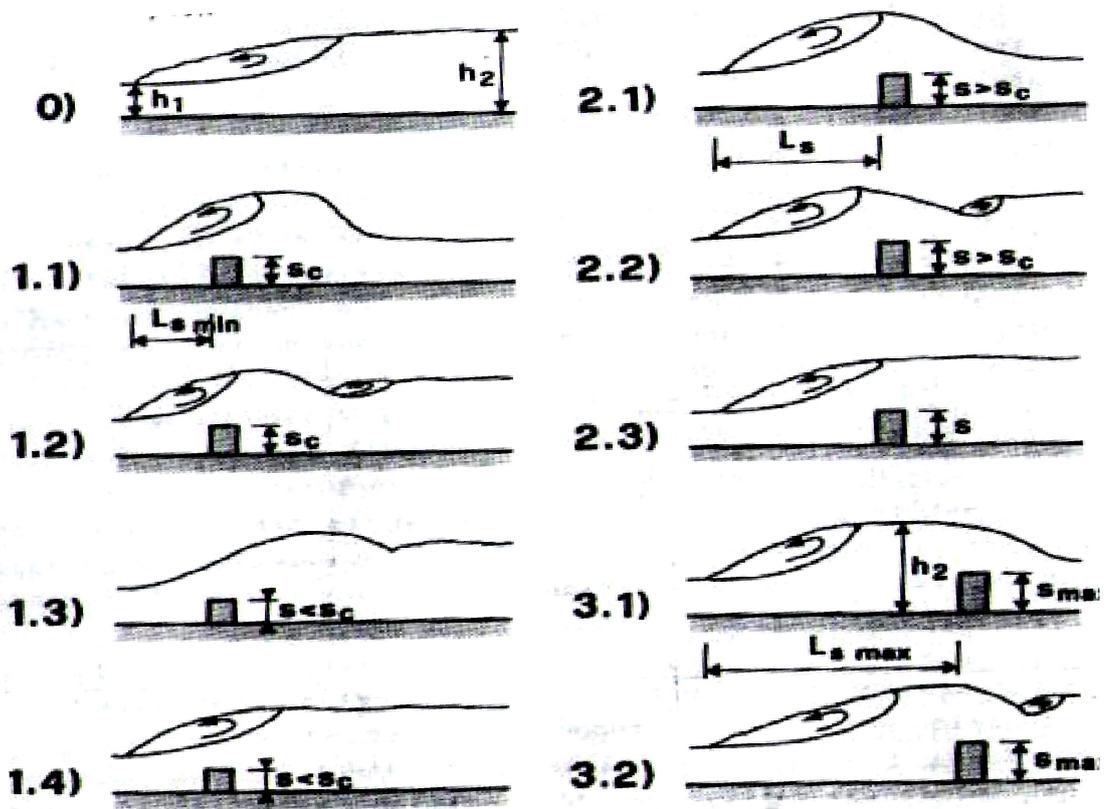


Figure 1.15 : Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes selon Rand (1957):
 0) Ressaut classique avec hauteurs conjuguées h_1 et h_2 ; 1) class 1, longueur $L_{s,min}$; 2) class 2, longueur intermédiaire L_s ; 3) class 3, longueur $L_{s,max}$;
 s : hauteur du seuil, s_c : hauteur critique du seuil et s_{max} : hauteur maximale du seuil.

Variante entre $K = 0$ pour le ressaut dans la position minimale et $K = 1$ pour la position maximale. Rand (1957) ainsi a établi des diagrammes exprimant le rapport des hauteurs conjuguées Y_F en fonction de F_1 pour différentes hauteurs relatives du seuil $S = s / h_1$ et ceci pour 5 valeurs de K . il a démontré que la diminution des hauteurs conjuguées est d'autant plus importante que S est élevé et que l'effet du seuil tend à disparaître lorsque F_1 augmente, ce qui pourrait signifier que pour F_1 très grand, le seuil est inutile !. La hauteur du seuil nécessaire à la formation d'un ressaut peut être tirée de ces diagrammes.

Rand (1957) a proposé pour la première fois une classification des divers cas possibles du ressaut forcé par seuil et des diagrammes permettant le dimensionnement des bassins.

En 1965, Rand a repris ces diagrammes en les présentant sous une autre forme. L'installation expérimentale alors utilisée, est un canal avec vanne plane : la détermination de h_1 est donc préconisée dans ce cas. Un diagramme pour une valeur de F_1 est dressé $Y_F = h_2 / h_1$ en fonction de

$S = s / h_1$ pour divers valeurs de K , arrangement plus pratique à utiliser pour le dimensionnement (figure 1.16), mais avec l'inconvénient qu'il faut un diagramme pour chaque nombre de Froude.

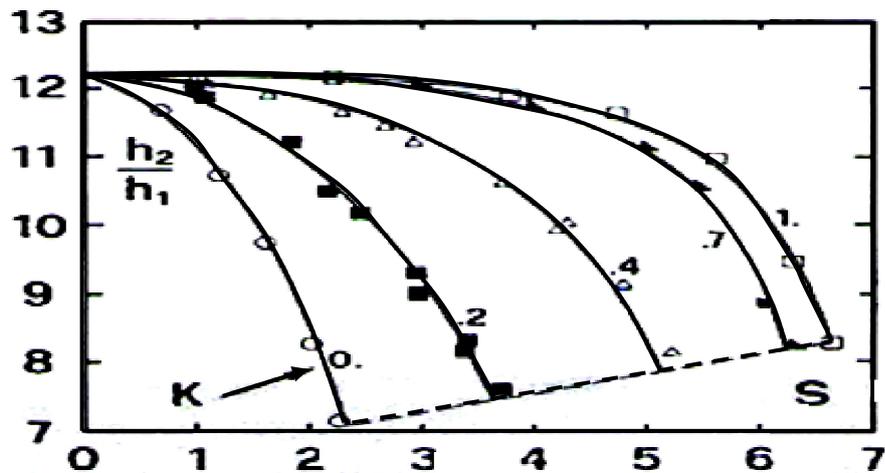


Figure 1.16 : Hauteurs conjuguées $h_2/h_1 = f(S, K)$ pour $F_1 = 9$. Valeurs et courbes expérimentales : (---) limite d'influence de l'aval sur l'amont.

I.5.2. Approche de Bretz

I.5.2.1. Généralités

A l'instar de Rand (1965), Bretz en 1988 a conduit une étude expérimentale sur l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique. Ses résultats ont été confirmés par Hager et Bretz (1988), Hager et Sinniger (1989), Hager et Li (1991).

Une description détaillée et une classification des différents types d'écoulements du ressaut forcé par seuil sont présentées (figure 1.17)

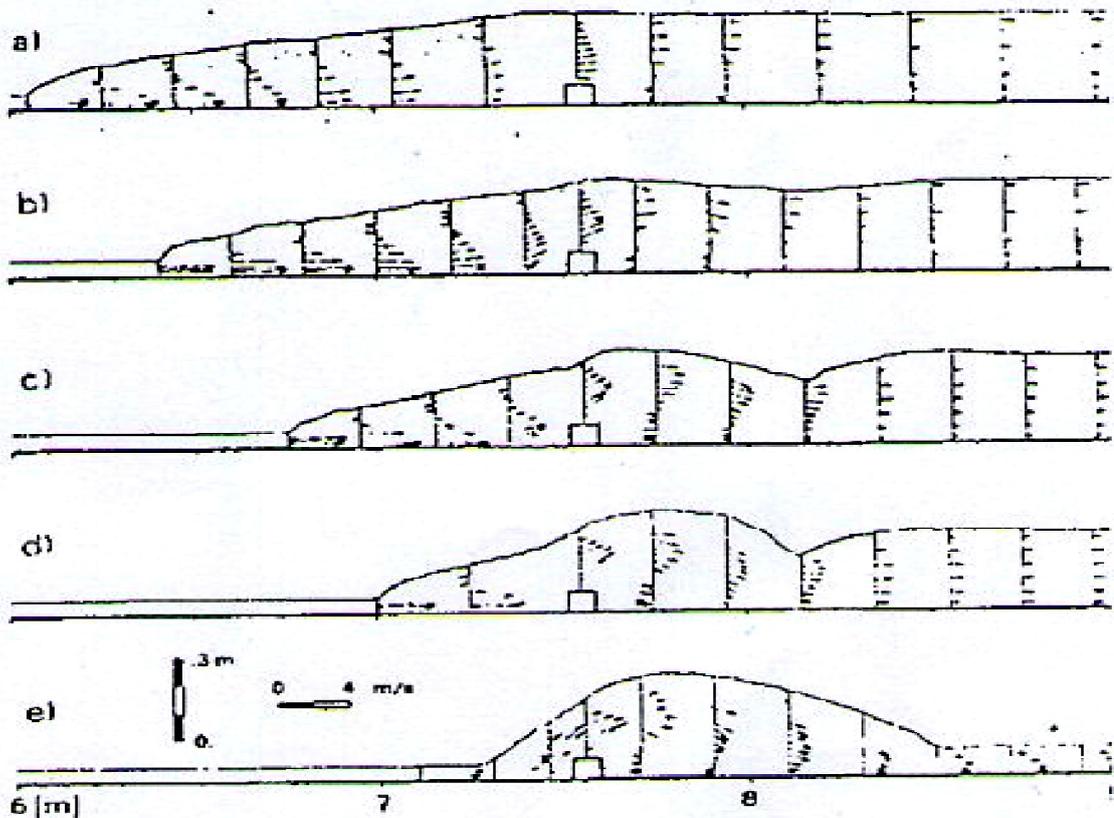


Figure 1.17 : Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $F_1 = 5,23$ et $S = 1,42$.
 1) Ressaut type A ; 2) Ressaut type B ; 3) Ressaut type B_{min} ; 4) Ressaut type C et 5) onde.
 (Bretz, 1987).

En effet trois types de ressaut forcé par seuil sont retenus et analysés dans quatre sections longitudinales. Trois paramètres sont étudiés, d'abord indépendamment les uns des autres. Puis en combinaison : le nombre de Froude F_1 , le niveau aval h_2 est la hauteur relative S du seuil. L'attention est portée particulièrement sur les hauteurs conjuguées caractérisant le ressaut forcé par seuil et profils de surface.

I.5.2.2. Procédure expérimentale

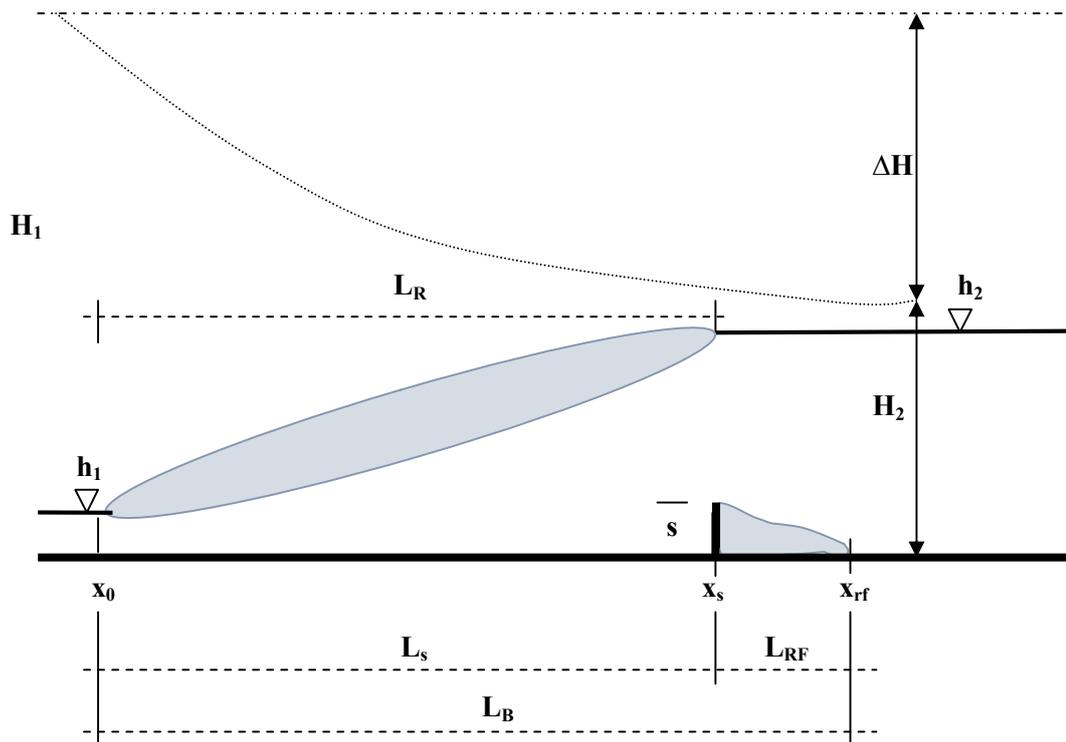


Figure 1.18 : ressaut forcé par seuil selon Bretz (1965): définition des termes. H_1 charge amont, H_2 charge aval, ΔH perte de charge, h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x_0 position du pied du ressaut, x_s position du seuil, x_{rf} position de la fin du rouleau de fond à l'aval, L_r longueur du rouleau de surface, L_s position du seuil par rapport au pied du ressaut, L_{RF} longueur du rouleau de fond aval. L_R distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval.

Dans le but d'augmenter le nombre de Froude F_1 et de pouvoir simultanément contrôler la hauteur d'eau amont h_1 , une vanne plane est installée dans la partie horizontale du canal. La procédure des essais est la même que celle décrite pour le ressaut classique. Les grandeurs suivantes sont relevées : charge à l'amont de la vanne H_0 , hauteur d'eau aval h_2 , position du pied du ressaut x_0 et position de la fin du rouleau de fond x_{rf} . Les essais sont répétés pour les hauteurs relatives du seuil $S = 1, 2, 3$ et 4 mm, dont l'emplacement est fixe. Le pied du ressaut a été placé le plus près possible de la vanne, pour éviter l'effet du frottement dans cette frange de l'écoulement.

Un débit est amorcé pour provoquer un ressaut forcé (type A, B ou B_{min}). Alors 45 essais pour chaque type du ressaut ont été effectués.

I.5.2.3. Hauteurs conjuguées du ressaut

Pour le cas du ressaut forcé type A, la figure (1.19) montre que plus la hauteur relative S du seuil est grande, plus la courbe correspondante s'éloigne de la courbe $S = 0$ correspondante au ressaut classique (sans seuil).

Pour les diverses hauteurs relatives S , les courbes ont été approchées à l'aide de l'équation suivante :

$$Y_A = 1,307F_1 - 0,4S^{0,85} - 0,142 \quad (1.32)$$

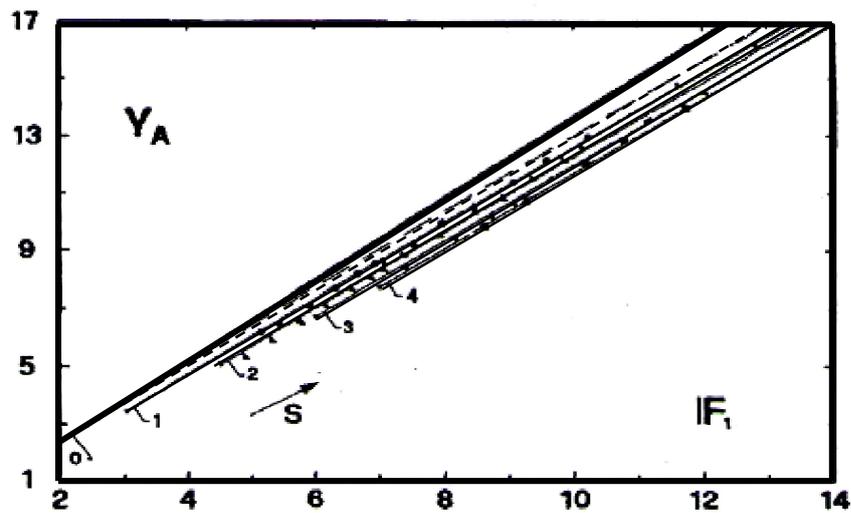


Figure 1.19 : Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_A = f(F_1, S)$ avec $0,5 \leq S \leq 6$. $S = s/h_1$, (—) courbe selon l'équation de Bélanger. (---) courbe du ressaut classique selon l'équation (1.32)

Pour le ressaut forcé type B des courbes analogues sont représentées sur la figure (1.20), avec un décalage plus important vers le bas. Elles sont exprimées par l'équation :

$$Y_B = 1,307F_1 - 0,142 - 0,6S^{0,75} \quad (1.33)$$

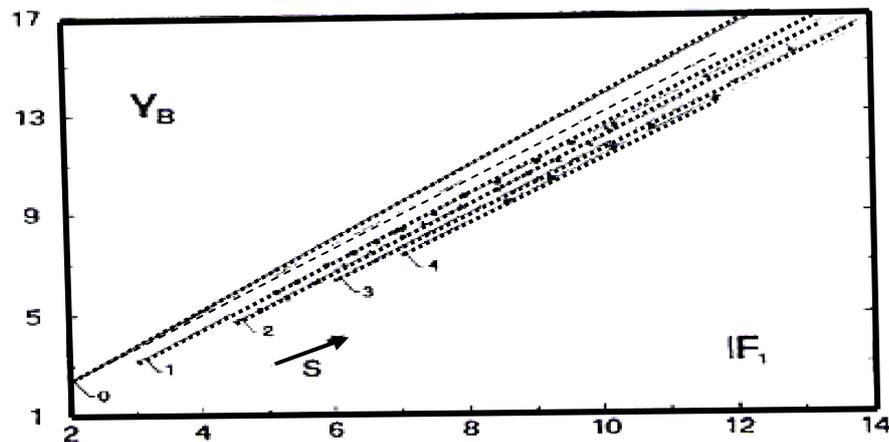


Figure 1.20 : Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_B = f(F_1, S)$. Même notation que la (Figure 1.19).

Finalement pour le cas du ressaut forcé type B-min (figure 1.21), le décalage vers le bas devient encore plus grand. L'équation devient :

$$Y_{B-\min} = 1,307F_1 - 0,142 - 0,85S^{0,65} \quad (1.34)$$

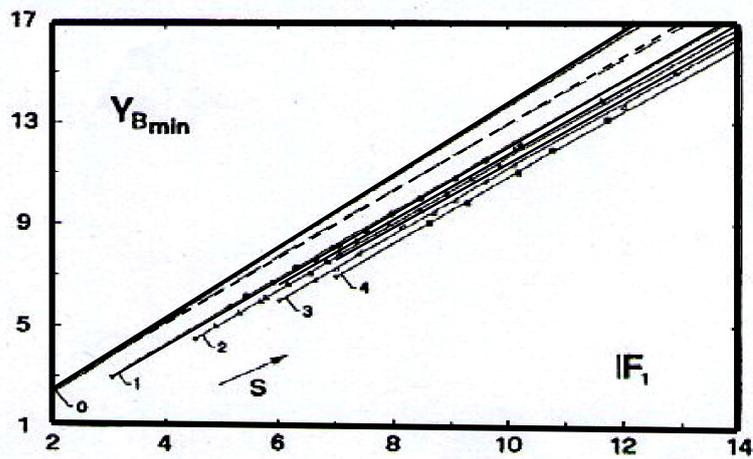


Figure 1.21 : Ressaut forcé type B-min. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_{B-min} = f(F_1, S)$.
Même notation que la (Figure 1.19)

Autrement dit le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut forcé par seuil est représenté en fonction du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique par l'équation :

$$Y_F = Y_{RC} - \Delta Y_S \quad (1.35)$$

Y_F est donnée par les équations (1.32), (1.33) et (1.34), Y_{RC} par la même équation pour $S = 0$ et ΔY_S est l'effet du seuil défini par $\Delta Y_S = \alpha \cdot Y_S^\beta$. Les valeurs des coefficients α et β sont données ci-après :

	Type A	Type B	Type B-min
α	0,4	0,6	0,85
β	0,85	0,75	0,65

I.5.2.4. Longueur relative du bassin

La longueur relative du bassin $\lambda_B = L_B/h_1$ et la position relative du seuil $\lambda_S = L_S/h_1$, en fonction du nombre de Froude F_1 , sont représentées dans la figure (1.22) et la figure (1.23).

Pour les trois types du ressaut forcé, λ_S croît quasi linéairement avec F_1 , la pente de la courbe étant plus forte pour le type A et la moindre pour le type B-min. Quant à λ_B , les courbes présentent une pente plus forte que celle pour λ_S .

Les courbes pour les divers types du ressaut forcé sont situées au-dessous de celles du ressaut classique. Ce fait indique la réduction nette de la longueur du ressaut forcé par rapport au ressaut classique. Pour les trois types du ressaut forcé, les courbes sont données par les équations suivantes, avec le domaine de validité $5 \leq F_1 \leq 13$:

- Ressaut forcé type A $\lambda_S = 6,27F_1 - 5,75$ (1.36), $\lambda_B = 8,68F_1 - 11,23$ (1.39)

- Ressaut forcé type B $\lambda_S = 5,29F_1 - 5,37$ (1.37), $\lambda_B = 8,44F_1 - 12,96$ (1.40)

- Ressaut forcé type B-min $\lambda_S = 4,64F_1 - 4,84$ (1.38), $\lambda_B = 6,93F_1 - 6,83$ (1.41)

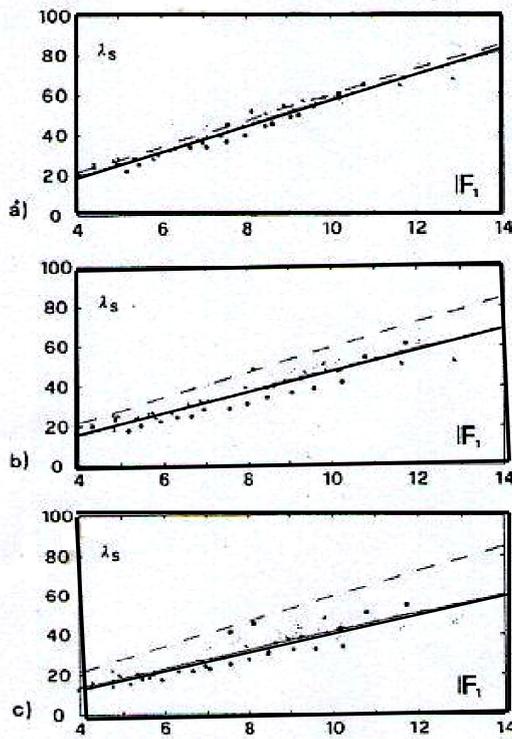


Figure (1.22) : Longueur relative $\lambda_s = f(F_1)$ pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B_{-min} . (—) courbe selon l'équation : a) (1.36), c) (1.37) et (1.38) respectivement. (---) courbe limite.

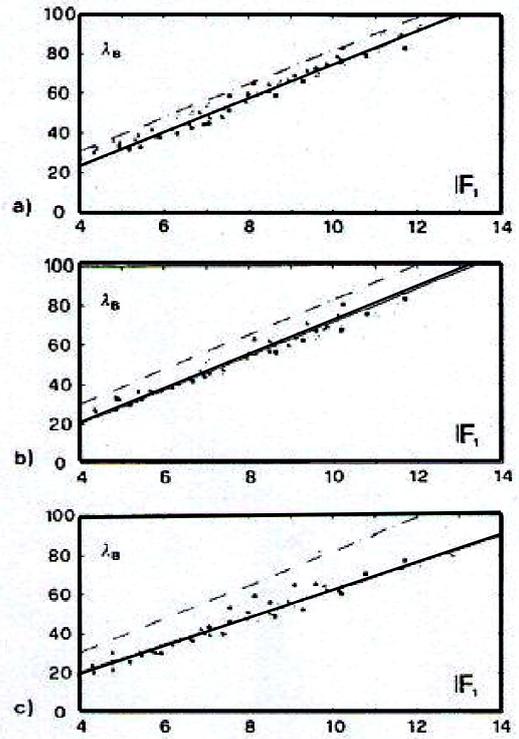


Figure (1.23) : Longueur relative $\lambda_B = f(F_1)$ pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B_{-min} . (—) courbe selon l'équation : a) (1.39), b) (1.40) et c) (1.41) respectivement. (---) courbe limite.

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé, en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire (ressaut hydraulique classique). Nous avons présenté les différentes formes du ressaut, selon la classification de Bradley et Peterka (1957), qui dépendent de la variation du nombre de Froude F_1 , à l'amont du ressaut.

D'après cette étude, nous avons remarqué que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement, afin de définir la relation reliant le rapport Y^* des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 . Bélanger (1828), a fait le premier pas sur cet objectif et a déterminé cette relation, par l'application du théorème d'Euler, entre les deux sections du ressaut.

L'équation de la droite $Y^* = f(F_1)$ obtenue par Bélanger (1828) est représentée par la (figure 1. 4).

Quand on a abordé les travaux de Hager et al (1990), nous avons constaté que les caractéristiques géométriques du ressaut, ne sont déterminées, que par la voie expérimentale, et que plusieurs formules ont été proposées, par différents chercheurs.

A la fin de ce chapitre, nous avons examiné, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, et nous avons cité les travaux de Forster et Skrinde (1950) concernant le seuil à paroi mince. Les auteurs ont défini, en premier lieu, la variation de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 et pour des valeurs données de x/h_2 . En deuxième lieu, ils ont établi trois courbes à la base des données expérimentales, ils ont constaté que les trois courbes se rapprochent, lorsque la valeur de x/h_2 augmente.

Comme pour le cas du seuil, Forster et Skrinde (1950), ont étudié l'effet de la marche positive sur le ressaut évoluant dans un canal rectangulaire, et ils ont élaboré un diagramme qui montre la variation du nombre de Froude F_1 , en fonction du rapport h_3/h_1 , pour différentes valeurs des hauteurs relatives s/h_1 de la marche.

En ce qui concerne le ressaut hydraulique forcé par seuil, nous avons abordé les travaux de Rand (1957), l'auteur a établi une relation entre la hauteur du seuil et sa position, pour faire une classification du ressaut forcé en 10 cas typiques. Enfin, à la base des résultats expérimentaux, Rand (1965) a configuré, sur un diagramme, la relation entre la hauteur conjuguée et la fonction $f(S, K)$ pour $F_1 = 9$, où K est un facteur de position.

Dans le même cadre, Bretz (1988) a étudié l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique ; ces résultats conduisent aux trois équations, qui expriment le rapport des hauteurs conjuguées d'une part, le nombre de Froude F_1 et la hauteur relative du seuil d'autre part. Ces trois cas correspondent aux trois types du ressaut : ressaut type A, ressaut type B et ressaut type B_{\min} . L'auteur à présenter la longueur relative du bassin amortisseur, sous forme de trois équations, correspond aux trois types du ressaut étudié.

Deuxième Chapitre :

ETUDE DE LA COMPACTITE DU RESSAUT HYDRAULIQUE
EN CANAL RECTANGULAIRE

Chapitre II

Etude de la compacité du ressaut hydraulique en canal rectangulaire

II.1. Approche de Debabeche (2003)

La présente thèse se propose d'analyser expérimentalement, les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince, évoluant dans un canal rectangulaire. L'objectif principal de cette étude est de trouver les relations fonctionnelles, exprimées en termes adimensionnels, liant ces caractéristiques.

II.2. 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).

Nous examinerons les travaux de Debabeche (2003), qui ont été consacrés à l'étude expérimentale de l'influence du seuil à paroi mince sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire.

II.3. Position du problème

Lorsque le ressaut contrôlé est entièrement formé sur le radier du bassin amortisseur correspondant à une hauteur géométrique s du seuil et une longueur x du bassin (figure 2.1), le déplacement du seuil vers l'aval ne modifie en rien la configuration du ressaut, ce qui revient à dire que la longueur L_j du ressaut est pratiquement assimilable à la position x du seuil.

Par contre le déplacement du seuil vers l'amont ($L_j/x > 1$) provoque la compacité du ressaut et conduit à plusieurs configurations de celui-ci.

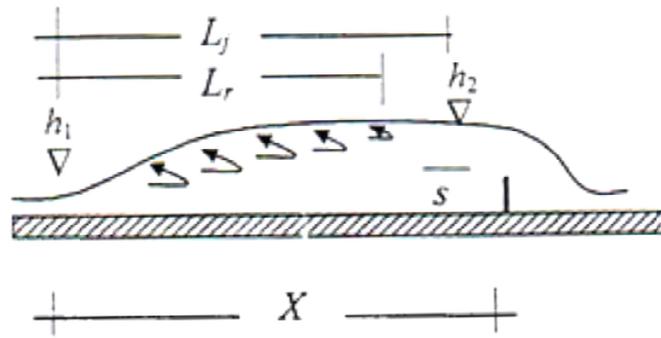


Figure 2.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer l'effet d'un seuil à paroi mince sur le profil du ressaut hydraulique dans un canal à section droite rectangulaire, et de trouver des relations empiriques 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, en fonction du nombre de Froude IF_1 et du facteur de compacité γ défini comme le rapport de la longueur du rouleau Lr^* et de la position x du seuil.

II.4. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma \leq 0,9$

Pour une large gamme des nombres de Froude allant de 1,5 à 12 la mise en place d'un seuil mince à l'aval du bassin, à une distance x du seuil supérieur à la longueur Lr du rouleau, correspondant à un rapport de compacité $\gamma \leq 0,9$, n'a pratiquement aucune influence sur le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut classique.

Afin de mettre en évidence cette influence, on s'intéresse aux configurations du ressaut contrôlé relatives aux rapports de compacité $\gamma > 0,9$.

II.5. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma > 0,9$

La figure 2.2 représente les points de mesures expérimentales et leurs ajustements.

Les points de mesures expérimentales s'éloignent de la courbe théorique du ressaut classique selon Bélanger ($\gamma \leq 0.9$), au fur et à mesure que le rapport de compacité γ augmente. Cet éloignement commence à se faire remarquer à partir de $\gamma > 1,25$.

Par ailleurs, pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $Y=a IF + b$.

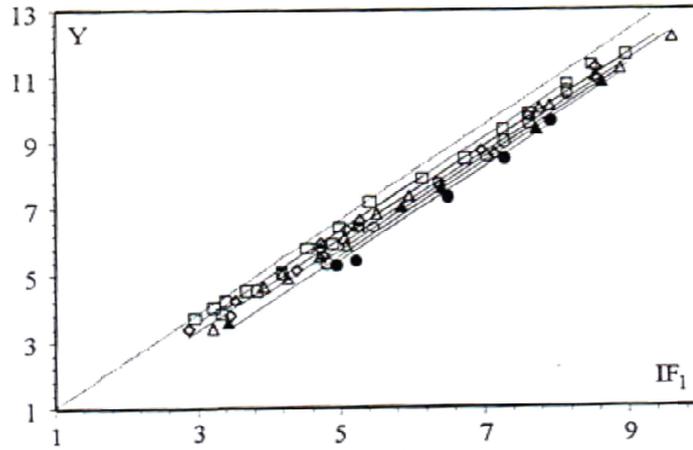


Figure 2.2 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction du nombre de Froude IF_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ : (\square)1 , (\diamond)1,15 , (Δ)1,3 , (\circ)1,45 , (\blacktriangle)1,6 , (\bullet)1,93. (- - -) Courbe théorique du ressaut classique selon Bélanger ($\gamma \leq 0,9$). (—) Courbe d'ajustements.

Une relation unique de la forme $Y = \Psi (IF_1, \gamma)$ est alors proposée, permettant de déterminer le rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction de nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident pour toutes les configurations du ressaut contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire. Celle-ci s'écrit comme suit :

$$Y = 1.386 \cdot IF_1 - \sqrt{2} \cdot \ln(\gamma) - 0,617 \quad \text{Pour } 2,5 \leq IF_1 \leq 11 \quad (2.1)$$

La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure 2.3

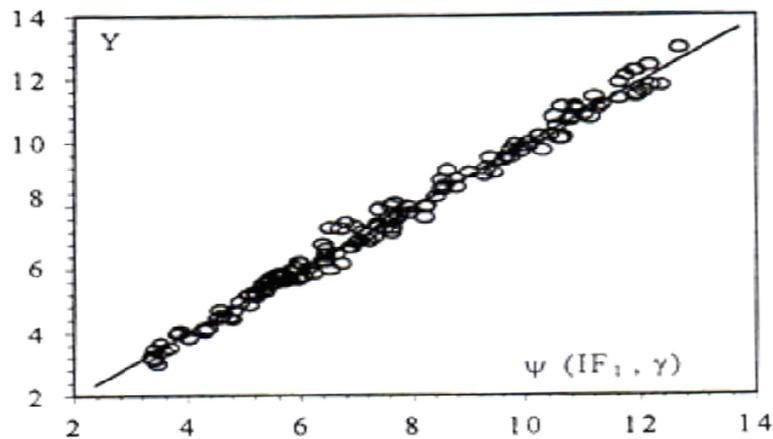


Figure 2.3 : Variation du rapport Y de hauteurs conjuguées en fonction de $(Y = 1.386 \cdot IF_1 - \sqrt{2} \cdot \ln(\gamma) - 0,617)$. (\circ) points expérimentaux. (—) droite d'équation : $h_2/h_1 = 1.386 \cdot IF_1 - \sqrt{2} \cdot \ln(\gamma) - 0,617$

II.6. Hauteur relative du seuil

La figure 2.4 montre la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident.

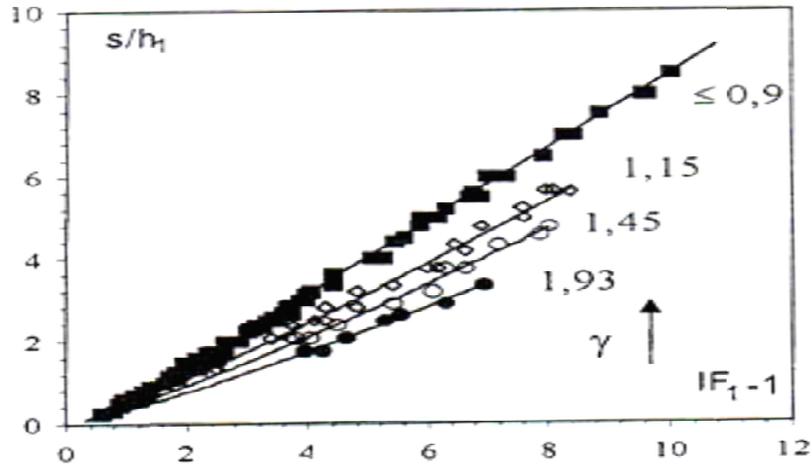


Figure 2.4 : Variation de s/h_1 en fonction du nombre de Froude IF_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ : (■) 0,9, (◊) 1,15, (○) 1,45, (●) 1,93. (—) Courbes d'ajustements.

La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que la relation $S = f(IF_1)$ est quasi-linéaire pour chaque configuration du ressaut.

Par ailleurs, pour une valeur donnée du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

L'auteur a établi une autre relation linéaire traduisant la variation de s/h_1 en fonction de IF et de rapport γ de compacité :

$$S = (1,07 - 0,29\gamma) \cdot (IF - 1) - 0,48 \text{ pour } 2,5 < IF < 12 \quad (2.2)$$

La représentation graphique des points de mesures de coordonnées $(IF_1 - 1, \zeta(S, \gamma))$, ou

$\zeta(s, \gamma) = (S + 0,48) / (1,07 - 0,29\gamma)$ et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure 2.5.

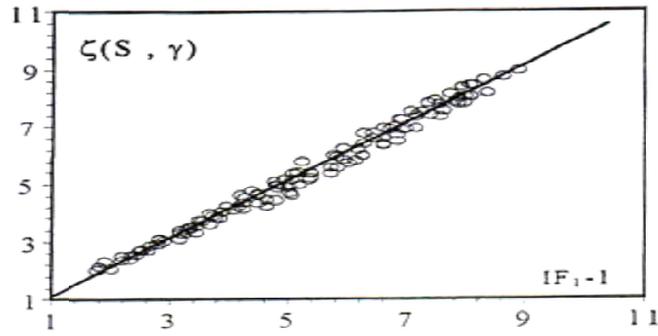


Figure 2.5 : Variation de $\zeta(S, \gamma)$ en fonction de IF_1-1 . (○) points expérimentaux. (—) Droite d'équation : $(S + 0,48)/(1,07 - 0,29\gamma) = IF_1-1$.

II.7. Relation entre le rapport γ de compacité et la position relative x/h_2 du seuil

La figure 2.6 représente la variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ .

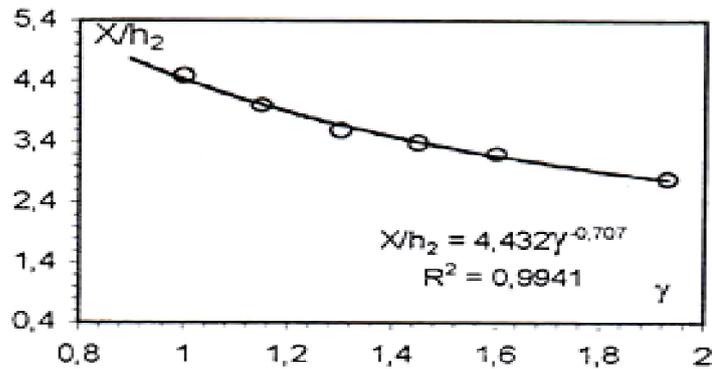


Figure 2.6 : Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ . (—) Courbe d'ajustement.

L'équation de la courbe d'ajustement est ainsi :

$$x/h_2 = 4,432 \cdot \gamma^{0,707} \quad (2.3)$$

Pour une rapport γ de compacité égale à l'unité, l'équation (----) donne un rapport $Lr^*/h_2=4,432$. Ce dernier est très proche de celui proposé par Safranez (1955) $Lr/h_2=4,5$.

II.8. Profil de surface du ressaut

La figure 2.7 représente les profils du surface du ressaut relatifs à quelques rapports intermédiaires de compacité du ressaut, à savoir : $\gamma \leq 0,9$, $\gamma=1,15$, $\gamma=1,45$, $\gamma=1,93$.

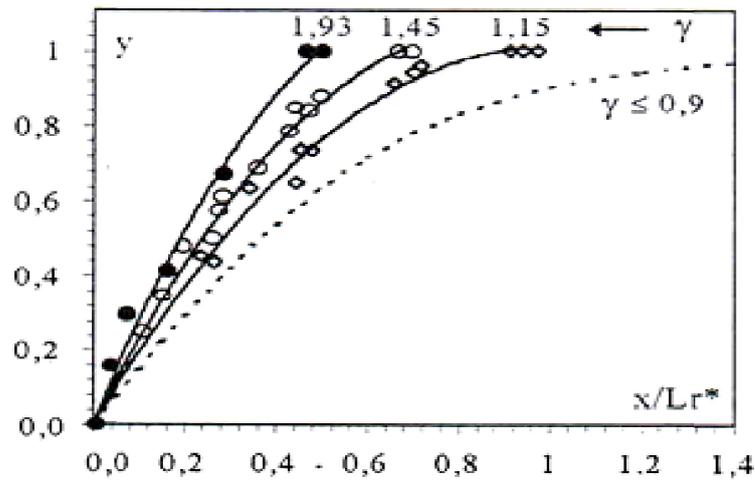


Figure 2.7 : Variation expérimentales du profil de surface ($y=f(X)$) du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite rectangulaire, pour trois rapports intermédiaires de compacité. (—) courbes d'ajustements. (---) courbe selon l'équation $y=\text{Tanh}(1,5.X)$.

La courbe en traitillé correspondant au profil du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$) possède une allure courbée, celle-ci se redresse progressivement en allant vers un rapport γ de compacité supérieur, jusqu'à ce qu'elle avoisine une forme linéaire pour un fort rapport de compacité ($\gamma=1,93$).

L'analyse des mesures expérimentales a permis d'aboutir à une équation généralisée tenant compte du rapport γ de compacité du ressaut.

Les points expérimentaux se situent alors sur une courbe d'équation :

$$y = \text{Tanh}[(2\gamma - 0,3)X] \quad (2.4)$$

Si l'on remplace, dans cette équation, le rapport γ par 0,9 on retrouve l'équation de BAKHMETEEF et MATZKE (1936) relative au ressaut classique.

L'équation précédente est représentée graphiquement sur la figure 2.8

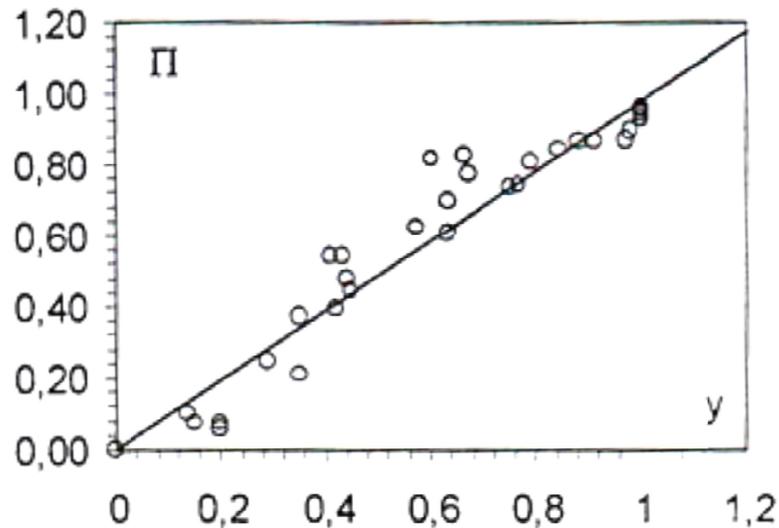


Figure 2.8 : Variation expérimentale de Π en fonction de γ , pour différentes configurations de ressaut contrôlé dans un canal rectangulaire. (—) première bissectrice. (o) point expérimentaux.

II.9. Conclusion

L'étude s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident. Il a été montré que pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $Y=a IF + b$.

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un second temps, à la variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, pour une valeur donnée du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente. L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport S en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type quasi-linéaire.

Dans un troisième temps l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ . Il a été montré que Pour un rapport γ de compacité égale à l'unité, la relation donne un rapport $Lr^*/h_2=4,432$. Ce dernier est très proche de celui proposé par Safranez (1955) $Lr/h_2=4,5$.

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un quatrième temps, à la variation expérimentale du profil de surface ($y=f(X)$) du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite rectangulaire, pour trois rapports intermédiaires de compacité.

Troisième Chapitre :
RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOIDAL

Chapitre III

Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons citer quelques travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. Nous citerons particulièrement ceux effectués par Silvester (1964), Wanoschek et Hager (1989) sur le ressaut classique.

Ces auteurs ont notamment contribué à définir la longueur du ressaut et l'ont exprimé sous la forme adimensionnelle tel que :

$$\frac{L_j}{(h_2 - h_1)} = 7,1 \cdot (1 + 10M) \quad (3.1)$$

Avec : $M = \frac{m \cdot h_1}{b}$ où m est la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal, b la base du trapèze et h_1 , h_2 sont respectivement la hauteur initiale et finale du ressaut. Le paramètre adimensionnel M représente en fait, la hauteur relative initiale du ressaut.

La relation de Silvester (1964) montre clairement que, la longueur du ressaut est d'autant plus grande que M tend vers l'infini. Les valeurs croissantes de M indiquent un profil trapézoïdal géométriquement rétréci à la base en tendant vers le profil triangulaire ($b \rightarrow 0$). Par contre, les valeurs décroissantes de M aboutissent à des profils trapézoïdaux d'autant plus refermés vers le haut en tendant vers le profil rectangulaire ($M \rightarrow \infty$). Ces considérations laissent penser que le ressaut en canal triangulaire devrait s'étendre sur une longueur beaucoup plus grande que son homologue du rectangulaire.

Plus récemment, Wanoschek et Hager (1989) ont décrit d'une manière détaillée le comportement du ressaut, dans un canal trapézoïdal, d'angle d'inclinaison de 45° ($m = 1$) et pour des valeurs de $M \leq 0,4$. Les observations ont révélé l'existence d'un rouleau du fond, jusqu'alors jamais détecté, et dont les caractéristiques géométriques, telles que la longueur à la base, la hauteur ainsi que la position sont définies.

Les essais ont montré que la longueur relative L_j / h_2 du ressaut dépend à la fois de la valeur du nombre de Froude F_1 et de la valeur de la hauteur relative initiale M : les courbes de la variation de L_j / h_2 , obtenues pour $0,1 \leq M \leq 0,4$, issues des essais de Peterka pour le ressaut en canal de section droite triangulaire.

Les auteurs ont montré que le ressaut dans le canal trapézoïdal testé devrait être plus long et asymétrique au-delà d'une valeur limite du nombre de Froude F_{1L} , tout dépendant de la hauteur relative initiale M .

De même pour la longueur caractéristique du ressaut, nous allons aborder à travers ce chapitre un autre paramètre caractéristique du ressaut ; ce paramètre est le rapport des hauteurs conjuguées Y , obtenu par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut.

III.2. Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

Le ressaut hydraulique, comme dissipateur d'énergie, est couramment utilisé dans les bassins d'amortissement. Les sections transversales de ces bassins prennent souvent une forme rectangulaire, alors que de point de vue pratique le canal trapézoïdal représente un cas particulière intéressant.

III.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées

L'équation de la quantité de mouvement appliquée aux sections initiales et finales d'un ressaut se produisent dans un canal horizontal de section droite trapézoïdale, pour lequel :

$$A_1 = b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2$$

$$A_2 = b \cdot h_2 + m \cdot h_2^2$$

Les centres de gravité des sections initiales et finales sont :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6} \cdot \left(\frac{3b+2mh_1}{A_1} \right)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6} \cdot \left(\frac{3b+2mh_2}{A_2} \right)$$

Les forces de pressions des sections initiales et finales sont :

$$P_1 = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_1 \cdot A_1$$

$$P_2 = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_2 \cdot A_2$$

L'application de cette équation donne :

$$\frac{bh_1^2}{2} + \frac{mh_1^2}{3} + \frac{Q^2}{gA_1} = \frac{bh_2^2}{2} + \frac{mh_2^2}{3} + \frac{Q^2}{gA_2} \quad (3.2)$$

Le nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement dans la section initiale du ressaut est tel que :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_1^2)^3} \quad (3.3)$$

En introduisant le paramètre Y , définissant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, l'équation devient :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (3.4)$$

Tels que :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} \quad \text{et} \quad M = \frac{mh_1}{b}$$

L'équation (3.4) a cinq variables est réduite à trois variables (F_1^2 , M , Y).

Les éléments connus sont Q , h_1 , b et m qui forment :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_1^2)^3} \quad \text{et} \quad M = \frac{mh_1}{b}$$

L'élément inconnu est $h_2 = ?$

Connaissant F_1^2 et M on peut tirer à partir du graphique, le rapport $Y = \frac{h_2}{h_1}$ d'où $h_2 = Y \cdot h_1$

III.2.1.1. Cas particulier du canal rectangulaire

Pour obtenir la fonction $Y(F_1)$ pour le cas du ressaut hydraulique évaluant en canal rectangulaire, il suffit d'annuler dans l'équation (3.4) m et M ($m = 0$ et $M = 0$). L'équation (3.4) devient.

$$F_1^2 \left(1 - \frac{1}{Y} \right) = \frac{Y^2 - 1}{2}$$

Ou encore :

$$F_1^2 = \frac{Y(Y+1)}{2} \quad (3.5)$$

Et F_1^2 devient :

$$F_1^2 = \frac{Q^2 b}{g(bh_1)^3}$$

Éléments connus : Q , b , h_1 donnent F_1 .

Éléments inconnus : $h_2 = ?$

L'équation (3.5) conduit à la relation :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad \text{C'est l'équation de Bélanger (1828), cette équation traduit un}$$

ressaut classique sans obstacle en aval. Elle a été reprise par Hager (1988) :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2}, \quad \text{valable pour } F_1 > 3.$$

Hager a vérifié expérimentalement que pour des ressauts où $F_1 > 3$, $\sqrt{1 + 8F_1^2} \approx \sqrt{8F_1^2}$ d'où la relation :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2} \quad (3.6)$$

III.2.1.2. Cas particulier du canal triangulaire

En remplaçant dans l'équation (3.4) : $b = 0$ et $\frac{1}{M} = 0$ ($M \rightarrow \infty$), l'équation (3.4) donne :

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^2 + Y + 1)}{3(Y + 1)} \quad (3.7)$$

Hager (1988) a donné une forme approchée à cette équation :

$$Y = \left(\frac{3}{2} F_1^2 - 1 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.8)$$

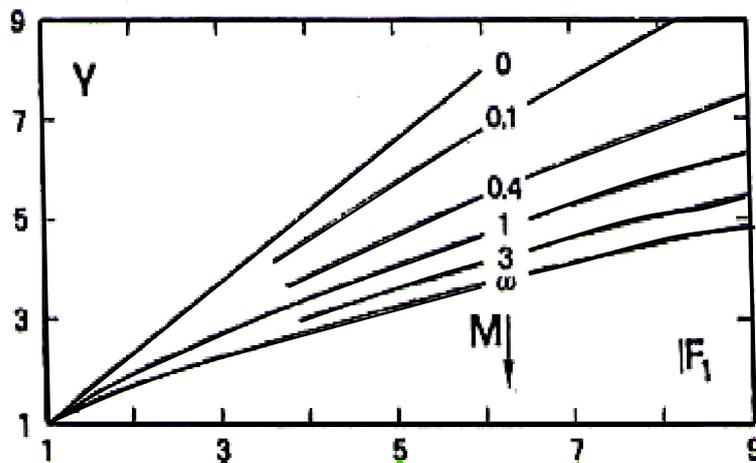


Figure 3.1 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M . $M \rightarrow 0$: profil rectangulaire. $0 < M < \infty$:

III.2.2. Longueurs du ressaut

La longueur du ressaut L_j n'a pu être quantifiée que par voie expérimentale et sa définition varie d'un auteur à un autre. En effet, on estime que la longueur L_j doit être mesurée dans la section à l'aval du ressaut.

La longueur du ressaut hydraulique en canaux trapézoïdaux mesurée le long de l'axe du canal est trouvée moins détachée que celle en canal rectangulaire.

Posey et Hsing (1938) ont exprimé la longueur relative $\lambda_j = \frac{L_j}{h_2}$ par la relation :

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_2} = 5 \left[1 + 4 \left(\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

(3.9)

Où : $W = b + 2mh$ avec W : largeur de la surface d'eau.

L'erreur sur λ_j est estimée par : $\lambda_j = \lambda_j \pm 5$.

Une autre formule de la longueur du ressaut a été analysée par Silvester (1964), Wanoschek et Hager (1989) c'est la relation (3.1), $\frac{L_j}{(h_2-h_1)} = 7,1 \cdot (1 + 10M)$

Ohtsu (1976) a corrélé la longueur du ressaut, comme :

$$\text{Log}_{10} \left(\frac{L_j}{\Delta H} \right) = 1,71\xi + 0,315m + 1,58 \quad (3.10)$$

Où : $\xi = \frac{\Delta H}{H_i}$ est la perte d'énergie relative à travers le ressaut, ΔH : la perte d'énergie du ressaut, H_i : la charge totale d'eau.

D'après Hager et Wanoschek (1989), La particularité du ressaut en canal trapézoïdal est l'apparition d'un rouleau du fond pour des nombres de Froude $F_1 > 4$. Les dimensions de ce type de rouleau pourront être données par les grandeurs suivantes :

- L_u : distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau du fond.
- L_b : longueur du rouleau du fond.
- h_b : hauteur maximale du rouleau du fond (Figure 3.2)

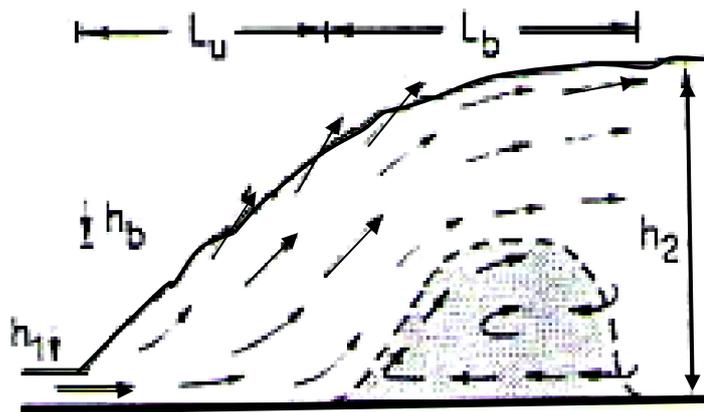


Figure 3.2 : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale

La détermination expérimentale exacte du début et la fin du rouleau du fond est assez délicate à cause de la grande turbulence qui caractérise l'écoulement.

III.2.3. Perte de charge relative du ressaut hydraulique

La perte de charge ΔH du ressaut est par définition la différence des charges initiale et finale : $\Delta H = H_1 - H_2$.

La perte de charge relative est par définition comme étant le rapport de ΔH à la charge initiale H_1 :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1}$$

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \\ H_2 &= h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

En tenant compte des relations donnant le rapport des hauteurs conjuguées.

$$Y = \frac{h_2}{h_1} \quad \text{et de} \quad M = \frac{mh_1}{b}, \quad \text{ainsi que du nombre de Froude } F_1 \text{ tel que :}$$

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_1)^3}$$

On obtiendra :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \left[\frac{(1+M)^3}{(1+2M)(1+MY)^2} \right]}{1 + \frac{F_1^2}{2} \frac{(1+M)}{(1+2M)}} ; 0 < \eta < 1 \quad (3.12)$$

III.2.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire

Pour le canal rectangulaire on a : $M = 0$, donc :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (3.13)$$

Sinniger (1985) a proposé une bonne approximation de cette équation :

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2 ; F_1 > 2,5 \quad (3.14)$$

III.2.3.2. Cas particulier du canal triangulaire

Pour le cas du canal triangulaire on a : $\frac{1}{M} = 0$; ($M \rightarrow \infty$). L'expression de la perte de charge relative sera :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}} \quad (3.15)$$

Pour $F_1 > 3$, Hager et Sinniger (1985) proposent la relation approchée suivante:

$$\eta = \left[\left(1 - \frac{12}{F_1^4} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \quad (3.16)$$

La représentation graphique (figure 3.3) de la relation générale (3.12), montre que pour même nombre de Froude F_1 , le rendement du ressaut triangulaire est plus élevé que celui du rectangulaire ou du trapézoïdale. Comparé au rendement du ressaut rectangulaire, le rendement du ressaut trapézoïdal est environ 10 % plus important.

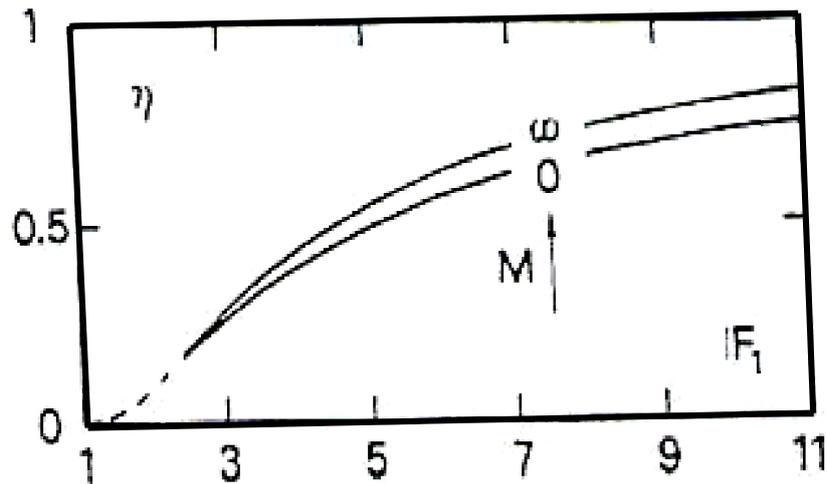


Figure 3.3 : Représentation graphique de la relation (3.12) du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . $M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire.

III.3. Conclusion

Cette partie de notre étude bibliographique a pour objectif de faire le point sur les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. La détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique, a été souvent l'objectif principal des travaux entrepris par Posey et Hsing (1938), Silvester (1964), Ohtsu (1976), et plus récemment ceux de Hager et Wanoschek (1989).

Dans ce chapitre nous avons déterminé la relation des hauteurs conjuguées, en fonction du nombre de Froude F_1 , par l'application du théorème de la quantité de mouvement, et nous avons constaté qu'à partir du canal de forme trapézoïdale, nous pouvons déduire le résultat concernant les canaux rectangulaires et triangulaires.

Concernant la relation de la perte de charge relative, nous avons eu recours au théorème de Bernoulli pour la détermination de la charge totale en amont et en aval du ressaut, nous pouvons donc déduire le résultat du canal rectangulaire et triangulaire, et nous avons présenté la relation approchée de Hager et Sinniger (1985). La représentation graphique de la relation du rendement du ressaut, en fonction du nombre de Froude F_1 en canal trapézoïdal, a montré que, c'est le canal triangulaire qui présente le plus grand intérêt du point de vue rendement.

L'effet du seuil sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique horizontale, ainsi que ses caractéristiques principales n'ont pas fait l'objet de travaux des chercheurs jusqu'à maintenant. Plus loin et à travers notre étude expérimentale, nous avons consacré notre travail sur l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal à section droite trapézoïdal.

Conclusion de la première partie

Cette première partie de notre étude a eu pour objectif de présenter à travers trois chapitres les travaux les plus importants dans le domaine du ressaut hydraulique.

Le premier chapitre a eu pour but d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Ce type de ressaut a fait la base théorique des études dans ce domaine. On a commencé par l'équation de base, démontrée par Bélanger (1828), cette dernière est obtenue par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut classique et, elle exprime la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique, et le facteur adimensionnel connu sous le nom du nombre de Froude F_1 . La détermination de la valeur du nombre de Froude F_1 de l'écoulement à l'amont du ressaut hydraulique, a permis à Bradley et Peterka (1957), de donner leurs classifications des différentes formes du ressaut.

A travers les études de Hager et al (1990), sur le ressaut hydraulique, les auteurs ont montré que l'estimation des caractéristiques géométriques du ressaut, telle que la longueur du ressaut L_j et la longueur L_r du rouleau ne s'effectuent que par voie expérimentale.

D'autres formes du ressaut, ont été abordées, à travers les travaux de Forster et Skrinde (1950), sur le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince et épaisse. Les auteurs ont montré que la variation des hauteurs relatives du seuil $S = s/h_1$ est en fonction du nombre de Froude F_1 , pour des différentes valeurs de x/h_2 données. C'est dans ce but qu'ils ont établi un diagramme de trois courbes, qui se rapprochent l'une à l'autre, lorsque les valeurs des hauteurs relatives s/h_2 augmentent.

La marche positive, est l'un des cas étudié par Forster et Skrinde (1950), et son influence sur le ressaut hydraulique. Ces chercheurs ont établi un diagramme qui sert à déterminer la longueur du bassin amortisseur.

Pour le ressaut forcé par seuil évoluant dans un canal rectangulaire, les travaux de Rand (1957) ont fait l'objet de notre étude bibliographique. L'auteur a élaboré une relation entre la hauteur du seuil et sa position et ce, pour faire la classification du ressaut forcé en 10 cas typiques. A la base des résultats expérimentaux Rand (1965), a représenté sur un diagramme la relation entre la hauteur conjuguée et la fonction $f(S, K)$, où K est le facteur de position.

Sur le même sujet, Bretz (1988), Hager et Bretz (1988), Hager et Sinniger (1989) et Hager et Li (1991), ont étudié l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique. Bretz (1988) a établi trois équations, qui relient le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut, le nombre de Froude F_1 et la hauteur relative du seuil. Ces résultats correspondent aux trois types de ressaut : ressaut type A, ressaut type B et ressaut type B-min. De même pour la longueur relative du bassin d'amortissement, l'auteur a

établi trois équations en fonction du nombre de Froude F_1 et ce, pour chaque type du ressaut hydraulique cité ci-dessus. Les courbes obtenues sont situées au-dessous de celles du ressaut classique. Ce fait indique la réduction nette de la longueur du ressaut forcé par rapport au ressaut classique dans l'intervalle des valeurs du nombre de Froude $5 \leq F_1 \leq 13$.

Le second chapitre de notre étude bibliographique, a permis de présenter l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire (compacité du ressaut), nous avons présenté l'étude de Debabeche (2003).

Cette étude se propose d'examiner, par la voie de l'expérimentation au laboratoire, l'influence d'un seuil sur les caractéristiques du ressaut hydraulique en canal de section droite symétrique rectangulaire.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer l'effet d'un seuil à paroi mince sur le profil d'un ressaut hydraulique dans un canal à section droite rectangulaire, et de trouver des relations empiriques exprimants 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, en fonction du nombre de Froude F_1 et du facteur de compacité γ défini comme le rapport de la longueur du rouleau L_{r*} et de la position x du seuil.

L'objectif du troisième chapitre de cette étude, consiste à faire le point sur les travaux principaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. La détermination des caractéristiques du ressaut, a été souvent l'objectif principal des travaux entrepris par Posey et Hsing (1938), Silvester (1964), Ohtsu (1976), et plus récemment ceux de Hager et Wanoschek (1989).

Le cas du canal trapézoïdal est le plus général : par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut, nous avons déterminé la relation des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 et nous avons déduit le cas du canal rectangulaire et triangulaire. La même chose pour la détermination du rendement du ressaut, mais, pour ce cas, l'application du théorème de Bernoulli est nécessaire. La représentation graphique de la relation du rendement obtenu, montre que c'est le canal triangulaire qui présente le plus grand intérêt du point de vue rendement.

Par ailleurs, la deuxième partie de notre mémoire, sera consacrée à notre contribution à l'étude expérimentale de l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

Deuxième Partie :
ETUDE EXPERIMENTALE

Introduction à la Deuxième Partie

L'étude bibliographique du ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale, a permis de montrer que le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident peut être exprimé en fonction du rapport $Y=h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut, du coefficient de forme du canal $M=mh_1/b$, et de la longueur relative $\lambda=L_j/h_1$ du ressaut, tel que : $F_1=f(Y,\lambda,M)$. La deuxième partie de notre étude sera, cependant, entièrement consacrée à notre propre contribution dans l'étude du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, en examinant l'influence du paramètre seuil sur les autres caractéristiques. L'étude sera abordée d'une manière expérimentale.

Dans le but d'organiser ce travail, nous avons divisé la partie de notre étude en deux chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à la description du modèle expérimental utilisé pour entamer l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal à angle d'inclinaisons des talus de 73° .
- Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude expérimentale afin de donner une description détaillée des essais, en passant à la fin à l'analyse des résultats expérimentaux.

Chapitre I :

DESCRIPTION DU MODELE

Chapitre I

Description du model expérimental

I.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 utilisés.

I.2. Description du canal

Le canal expérimental (figure 1.1) et (figure 1.2) est constitué d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure de section droite trapézoïdal symétrique d'angle d'inclinaison des talus de 73° , par une conduite de PVC circulaire de 115 mm de diamètre. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe (figure 1.3) qui alimente un convergent en charge débouchant dans le canal de mesure. Le canal de mesure de section trapézoïdal et de longueur 5 m est relié, dans sa partie d'aval, à un second canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale (figure 1.5), permettant la mesure directe du débit.

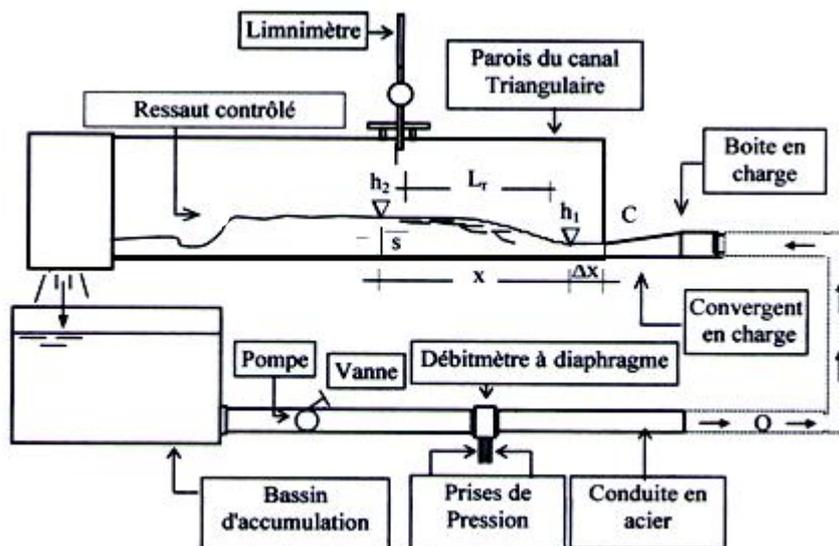


Figure 1.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal, ayant servi à l'expérimentation.



Figure 1.2: Photographie du model expérimentale du canal



Figure 1.3 : Pompe centrifuge axiale (pompe principale)



Figure 1.4 : Deuxième pompe (pompe de renforcement)



Figure 1.5 : Raccordement des pompes



Figure 1.6: Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit

Le canal trapézoïdal est relié, dans sa partie amont, à une boîte en charge (figure 1.7). Le rôle de ce convergent est de générer un écoulement incident à grande vitesse. La section de sortie du convergent est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale h_1 du ressaut



Figure 1.7 : Photographie d'une boîte en charge

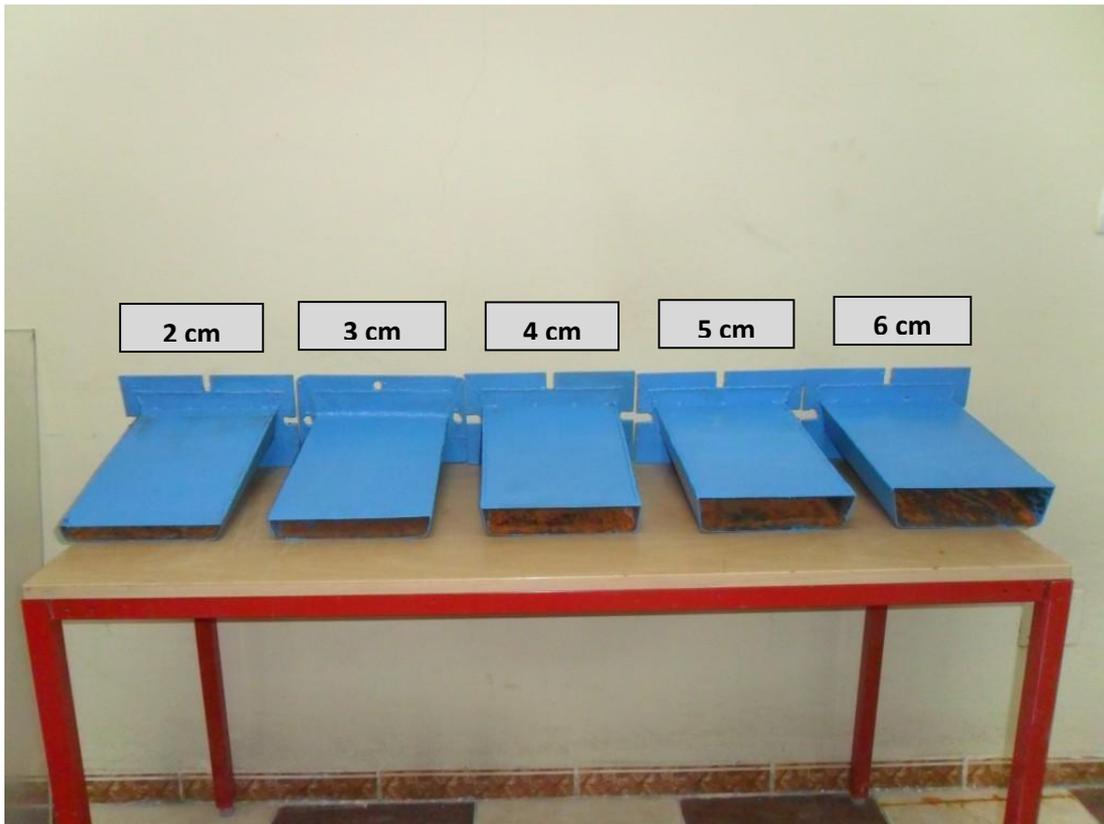


Figure 1.8 : Photographie d'une série de convergent.

Le débit volume Q ainsi que la profondeur h_2 sont les seules grandeurs qui nécessitent un appareillage spécifique. Mais la position x du seuil mince ainsi que sa hauteur géométrique s sont simplement mesurées à l'aide d'un ruban gradué et la hauteur initiale h_1 du ressaut est assimilée à l'ouverture du convergent en charge générant l'écoulement incident ($h_1 = 2 \text{ cm}$; 3 cm ; 4 cm ; 5 cm et 6 cm), après avoir positionné le pied du ressaut à environ $\Delta x \approx 5 \text{ cm}$. En mesure la profondeur h_2 à l'aide d'un limnimètre à vernier à double précision (figure 1.9). Les mesures de h_2 obtenues seront injectées plu tard dans la formule de Hachemi Rachedi L. (2006), pour le débitmètre à déversoir utilisé.

I.3. 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 1.8).

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.

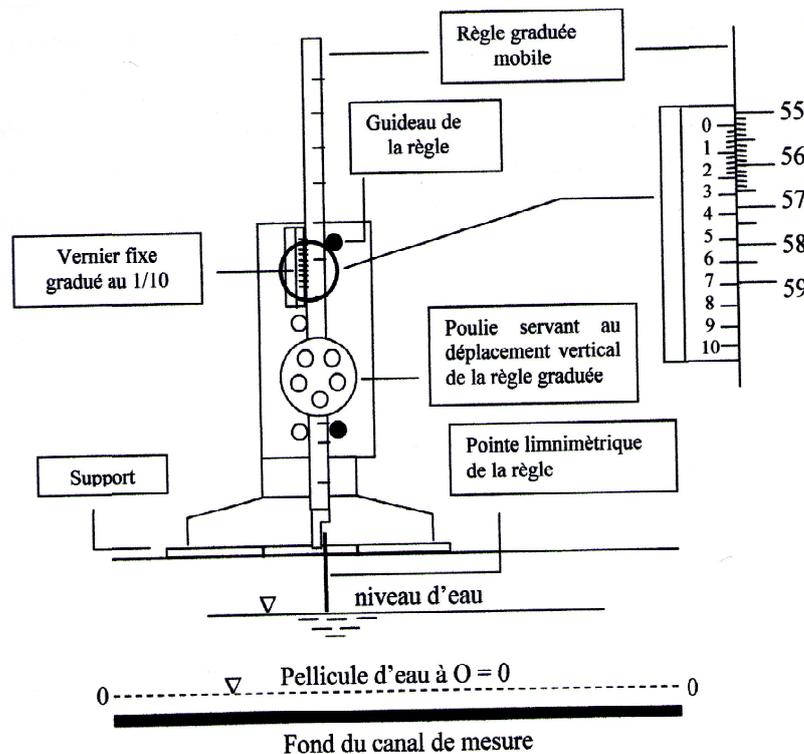


Figure 1.9: Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique

I.4. Les seuils minces

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

Dans le but d'obtenir un nombre important de points de mesures, nous avons préparé 18 seuils minces de différentes hauteurs (figure 1.10) :

$s = 5 \text{ cm} ; 6 \text{ cm} ; 7 \text{ cm} ; 8 \text{ cm} ; 9 \text{ cm} ; 10 \text{ cm} ; 11 \text{ cm} ; 12 \text{ cm} ; 13 \text{ cm} ; 14 \text{ cm} ; 15 \text{ cm} ; 16 \text{ cm} ; 17 \text{ cm} ; 18 \text{ cm} ; 19 \text{ cm} ; 20 \text{ cm} ; 21 \text{ cm}$ et 22 cm.



Figure 1.10 : Photographie des seuils minces testés



Figure 1.11 : Support du seuil

I.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 droite trapézoïdal, muni d'un seuil mince. Dans ce chapitre nous avons abordé les appareils de mesure utilisés dans ce travail de laboratoire nous les avons illustré par des photographies, dans le but de prendre toutes les mesures nécessaires quant aux 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 Hachemi Rachedi L. (2006) vu sont efficacité et nous avons abouti à des résultats acceptables, vus les incertitudes commises sur les lectures de h_2 à cause de l'instabilité du plan d'eau.

La fixation des seuils minces sur le fond du canal trapézoïdal, est assurée par le support du seuil (figure : 1.11)

Chapitre II

ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre II

Etude Expérimentale

II.1. Introduction

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince dans un canal trapézoïdal à angle d'inclinaison des talus de 73° .

L'expérimentation a été menée sous quatre hauteurs initiales de l'écoulement : h_1 (cm) = 2; 3; 4; 5. Une large gamme du nombre de Froude incident a été ainsi obtenue, correspondant à $3,11 < F_1 < 15,72$.

La formation du ressaut contrôlé est conditionnée par la mise en place d'un seuil à l'aval de l'écoulement. A cet effet, des seuils de différentes hauteurs ont été utilisés.

Ce chapitre a nécessité deux sous chapitre : le premier concernera la description des essais et le second se préoccupera de l'analyse des résultats expérimentaux.

II.2. Effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

II.2.1. Position du problème

Nous avons montré dans l'étude bibliographique, que lorsque le ressaut contrôlé est entièrement formé sur le radier du bassin amortisseur correspondant à une hauteur géométrique s du seuil et une longueur x de bassin (figure 2.1), le déplacement du seuil vers l'aval ne modifie en rien la configuration du ressaut, ce qui revient à dire que la longueur L_j du ressaut est pratiquement assimilable à la position x du seuil.

Par contre le déplacement du seuil vers l'amont ($L_j/x > 1$) provoque la compacité du ressaut et conduit à plusieurs configurations de celui-ci.

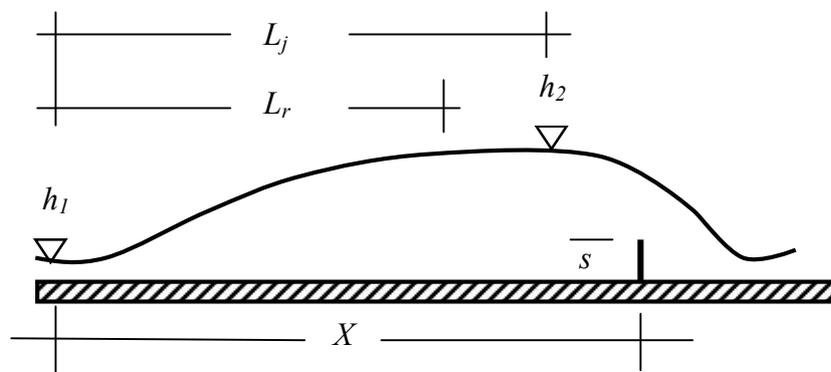


Figure 2.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince

L'objectif principal de ce travail est de déterminer l'effet d'un seuil à paroi mince sur le profil d'un ressaut hydraulique dans un canal à section droite trapézoïdale, et de trouver des relations empiriques 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, en fonction du nombre de Froude F_1 et du facteur de compacité γ défini comme le rapport de la longueur du rouleau L_{r^*} et de la position x du seuil.

II.2.2. Description des essais

Un échantillon constitué de plus de 106 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 , la hauteur du seuil s et la position x du seuil par rapport au pied du ressaut. Ceux-ci permettent de composer les produits adimensionnels suivants : le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, le rapport $Y = h_2/h_1$ du seuil et le rapport de compacité $\gamma = L_{r^*}/x$, L_{r^*} étant la longueur du rouleau du ressaut classique. Le nombre de Froude F_1 est tel que :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1 + mh_1^2)^3} \quad (2.1)$$

Ces produits adimensionnels peuvent être liés par les relations fonctionnelles :

$$f_1(F_1, S, \gamma) = 0 \quad \text{et} \quad f_2(F_1, Y, \gamma) = 0$$

L'un des objectifs visés par la présente partie de notre étude est de définir, par la voie de l'expérimentation au laboratoire, les relations fonctionnelles f_1 et f_2 . Ceci permettra en outre d'évaluer le rapport γ de compacité du ressaut, connaissant l'un des deux couples de valeurs (F_1, S) ou (F_1, Y) .

Pour chaque couple de valeurs (h_1, Q) , le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident est calculé en application de la relation $F_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1 + mh_1^2)^3}$. En fait, chaque série d'essais a été exécutée pour une ouverture donnée (a_0, h_1) et sous des débits volumes différents, tout en maintenant la longueur Δx environ égale à 5 cm. Ainsi, pour h_1 et x fixés, différents profils du ressaut sont obtenus à débit croissant correspondant chacun à une valeur donnée de la hauteur s du seuil.

Ainsi lorsque nous obtenons une configuration du ressaut contrôlé (figure 2.1), nous effectuons, pour une hauteur initiale h_1 et une position x de seuil fixées, les opérations suivantes :

1. Lecture de la hauteur déversante h_{div} du déversoir rectangulaire.
2. Calcul du débit volume correspondant, par application de la relation du débitmètre rectangulaire:

$$Q = 0.794B\sqrt{2g}\beta(1 + 0.16496\beta^{2.0716})^{3/2}h_{dev}^{3/2} \quad (2.2)$$

Avec : $\beta = b/B$.

Q : le débit en (m³/s).

B : la largeur du canal en (m).

G : l'accélération de la pesanteur (m³/s²).

β : rapport de forme.

b : Largeur de l'échancrure en (m).

h_{dev} : La hauteur de la lame déversante en (m).

La condition d'application de cette relation est satisfaite car : $\beta = b/B = 0,24/0,60 = 0,4 < 0,45$.

3. Calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par application de la relation :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1 + mh_1^2)^3}$$

4. Mesure de la longueur x de la position du seuil.

La connaissance des valeurs de Lr^* et de x permettent la détermination du rapport γ de compacité du ressaut, celui-ci étant égal à Lr^*/x .

5. Mesure de la hauteur géométrique s du seuil.

6. Mesure de la hauteur finale h_2 du ressaut.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, le déplacement du seuil vers l'amont provoque la compacité du ressaut et conduit à plusieurs configurations de celui-ci. Les différentes configurations du ressaut peuvent être également obtenues, à débit croissant, par la fixation de la hauteur s de seuil ce qui engendre une diminution progressive de la distance x entre le pied du ressaut et la position du seuil. Cette diminution est suivie d'une légère augmentation de la hauteur initiale h_1 . Cette dernière n'est significative que pour des distances Δx relativement importantes.

Cinq (05) intervalles de rapports γ de compacité, couvrant toute la gamme de points de mesures expérimentales, ont été analysés, correspondant chacun à une configuration intermédiaire du ressaut contrôlé.

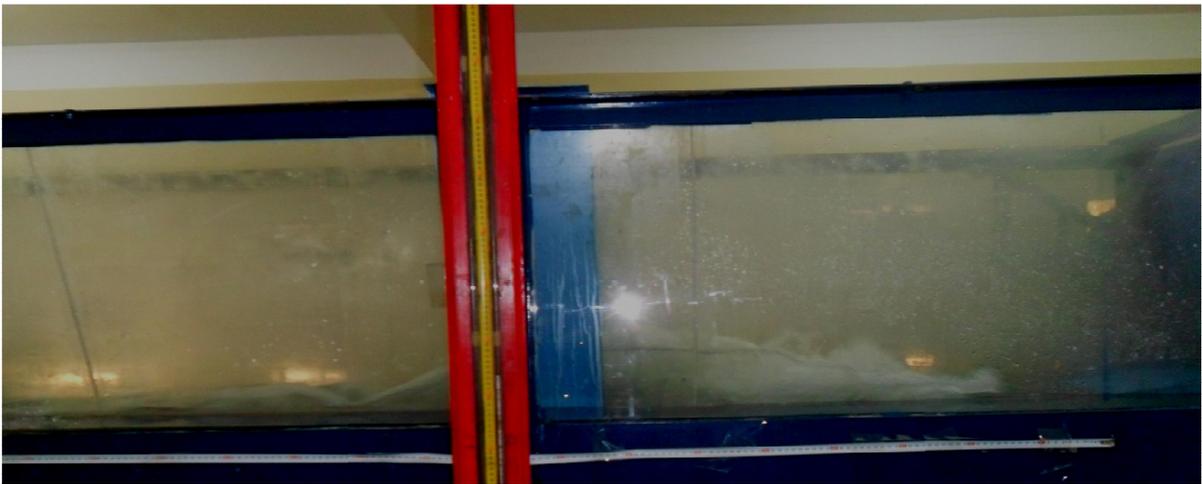
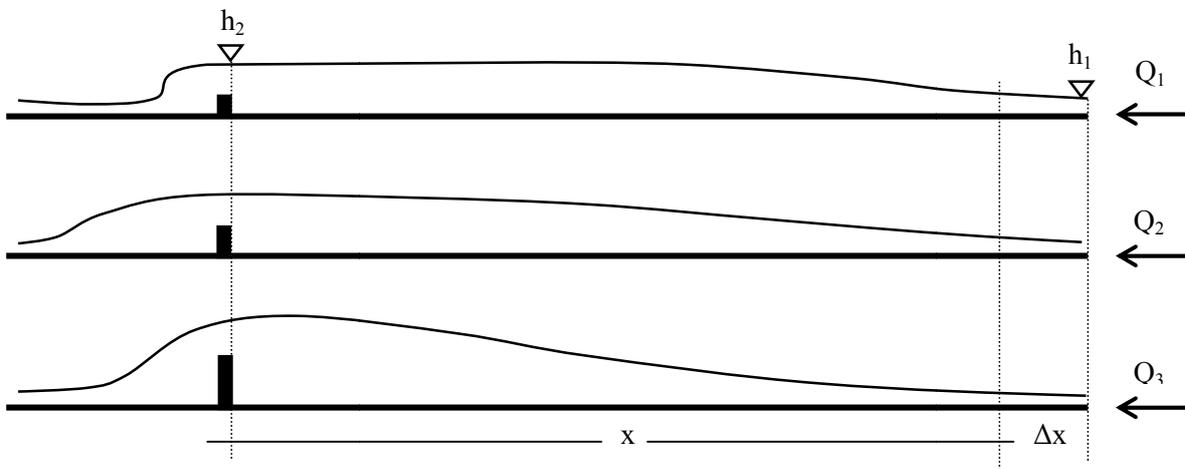
$\gamma \leq 0,9$; $0,91 \leq \gamma \leq 1,01$; $1,02 \leq \gamma \leq 1,12$; $1,13 \leq \gamma \leq 1,23$; $1,24 \leq \gamma \leq 1,34$; $1,35 \leq \gamma \leq 1,45$.

Chaque classe de mesures est représentée par son centre comme l'indique le tableau 2.1 :

Tableau 2.1 : Centres des classes de valeurs du rapport de compacité.

Classe	$\leq 0,9$	0,91 – 1,01	1,02 – 1,12	1,13 – 1,23	1,24 – 1,34	1,35 – 1,45
Centre	-	0,96	1,07	1,18	1,29	1,4

Les valeurs de γ inférieures ou égales à 0,9 correspondent en fait à la configuration du ressaut classique.
 La figure 2.2 représente quatre configurations différentes du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite trapézoïdale, obtenues à débit croissant pour une position x de seuil et une hauteur initiale h_1 fixées.



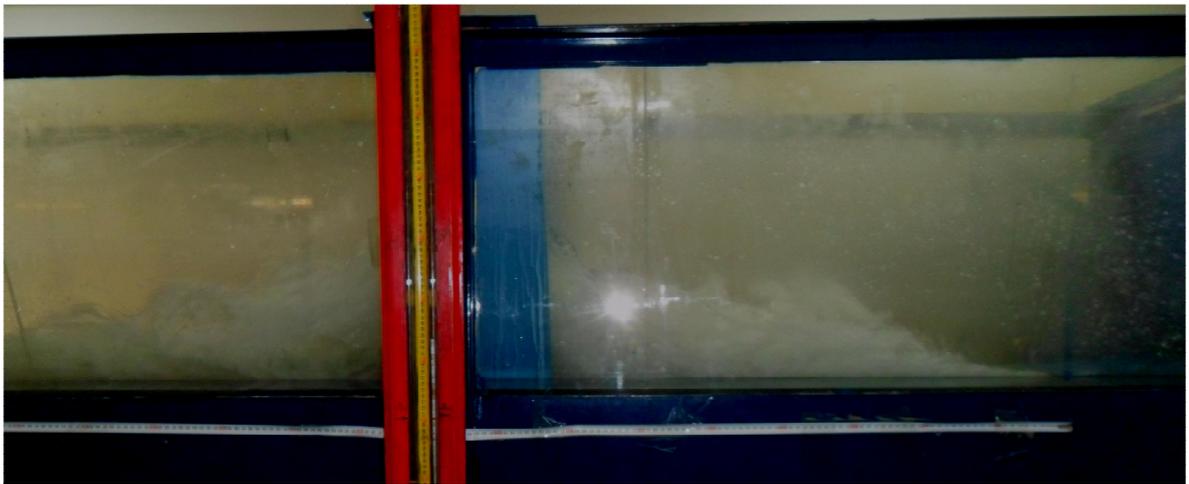
$IF_1 = 6,08, s = 10 \text{ cm}, h_2 = 19,5 \text{ cm}, \gamma \approx 0,97$



$IF_1 = 6,22, s = 11 \text{ cm}, h_2 = 21,7 \text{ cm}, \gamma \approx 1$



$$IF_1 = 6,71, s = 12 \text{ cm}, h_2 = 23,5 \text{ cm}, \gamma \approx 1,09$$



$$IF_1 = 7,21, s = 13 \text{ cm}, h_2 = 24,2 \text{ cm}, \gamma \approx 1,18$$

Figure 2.2 : Différentes configurations du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince, obtenues à débit croissant pour une position de seuil $x = 82 \text{ cm}$, une hauteur initiale $h_1 = 2 \text{ cm}$ et $\Delta x \approx 5 \text{ cm}$

II.2.3. Résultats expérimentaux

II.2.3.1. Variation de la longueur relative Lr^*/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F_1

La longueur Lr^* est considérée comme étant la distance séparant la section initiale et la section finale du rouleau de surface, pour le cas d'une configuration d'un ressaut classique.

La figure 2.3 montre la variation de la longueur relative Lr^*/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

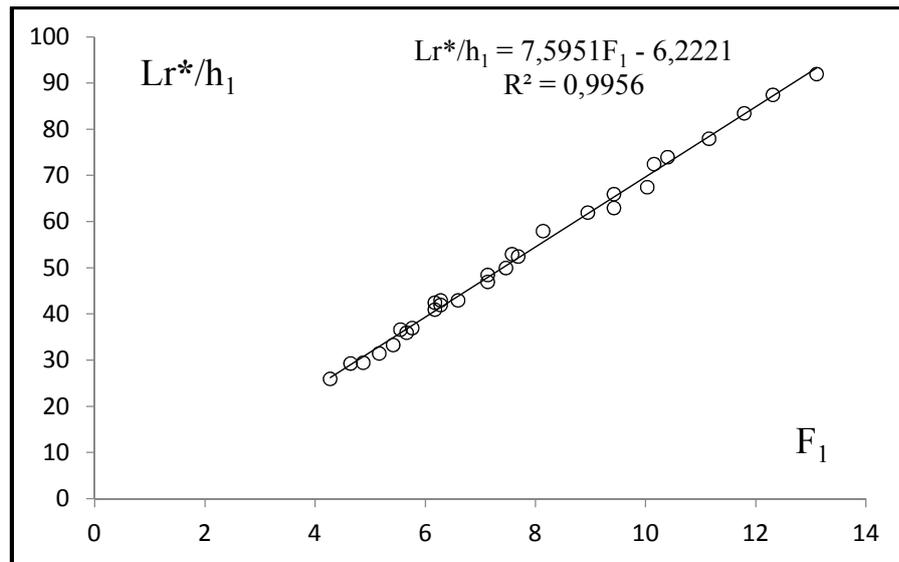


Figure 2.3 : Variation de la longueur relative Lr^*/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident

La figure 2.3 montre que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident, engendre celle de la longueur relative du rouleau. Par ailleurs, l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir également à une relation linéaire d'équation :

$$Lr^*/h_1 = (7,60.F_1 - 6,22) \quad (2.3)$$

$$\text{Pour } 3,11 < F_1 < 15,72$$

$$0,03 \leq M \leq 0,06$$

Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Lr^*/h_1 = f(F_1)$, sont consignées dans le tableau 2.2 :

Pour calculer les valeurs de la longueur de rouleau correspondant à la configuration d'un ressaut classique on applique la relation 2.3.

Tableau 2.2 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure 2.3

F_1	Lr^*/h_1	F_1	Lr^*/h_1	F_1	Lr^*/h_1	F_1	Lr^*/h_1
4,27	26,00	6,17	41,00	7,57	53,00	10,39	74,00
4,64	29,33	6,17	42,50	7,68	52,50	11,15	78,00
4,87	29,50	6,28	43,00	8,14	58,00	11,79	83,50
5,16	31,50	6,28	42,00	8,95	62,00	12,31	87,50
5,41	33,33	6,59	43,00	9,42	63,00	13,10	92,00
5,55	36,67	7,13	47,00	9,42	66,00		
5,66	36,00	7,13	48,50	10,03	67,50		
5,76	37,00	7,46	50,00	10,15	72,50		

II.2.3.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma \leq 0,9$

Comme nous l'avons montré au chapitre précédent, pour une large gamme des nombres de Froude allant de 3,11 à 15,72, la mise en place d'un seuil mince à l'aval du bassin, à une distance x du seuil supérieur à la longueur Lr du rouleau, correspondant à un rapport de compacité $\gamma \leq 0,9$, n'a pratiquement aucune influence sur le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut classique.

Afin de mettre en évidence cette influence, on s'intéresse aux configurations du ressaut contrôlé relatives aux rapports de compacité $\gamma > 0,9$.

II.2.3.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma > 0,9$

La figure 2.4 représente les points de mesures expérimentales et leurs ajustements. Les points de mesures expérimentales s'éloignent de la courbe théorique du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$), au fur et mesure que le rapport de compacité γ augmente. Cet éloignement commence à se faire remarquer à partir de $\gamma \geq 0,96$.

Par ailleurs, pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $Y = aF_1$.

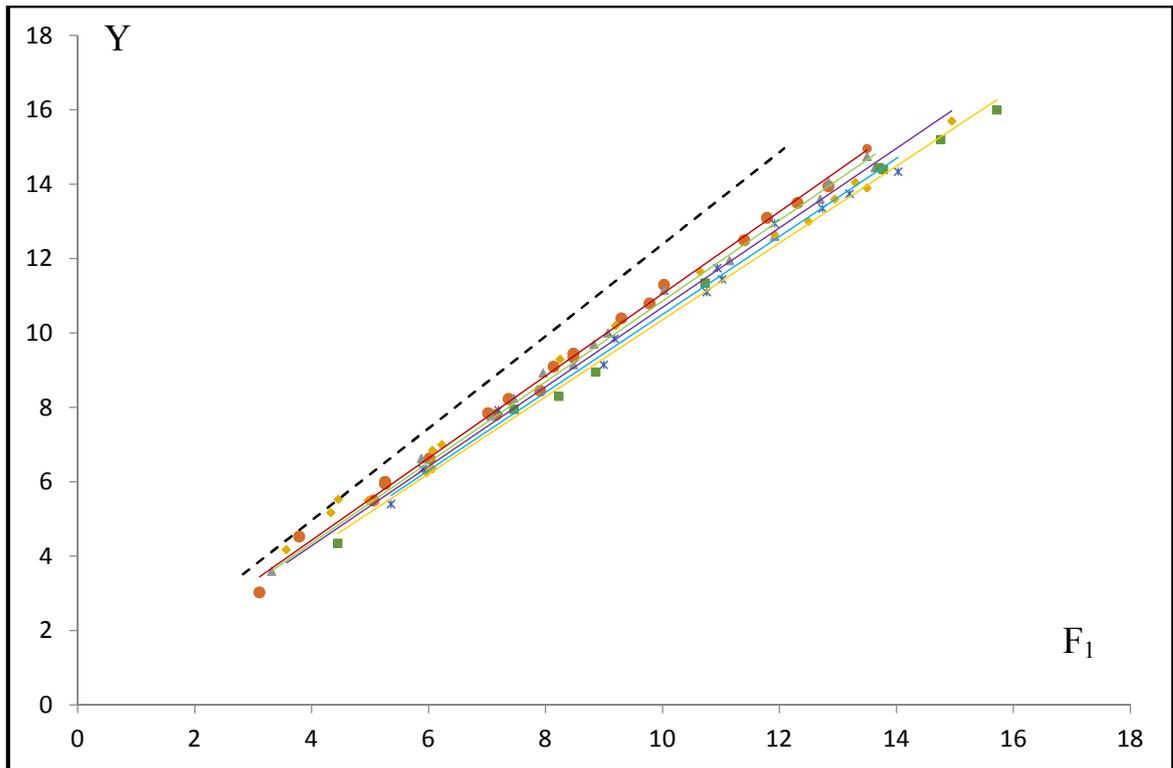


Figure 2.4 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ : (●) 0,96 ; (■) 1,07 ; (▲) 1,18 ; (*) 1,29 ; (■) 1,40. (---) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$). (—) Courbes d'ajustement.

La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que la relation $Y = f(F_1)$ est linéaire pour chaque configuration du ressaut.

Par ailleurs, pour une valeur donnée du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(F_1)$ pour chaque valeur de γ , sont consignées dans le tableau 2.3 :

Tableau 2.3 : Valeurs expérimentales des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince pour des rapports γ de compacité du ressaut et des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

$\gamma = L_r^*/x$	$Y = h_2/h_1$	F_1	$\gamma = L_r^*/x$	$Y = h_2/h_1$	F_1	$\gamma = L_r^*/x$	$Y = h_2/h_1$	F_1
0,90	12,50	11,40	1,04	11,15	10,03	1,21	13,90	13,50
0,91	8,45	7,91	1,06	12,60	11,92	1,21	4,18	3,57
0,91	7,80	7,15	1,06	10,00	9,07	1,23	11,65	10,65
0,92	13,95	12,84	1,06	8,25	7,46	1,25	11,75	10,94
0,92	10,40	9,30	1,06	7,77	7,07	1,25	11,10	10,76
0,93	9,10	8,14	1,07	6,63	5,88	1,25	9,15	9,00
0,93	5,50	5,06	1,08	14,75	13,50	1,25	12,95	11,92
0,94	13,10	11,79	1,08	9,15	8,48	1,26	13,35	12,74
0,94	8,23	7,37	1,10	3,60	3,32	1,28	14,34	14,03
0,97	14,95	13,50	1,12	11,95	11,15	1,30	11,45	11,02
0,97	9,45	8,48	1,13	6,25	5,97	1,30	5,40	5,36
0,97	10,80	9,78	1,14	13,60	12,70	1,30	7,93	7,20
0,98	6,00	5,26	1,14	13,60	12,95	1,31	6,35	5,90
0,98	5,95	5,26	1,15	13,00	12,50	1,32	13,75	13,20
0,98	13,50	12,31	1,15	14,05	13,30	1,34	9,85	9,18
0,98	4,53	3,79	1,15	7,00	6,23	1,35	14,45	13,70
0,98	14,45	13,64	1,16	6,35	6,07	1,37	7,95	7,46
0,99	9,35	8,48	1,16	6,85	6,07	1,37	11,35	10,73
0,99	7,85	7,02	1,16	5,17	4,33	1,40	8,30	8,23
1,00	11,30	10,03	1,17	10,20	9,20	1,41	8,95	8,86
1,00	6,63	6,02	1,19	9,30	8,25	1,41	4,35	4,45
1,01	3,03	3,11	1,19	5,50	4,97	1,42	16,00	15,72
1,02	8,93	7,96	1,20	15,70	14,95	1,43	14,40	13,78
1,03	9,70	8,83	1,20	12,65	11,92	1,44	15,20	14,76
1,03	14,05	12,84	1,20	5,53	4,46			

Le tableau 2.4 regroupe les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées au nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour différents rapports de compacité :

Tableau 2.4 : Coefficients des relations expérimentales issues de l'ajustement de la relation liant Y au nombre de Froude F_1 pour différents rapport γ de compacité.

Intervalles des rapports de compacité	Rapports moyens γ de compacité	Equations des droites	Coefficients a	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,01$	0,96	$Y = 1.10F_1$	1.10	0.997
$1,02 \leq \gamma \leq 1,12$	1,07	$Y = 1.08F_1$	1.08	0.996
$1,13 \leq \gamma \leq 1,23$	1,18	$Y = 1.07F_1$	1.07	0.990
$1,24 \leq \gamma \leq 1,34$	1,29	$Y = 1.05F_1$	1.05	0.991
$1,35 \leq \gamma \leq 1,45$	1,40	$Y = 1.03F_1$	1.03	0.997

Le tableau 2.4 montre que la pente à des droites diminue progressivement d'une configuration à l'autre avec un pas quasi-constant.

Ces constatations montrent la possibilité de l'existence d'une relation unique rassemblant cinq (05) configurations intermédiaires de ressaut contrôlé, liant le rapport Y des hauteurs conjuguées au nombre de Froude F_1 et au rapport γ de compacité du ressaut.

La (figure 2.5) nous montrent que les points expérimentaux s'ajustent au tour d'une courbe de puissance de la forme :

$$a = 1,096 \gamma^{-0,16} \quad (2.4)$$

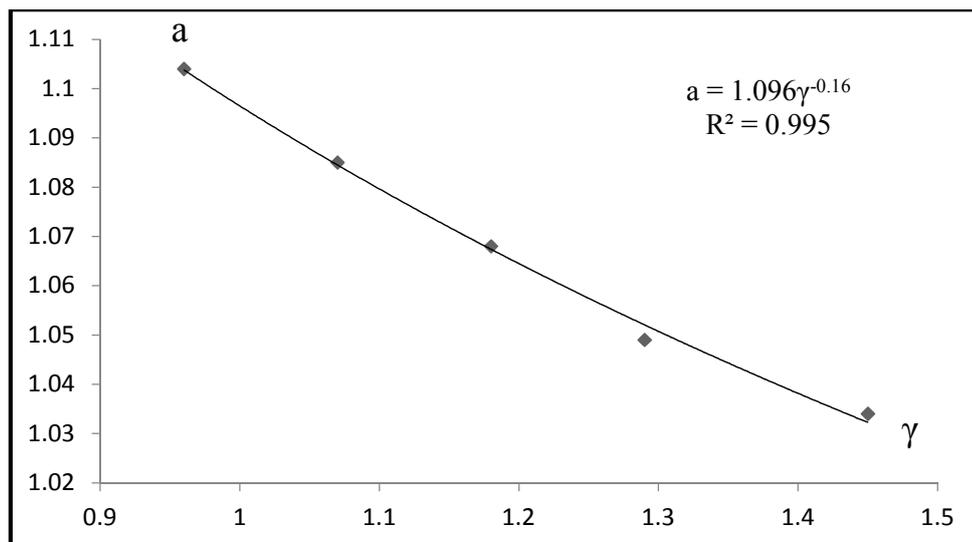


Figure 2.5 : Variation du coefficient b en fonction du rapport γ de Compacité. (—) courbe d'ajustement.

Une relation unique de la forme $Y = \phi (F_1, \gamma)$ est alors proposée, permettant de déterminer le rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident pour toutes les configurations du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal rectangulaire. Celle-ci s'écrit comme suit :

$$Y = 1,10.\gamma^{-0,16}.F_1 \quad (2.5)$$

Pour une gamme du nombre de Froude: $3,11 \leq F_1 \leq 15,72$

Un rapport de forme $M = (mh_1)/b$ pour le canal trapézoïdal: $0,03 \leq M \leq 0,06$

Et des valeurs du rapport de compacité : $0,91 \leq \gamma \leq 1,45$

La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure 2.6.

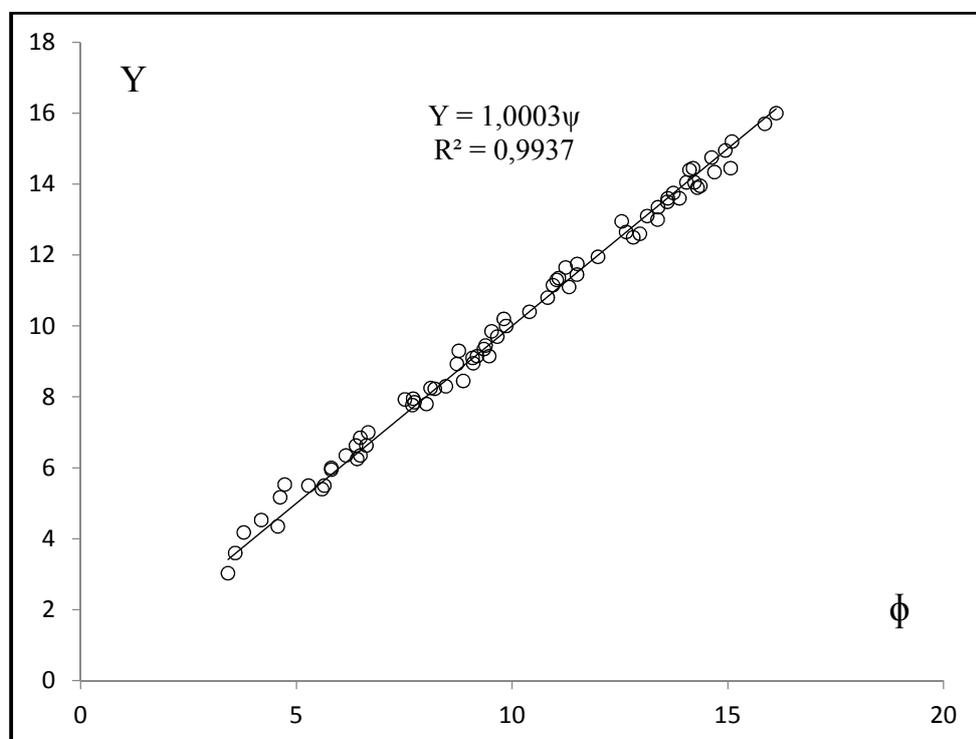


Figure 2.6: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de $(1,10.\gamma^{-0,16})$.

(o) points expérimentaux. (—) droite d'équation : $h_2/h_1 = 1,10.\gamma^{-0,16}.F_1$

L'erreur ΔY entre les résultats expérimentaux du rapport $Y = h_2/h_1$ et la fonction ϕ est donné par le tableau 2.5 :

Tableau 2.5 : Erreur relative entre la relation ϕ et les valeurs expérimentaux du rapport des hauteurs conjuguées Y

$\gamma = L_r^*/X$	$Y = h_2/h_1$	F_1	ϕ	$\% \Delta Y = (\phi - Y)/\phi$	$\gamma = L_r^*/X$	$Y = h_2/h_1$	F_1	ϕ	$\% \Delta Y = (\phi - Y)/\phi$
0,90	12,50	11,40	12,81	2,46	1,14	13,60	12,95	13,88	2,03
0,91	8,45	7,91	8,87	4,93	1,15	13,00	12,50	13,37	2,85
0,91	7,80	7,15	8,01	2,75	1,15	14,05	13,30	14,23	1,26
0,92	13,95	12,84	14,36	2,95	1,15	7,00	6,23	6,66	4,80
0,92	10,40	9,30	10,40	0,02	1,16	6,35	6,07	6,48	2,07
0,93	9,10	8,14	9,08	0,17	1,16	6,85	6,07	6,48	5,38
0,93	5,50	5,06	5,65	2,68	1,16	5,17	4,33	4,62	10,57
0,94	13,10	11,79	13,13	0,23	1,17	10,20	9,20	9,81	3,85
0,94	8,23	7,37	8,21	0,27	1,19	9,30	8,25	8,76	5,76
0,97	14,95	13,50	14,94	0,06	1,19	5,50	4,97	5,28	4,00
0,97	9,45	8,48	9,38	0,69	1,20	15,70	14,95	15,86	0,99
0,97	10,80	9,78	10,82	0,22	1,20	12,65	11,92	12,64	0,06
0,98	6,00	5,26	5,81	3,18	1,20	5,53	4,46	4,73	14,46
0,98	5,95	5,26	5,81	2,36	1,21	13,90	13,50	14,29	2,84
0,98	13,50	12,31	13,60	0,71	1,21	4,18	3,57	3,78	9,57
0,98	4,53	3,79	4,19	7,60	1,23	11,65	10,65	11,24	3,52
0,98	14,45	13,64	15,06	4,25	1,25	11,75	10,94	11,51	2,05
0,99	9,35	8,48	9,35	0,03	1,25	11,10	10,76	11,32	1,98
0,99	7,85	7,02	7,74	1,43	1,25	9,15	9,00	9,47	3,47
1,00	11,30	10,03	11,03	2,36	1,25	12,95	11,92	12,54	3,17
1,00	6,63	6,02	6,62	0,12	1,26	13,35	12,74	13,38	0,23
1,01	3,03	3,11	3,41	12,68	1,28	14,34	14,03	14,69	2,44
1,02	8,93	7,96	8,72	2,34	1,30	11,45	11,02	11,50	0,46
1,03	9,70	8,83	9,66	0,46	1,30	5,40	5,36	5,59	3,60
1,03	14,05	12,84	14,04	0,07	1,30	7,93	7,20	7,52	5,23
1,04	11,15	10,03	10,95	1,82	1,31	6,35	5,90	6,15	3,17
1,06	12,60	11,92	12,96	2,86	1,32	13,75	13,20	13,74	0,10

Tableau 2.5 (suite et fin) : Erreur relative entre la relation ϕ et les valeurs expérimentaux du rapport des hauteurs conjuguées Y

$\gamma = L_r^*/x$	$Y = h_2/h_1$	F_1	ϕ	$\% \Delta Y = (\phi - Y)/\phi$	$\gamma = L_r^*/x$	$Y = h_2/h_1$	F_1	ϕ	$\% \Delta Y = (\phi - Y)/\phi$
1,06	10,00	9,07	9,86	1,39	1,34	9,85	9,18	9,52	3,31
1,06	8,25	7,46	8,11	1,69	1,35	14,45	13,70	14,19	1,78
1,06	7,77	7,07	7,69	1,07	1,37	7,95	7,46	7,71	3,08
1,07	6,63	5,88	6,38	3,75	1,37	11,35	10,73	11,08	2,35
1,08	14,75	13,50	14,62	0,86	1,40	8,30	8,23	8,46	1,97
1,08	9,15	8,48	9,19	0,39	1,41	8,95	8,86	9,10	1,66
1,10	3,60	3,32	3,58	0,47	1,41	4,35	4,45	4,57	5,06
1,12	11,95	11,15	11,99	0,34	1,42	16,00	15,72	16,12	0,76
1,13	6,25	5,97	6,41	2,53	1,43	14,40	13,78	14,11	2,00
1,14	13,60	12,70	13,61	0,06	1,44	15,20	14,76	15,09	0,70

Le tableau 2.5 montre que 88% des erreurs sont $\leq 5\%$.

II.2.3.4. Hauteur relative du seuil

La figure 2.7 montre la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

Les points de mesures expérimentales de la figure 2.7 sont regroupés dans le tableau 2.7 :

La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que la relation $S = f(F_1)$ est linéaire pour chaque configuration du ressaut.

Par ailleurs, pour une valeur donnée du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Pour chaque rapport de compacité γ , les points de mesures expérimentales s'ajustent, par la méthode des moindres carrés, autour d'une droite d'équation $S = aF_1 - b$.

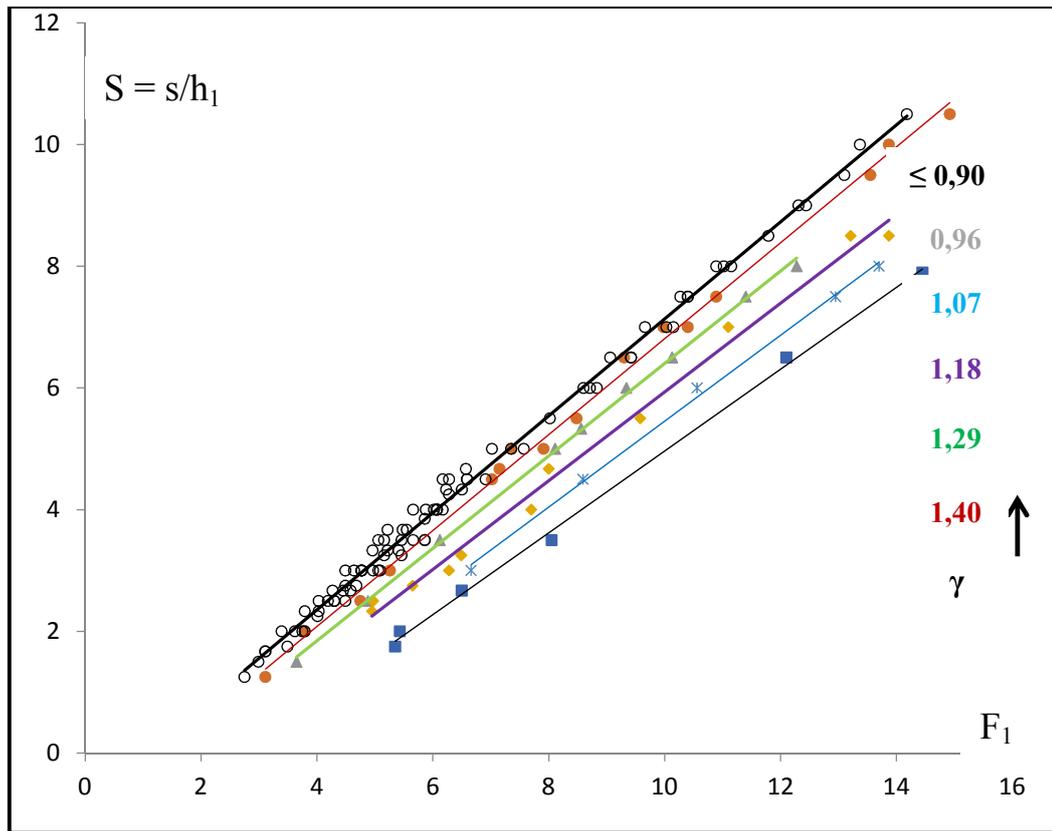


Figure 2.7 : Variation de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ : (■) 0,96 ; (*) 1,07 ; (■) 1,18 ; (▲) 1,29 ; (●) 1,40. (○) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$)

Le tableau 2.6 regroupe les différents coefficients des courbes d'ajustement des relations expérimentales, liant la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil au nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour différents rapports γ de compacité :

Tableau 2.6 : Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant S au nombre de Froude F_1 pour différents γ de compacité.

Intervalle des rapports de compacité	Rapports moyens γ de compacité	Coefficients a	Coefficients b	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,01$	0,96	0,79	1,07	0,997
$1,02 \leq \gamma \leq 1,12$	1,07	0,76	1,19	0,999
$1,13 \leq \gamma \leq 1,23$	1,18	0,73	1,36	0,992
$1,24 \leq \gamma \leq 1,34$	1,29	0,71	1,61	0,998
$1,35 \leq \gamma \leq 1,45$	1,40	0,67	1,76	0,998

La figure 2.8 montre la variation du coefficient a en fonction du rapport γ de compacité.

Le coefficient a varié en fonction du rapport de compacité γ , suivant une droite d'équation :

$$a = 1,04 - 0,26\gamma \quad \text{pour } 0,91 \leq \gamma \leq 1,45 \quad (2.6)$$

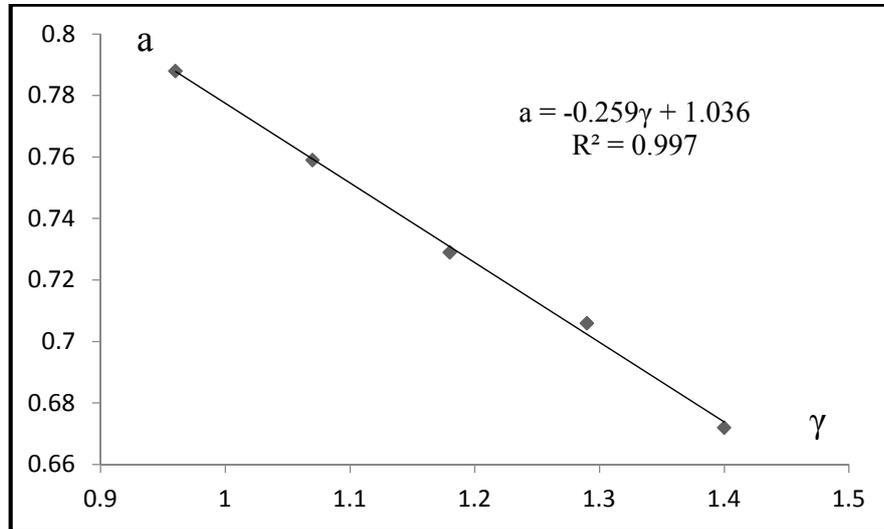


Figure 2.8 : Variation du coefficient a en fonction du rapport γ de compacité. (—) courbe d'ajustement

La figure 2.9 montre la variation du coefficient b en fonction du rapport γ de compacité.

Le coefficient b varie en fonction du rapport de compacité γ , suivant une droite d'équation :

$$b = 1,63\gamma - 0,52 \quad \text{pour } 0,91 \leq \gamma \leq 1,45 \quad (2.7)$$

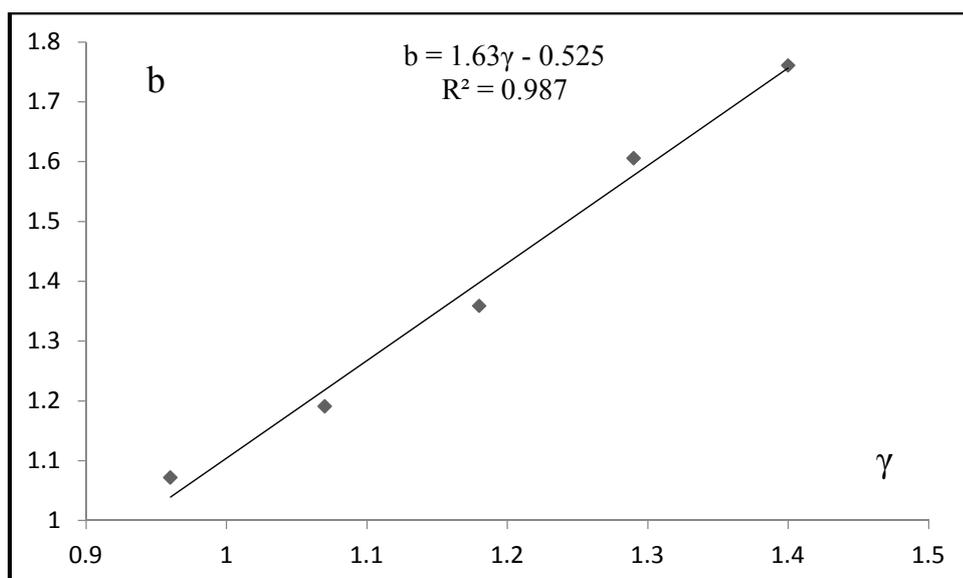


Figure 2.9: Variation du coefficient b en fonction du rapport γ de compacité. (—) courbe d'ajustement

La relation linéaire traduisant la variation de s/h_1 en fonction de F_1 et du rapport γ de compacité, est la suivante :

$$S = s/h_1 = (1,04 - 0,26\gamma).F_1 + 0,525 - 1,63.\gamma \quad (2.8)$$

Pour une gamme du nombre de Froude: $3,11 \leq F_1 \leq 15,72$

Un rapport de forme $M = (mh_1)/b$ pour le canal trapézoïdal: $0,03 \leq M \leq 0,06$

Et des valeurs du rapport de compacité : $0,91 \leq \gamma \leq 1,45$.

Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $S = f(F_1)$ pour chaque valeur de γ , sont consignées dans le tableau 2.7 :

Tableau 2.7: Valeurs expérimentales des hauteurs relatives s/h_1 du seuil du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince pour des rapports γ de compacité du ressaut et des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

$\gamma = L_r^*/x$	$S = s/h_1$	F_1	$\gamma = L_r^*/x$	$S = s/h_1$	F_1	$\gamma = L_r^*/x$	$S = s/h_1$	F_1
0,91	7,00	10,40	1,02	5,33	8,56	1,19	5,50	9,58
0,91	5,00	7,91	1,03	6,00	9,34	1,19	2,50	4,97
0,91	4,67	7,15	1,05	2,50	4,88	1,20	8,50	13,87
0,92	6,50	9,30	1,05	7,50	11,40	1,23	3,25	6,49
0,93	2,50	4,75	1,06	6,50	10,13	1,25	7,50	12,95
0,94	9,50	13,55	1,06	5,00	8,11	1,27	4,50	8,59
0,94	5,00	7,36	1,07	3,50	6,12	1,30	8,00	13,70
0,96	10,00	13,87	1,10	1,50	3,65	1,30	3,00	6,66
0,96	7,50	10,89	1,12	8,00	12,28	1,34	6,00	10,56
0,97	7,00	9,98	1,13	4,00	7,70	1,35	3,50	8,20
0,98	3,00	5,26	1,14	8,50	13,21	1,35	1,75	5,35
0,98	2,00	3,79	1,16	2,75	5,65	1,38	7,90	14,45
0,99	5,50	8,48	1,16	2,33	4,95	1,41	6,50	12,10
0,99	4,50	7,02	1,17	7,00	11,10	1,42	2,00	5,43
1,00	10,50	14,92	1,18	3,00	6,28	1,45	2,67	6,50
1,01	1,25	3,11	1,18	4,67	8,00			

La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure 2.10.

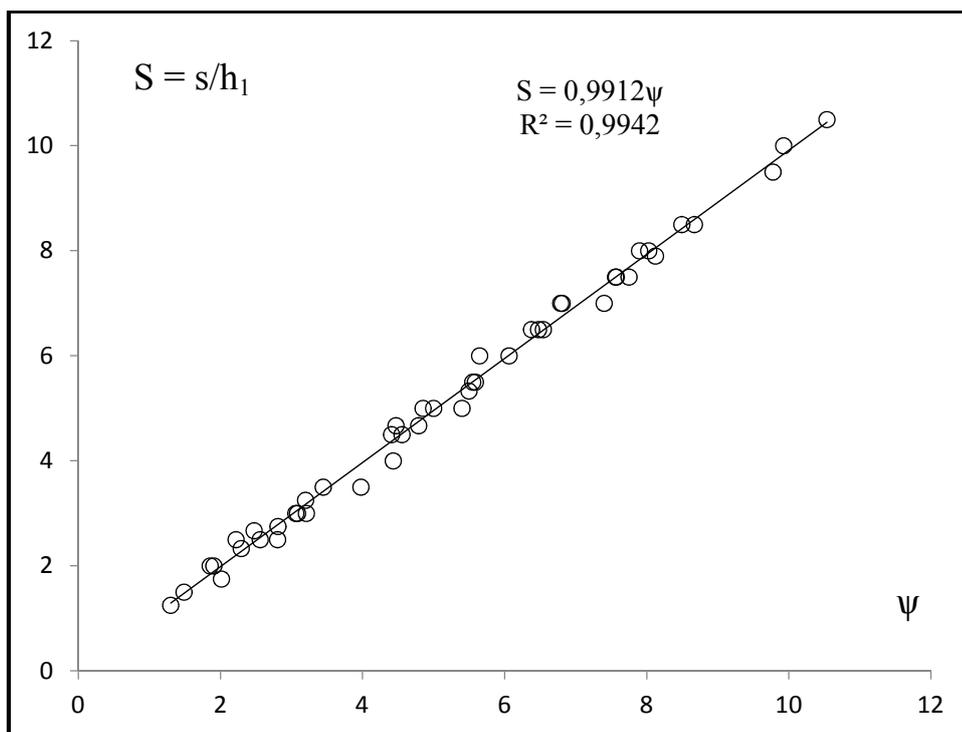


Figure 2.10: Variation des hauteurs relatives $S=s/h_1$ du seuil en fonction de $(1,04 - 0,26\gamma).F_1 + 0,525 - 1,63.\gamma$. (o) points expérimentaux. (—) droite d'équation : $s/h_1 = (1,04 - 0,26\gamma).F_1 + 0,525 - 1,63.\gamma$

L'erreur ΔS entre les résultats expérimentaux du rapport $S = s/h_1$ et la fonction ψ est donné par le tableau suivant :

Tableau 2.8 : Erreur relative entre la relation ψ et les valeurs expérimentaux des hauteurs relatives du seuil.

$\gamma = L_r^*/x$	$S = s/h_1$	F_1	ψ	$\% \Delta S = (\psi - S)/\psi$	$\gamma = L_r^*/x$	$S = s/h_1$	F_1	ψ	$\% \Delta S = (\psi - S)/\psi$
0,91	7,00	10,40	7,37	5,32	1,12	8,00	12,28	7,87	1,64
0,91	5,00	7,91	5,38	7,56	1,13	4,00	7,70	4,41	10,33
0,91	4,67	7,15	4,77	2,13	1,14	8,50	13,21	8,46	0,44
0,92	6,50	9,30	6,45	0,75	1,16	2,75	5,65	2,80	1,65
0,93	2,50	4,75	2,79	11,59	1,16	2,33	4,95	2,28	2,14
0,94	9,50	13,55	9,74	2,55	1,17	7,00	11,10	6,76	3,39

Tableau 2.8 (suite et fin) : Erreur relative entre la relation ψ et les valeurs expérimentaux des hauteurs relatives du seuil.

$\gamma = L_r^*/x$	$S = s/h_1$	F_1	ψ	$\Delta S = (\psi - S)/\psi$ %	$\gamma = L_r^*/x$	$S = s/h_1$	F_1	ψ	$\Delta S = (\psi - S)/\psi$ %
0,94	5,00	7,36	4,83	3,37	1,18	3,00	6,28	3,19	6,48
0,96	10,00	13,87	9,89	1,09	1,18	4,67	8,00	4,45	4,68
0,96	7,50	10,89	7,54	0,57	1,19	5,50	9,58	5,57	1,19
0,97	7,00	9,98	6,78	3,09	1,19	2,50	4,97	2,21	11,70
0,98	3,00	5,26	3,05	1,54	1,20	8,50	13,87	8,64	1,63
0,98	2,00	3,79	1,90	5,23	1,23	3,25	6,49	3,18	2,08
0,99	5,50	8,48	5,53	0,53	1,25	7,50	12,95	7,72	2,96
0,99	4,50	7,02	4,39	2,45	1,27	4,50	8,59	4,54	0,81
1,00	10,50	14,92	10,50	0,01	1,30	8,00	13,70	8,00	0,03
1,01	1,25	3,11	1,29	3,21	1,30	3,00	6,66	3,07	2,33
1,02	5,33	8,56	5,48	2,74	1,34	6,00	10,56	5,63	6,25
1,03	6,00	9,34	6,04	0,64	1,35	3,50	8,20	3,96	13,15
1,05	2,50	4,88	2,55	1,86	1,35	1,75	5,35	2,00	14,42
1,05	7,50	11,40	7,53	0,43	1,38	7,90	14,45	8,09	2,44
1,06	6,50	10,13	6,52	0,29	1,41	6,50	12,10	6,35	2,25
1,06	5,00	8,11	4,98	0,41	1,42	2,00	5,43	1,85	7,74
1,07	3,50	6,12	3,43	1,98	1,45	2,67	6,50	2,46	7,81
1,10	1,50	3,65	1,48	1,51					

Le tableau 2.7 montre que 75% des erreurs relatives sont $\leq 5\%$.

II.2.3.5. Relation entre le rapport γ de compacité et la position relative x/h_2 du seuil

Les résultats expérimentaux montrent que chaque intervalle du rapport de compacité correspond à une certaine position relative x/h_2 du seuil, sauf dans le cas du ressaut classique où ($0,00 \leq \gamma \leq 0,90$) nous avons constaté que, les mesures expérimentales s'ajustent autour d'une courbe de puissance de la forme :

$$x/h_2 = 6,7\gamma^{-0,86} \quad \text{pour } 0 \leq \gamma \leq 0,9 \quad (2.9)$$

L'équation précédente est représentée graphiquement sur la figure 2.11.

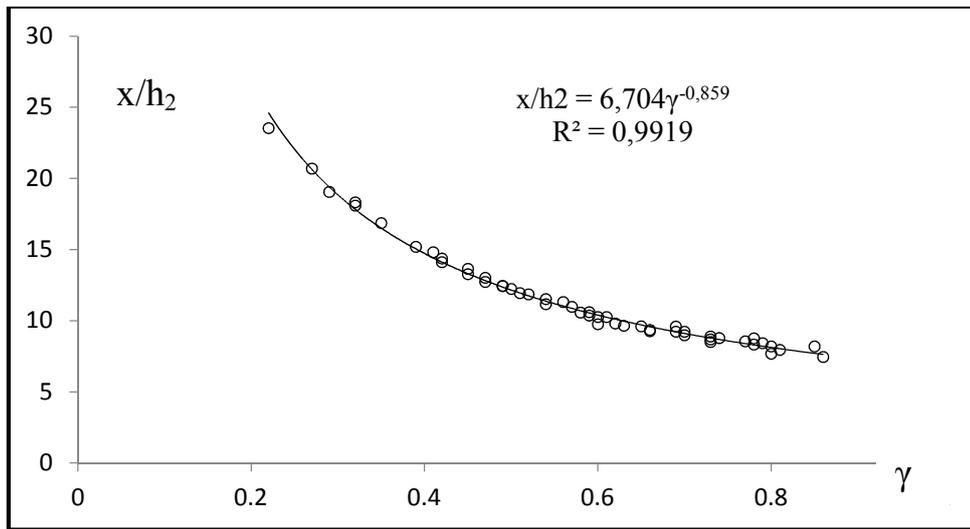


Figure 2.11: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ pour le ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$). (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.

Concernant les autres intervalles de valeurs de compacité γ , les variations de la position relative du seuil sont données par le tableau 2.9 :

Tableau 2.9 : Variation de la position relative du seuil x/h_2 pour chaque intervalle du rapport de compacité γ .

Intervalle de variation de γ	Centre de la classe	Valeur de x/h_2 \approx
$0,91 \leq \gamma \leq 1,01$	0,96	6,49
$1,02 \leq \gamma \leq 1,12$	1,07	5,74
$1,13 \leq \gamma \leq 1,23$	1,18	5,18
$1,24 \leq \gamma \leq 1,34$	1,29	4,82
$1,35 \leq \gamma \leq 1,45$	1,40	4,47
$1,46 \leq \gamma \leq 1,56$	1,51	4,14

La représentation graphique de la fonction $x/h_2 = f(\gamma)$ à aboutit à une courbe de puissance de la forme :

$$x/h_2 \approx 6,17/\gamma \quad (2.10)$$

Pour : $0,91 \leq \gamma \leq 1,56$

Et un rapport de forme $M = (mh_1)/b$ pour le canal trapézoïdal: $0,03 \leq M \leq 0,06$.

L'équation précédente est représentée graphiquement sur la figure 2.12.

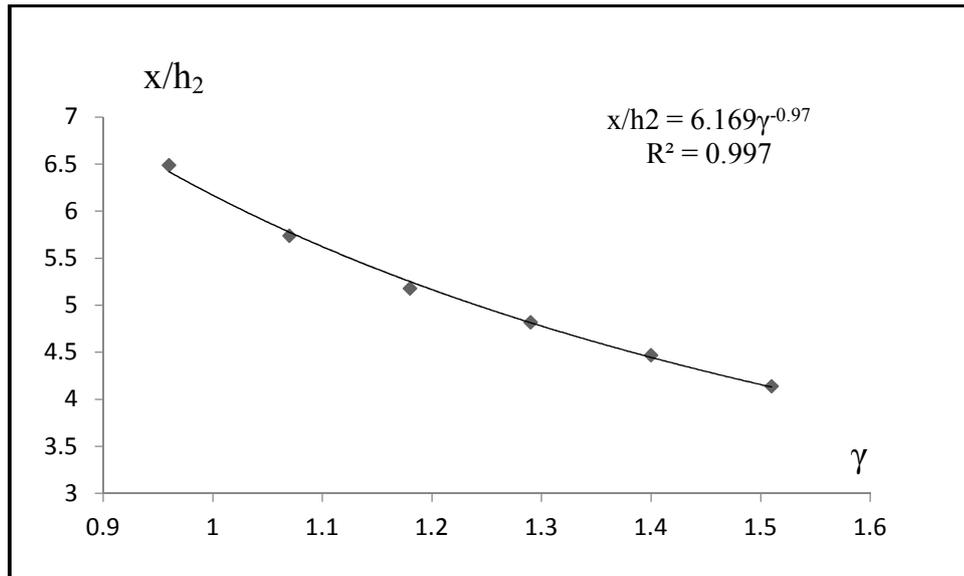


Figure 2.12: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ .
(o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.

Pour un rapport γ de compacité égale à l'unité, l'équation (2.10) donne un rapport $L_r^*/h_2 = 6,17$.

II.2.3.6. Profil de surface du ressaut

Pour la gamme de h_1 variant de 2 à 5 cm, nous avons représenté le profil de surface généralisé $y = f(x)$, telles que : $y = [h(x) - h_1] / [h_2 - h_1]$, $X = x/L_r$.

La figure 2.13 représente les profils de surface du ressaut relatifs à chaque valeur de compacité du ressaut, à savoir : $\gamma \leq 0,9$, $\gamma = 0,96$, $\gamma = 1,07$, $\gamma = 1,18$, $\gamma = 1,29$, $\gamma = 1,40$.

La figure 2.13 nous montrent que les points expérimentaux s'ajustent au tour d'une courbe de tangente hyperbolique de la forme $y = a.Tanh (b.X)$.

La courbe en traitait correspondant au profil du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$) possède une allure courbé, celle-ci se redresse progressivement en allant vers un rapport γ de compacité supérieur, jusqu'à ce qu'elle avoisine une forme linéaire pour un fort rapport de compacité.

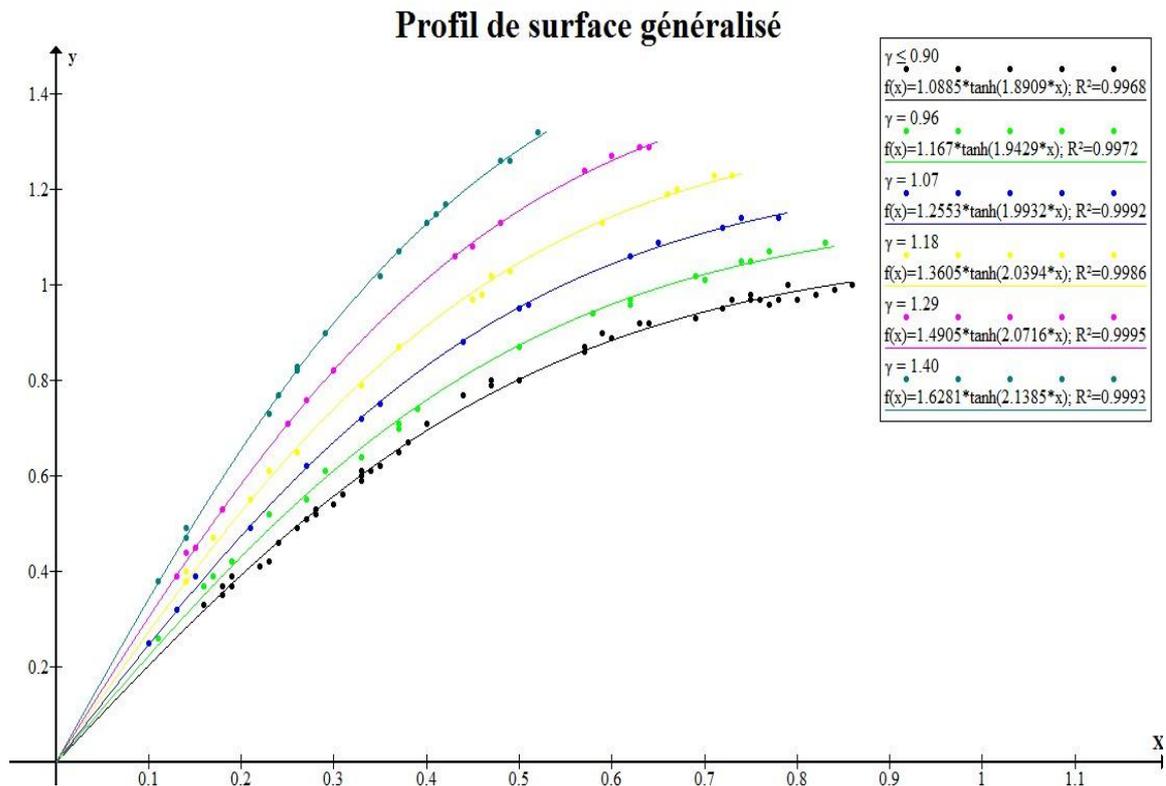


Figure 2.13 : Variation expérimentales du profil de surface $[y = f(X)]$ du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite trapézoïdal, pour Cinq rapports de compacité. (—) courbes d'ajustements.

Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $y = f(X)$ pour chaque valeur de γ , sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau 2.10 : Valeurs expérimentales de X et de y pour chaque valeurs de compacité γ de ressaut contrôlé

$\gamma = Lr^*/x$	$X = x/Lr^*$	y	$\gamma = Lr^*/x$	$X = x/Lr^*$	y	$\gamma = Lr^*/x$	$X = x/Lr^*$	y
0,91	0,33	0,64	1,05	0,15	0,39	1,25	0,64	1,29
0,91	0,62	0,96	1,05	0,27	0,62	1,25	0,15	0,45
0,91	0,37	0,71	1,05	0,10	0,25	1,26	0,18	0,53
0,91	0,17	0,39	1,06	0,50	0,95	1,26	0,30	0,82
0,93	0,74	1,05	1,06	0,72	1,12	1,26	0,45	1,08
0,93	0,29	0,61	1,10	0,65	1,09	1,26	0,63	1,29
0,94	0,83	1,09	1,10	0,33	0,72	1,27	0,57	1,24
0,94	0,19	0,42	1,10	0,13	0,32	1,30	0,48	1,13
0,94	0,70	1,01	1,14	0,71	1,23	1,32	0,14	0,44
0,94	0,39	0,74	1,15	0,73	1,23	1,32	0,25	0,71

Tableau 2.10 (suite et fin) : Valeurs expérimentales de X et de y pour chaque valeurs de compacité γ de ressaut contrôlé

$\gamma=Lr^*/x$	$X = x/Lr^*$	y	$\gamma=Lr^*/x$	$X = x/Lr^*$	y	$\gamma=Lr^*/x$	$X = x/Lr^*$	y
0,94	0,62	0,97	1,16	0,49	1,03	1,32	0,43	1,06
0,96	0,11	0,26	1,16	0,37	0,87	1,32	0,60	1,27
0,96	0,16	0,37	1,17	0,14	0,38	1,35	0,52	1,32
0,96	0,23	0,52	1,18	0,59	1,13	1,35	0,42	1,17
0,96	0,27	0,55	1,18	0,45	0,97	1,35	0,37	1,07
0,96	0,75	1,05	1,18	0,23	0,61	1,35	0,29	0,90
0,98	0,69	1,02	1,18	0,14	0,40	1,35	0,11	0,38
0,98	0,50	0,87	1,21	0,17	0,47	1,38	0,14	0,49
0,99	0,58	0,94	1,21	0,26	0,65	1,38	0,26	0,83
0,99	0,77	1,07	1,21	0,47	1,02	1,38	0,41	1,15
1,00	0,37	0,70	1,21	0,67	1,20	1,41	0,14	0,47
1,03	0,21	0,49	1,23	0,66	1,19	1,41	0,23	0,73
1,03	0,78	1,14	1,23	0,46	0,98	1,41	0,40	1,13
1,03	0,35	0,75	1,23	0,33	0,79	1,42	0,49	1,26
1,03	0,62	1,06	1,23	0,21	0,55	1,42	0,35	1,02
1,03	0,44	0,88	1,25	0,13	0,39	1,42	0,24	0,77
1,03	0,51	0,96	1,25	0,27	0,76	1,45	0,48	1,26
1,03	0,74	1,14	1,25	0,45	1,08	1,45	0,26	0,82

Tableau 2.11 : Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant S au nombre de Froude F_1 pour différents γ de compacité.

Intervalles des rapports de compacité	Rapports moyens γ de compacité	Coefficients a	Coefficients b	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,01$	0,96	1,17	1,94	0,977
$1,02 \leq \gamma \leq 1,12$	1,07	1,25	1,99	0,980
$1,13 \leq \gamma \leq 1,23$	1,18	1,36	2,04	0,971
$1,24 \leq \gamma \leq 1,34$	1,29	1,49	2,07	0,990
$1,35 \leq \gamma \leq 1,45$	1,40	1,63	2,14	0,989

La figure 2.14 montre la variation du coefficient a en fonction du rapport γ de compacité.

Le coefficient a a varié en fonction du rapport de compacité γ , suivant une droite d'équation :

$$a = 1,05\gamma + 0,14 \quad \text{pour } 0,91 \leq \gamma \leq 1,45 \quad (2.11)$$

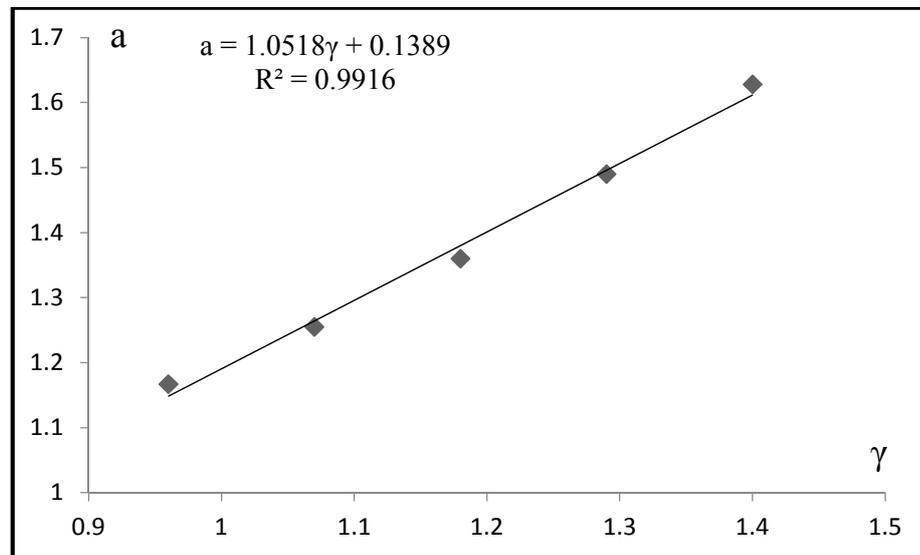


Figure 2.14 : Variation du coefficient a en fonction du rapport γ de compacité. (—) courbe d'ajustement

La figure 2.15 montre la variation du coefficient b en fonction du rapport γ de compacité.

Le coefficient b a varié en fonction du rapport de compacité γ , suivant une droite d'équation :

$$b = 0,43\gamma + 1,53 \quad \text{pour } 0,91 \leq \gamma \leq 1,45 \quad (2.12)$$

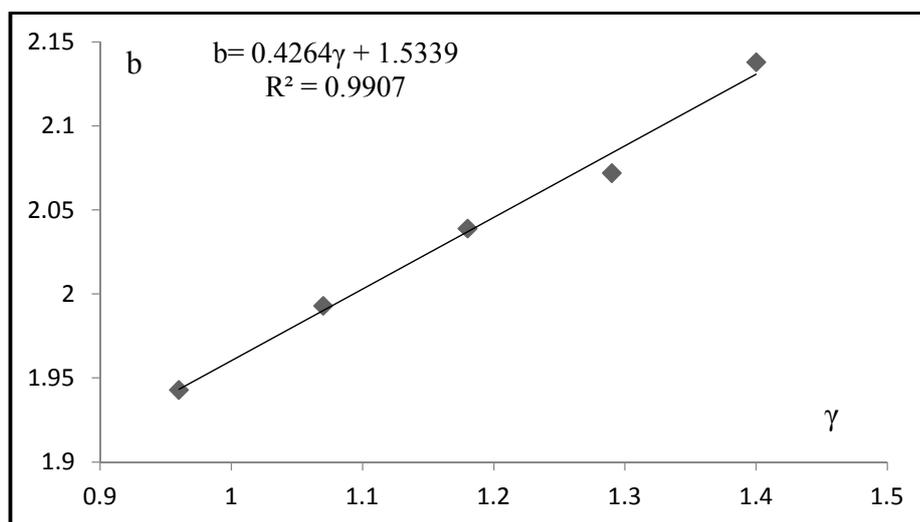


Figure 2.15 : Variation du coefficient b en fonction du rapport γ de compacité. (—) courbe d'ajustement

Une relation unique de la forme $y = \Pi(X, \gamma)$ est alors proposée, permettant de déterminer le profil de surface généralisé du ressaut tenant compte du rapport γ de compacité du ressaut.

Les points expérimentaux se situent alors sur une courbe d'équation :

$$y = (1,05\gamma + 0,14).Tanh [(0,43\gamma + 1,53).X] \quad (2.13)$$

Un rapport de forme $M = (mh_1)/b$ pour le canal trapézoïdal: $0,03 \leq M \leq 0,06$

Et des valeurs du rapport de compacité : $0,91 \leq \gamma \leq 1,43$.

Si l'on remplace, dans cette équation, le rapport γ par 0,9 on retrouve l'équation du courbe en pointiez relative au ressaut classique $y = 1,09.Tanh(1,89.X)$ (figure 2.13).

L'équation permet de définir le profil de surface du ressaut contrôlé par seuil mince et évoluant dans un canal trapézoïdal, pour différent rapport γ de compacité variant de 0,9 à 1,43.

L'équation (2.13) est représentée graphiquement sur la figure 2.13.

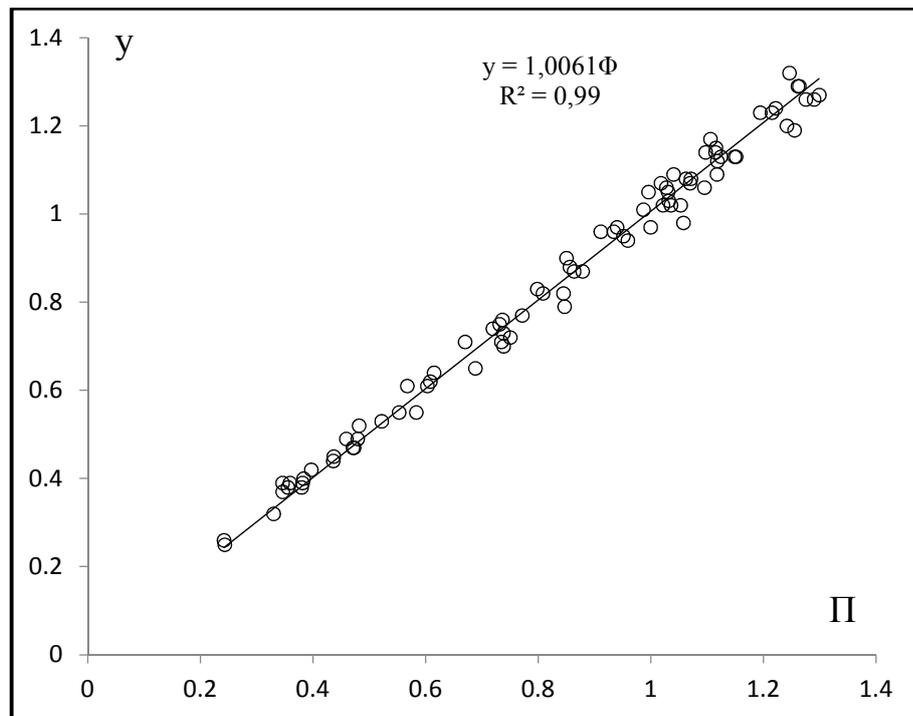


Figure 2.16: Variation expérimentale de Π en fonction de y , pour différent configuration de ressaut contrôlé dans un canal trapézoïdal. (—) première bissectrice. (o) points expérimentaux.

$$\Pi = (1,05\gamma + 0,14).Tanh [(0,43\gamma + 1,53).X].$$

L'erreur Δy entre les résultats expérimentaux du rapport $[h(x) - h_1]/ [h_2 - h_1]$ et la fonction ψ est donné par le tableau 2.12 :

Tableau 2.12 : Erreur relative entre les valeurs expérimentales de y et les valeurs de la relation théorique obtenue Π .

γ	X	y	Π	$\Delta y = \frac{(\Pi - y)}{\Pi}$ (%)	γ	X	y	Π	$\Delta y = \frac{(\Pi - y)}{\Pi}$ (%)
0,91	0,33	0,64	0,61	3,92	1,18	0,45	0,97	1,00	3,06
0,91	0,62	0,96	0,91	5,10	1,18	0,23	0,61	0,60	1,13
0,91	0,37	0,71	0,67	5,61	1,18	0,14	0,40	0,38	4,19
0,91	0,17	0,39	0,35	11,30	1,21	0,17	0,47	0,47	0,63
0,93	0,74	1,05	1,00	5,15	1,21	0,26	0,65	0,69	5,91
0,93	0,29	0,61	0,57	6,99	1,21	0,47	1,02	1,05	3,23
0,94	0,83	1,09	1,04	4,54	1,21	0,67	1,20	1,24	3,47
0,94	0,19	0,42	0,40	5,52	1,23	0,66	1,19	1,26	5,48
0,94	0,70	1,01	0,99	2,29	1,23	0,46	0,98	1,06	7,95
0,94	0,39	0,74	0,72	2,79	1,23	0,33	0,79	0,85	7,19
0,94	0,62	0,97	0,94	3,09	1,23	0,21	0,55	0,58	6,08
0,96	0,11	0,26	0,24	6,97	1,25	0,13	0,39	0,38	2,19
0,96	0,16	0,37	0,35	6,46	1,25	0,27	0,76	0,74	3,11
0,96	0,23	0,52	0,48	7,35	1,25	0,45	1,08	1,06	1,65
0,96	0,27	0,55	0,55	0,53	1,25	0,64	1,29	1,26	2,23
0,96	0,75	1,05	1,03	1,84	1,25	0,15	0,45	0,44	2,93
0,98	0,69	1,02	1,02	0,16	1,26	0,18	0,53	0,52	1,52
0,98	0,50	0,87	0,88	1,02	1,26	0,30	0,82	0,81	1,42
0,99	0,58	0,94	0,96	2,04	1,26	0,45	1,08	1,07	0,81
0,99	0,77	1,07	1,07	0,02	1,26	0,63	1,29	1,26	2,04
1,00	0,37	0,70	0,74	5,51	1,27	0,57	1,24	1,22	1,47
1,03	0,21	0,49	0,48	2,17	1,30	0,48	1,13	1,15	1,66
1,03	0,78	1,14	1,11	2,20	1,32	0,14	0,44	0,44	0,93
1,03	0,35	0,75	0,73	2,47	1,32	0,25	0,71	0,73	3,46
1,03	0,62	1,06	1,03	3,05	1,32	0,43	1,06	1,10	3,33
1,03	0,44	0,88	0,86	2,70	1,32	0,60	1,27	1,30	2,30
1,03	0,51	0,96	0,93	2,69	1,35	0,52	1,32	1,25	5,58
1,03	0,74	1,14	1,10	3,74	1,35	0,42	1,17	1,11	5,47

Tableau 2.12 (suite et fin) : Erreur relative entre les valeurs expérimentales de y et les valeurs de la relation théorique obtenue Π .

γ	X	y	Π	$\Delta y = (\Pi - y) / \Pi$ (%)	γ	X	y	Π	$\Delta y = (\Pi - y) / \Pi$ (%)
1,05	0,15	0,39	0,36	7,93	1,35	0,37	1,07	1,02	4,86
1,05	0,27	0,62	0,61	1,88	1,35	0,29	0,90	0,85	5,53
1,05	0,10	0,25	0,24	2,71	1,35	0,11	0,38	0,36	6,48
1,06	0,50	0,95	0,95	0,14	1,38	0,14	0,49	0,46	6,30
1,06	0,72	1,12	1,12	0,16	1,38	0,26	0,83	0,80	3,83
1,10	0,65	1,09	1,12	2,53	1,38	0,41	1,15	1,12	2,98
1,10	0,33	0,72	0,75	4,22	1,41	0,14	0,47	0,47	0,19
1,10	0,13	0,32	0,33	3,13	1,41	0,23	0,73	0,74	1,11
1,14	0,71	1,23	1,19	2,90	1,41	0,40	1,13	1,12	0,50
1,15	0,73	1,23	1,22	1,20	1,42	0,49	1,26	1,28	1,22
1,16	0,49	1,03	1,03	0,16	1,42	0,35	1,02	1,04	1,54
1,16	0,37	0,87	0,86	0,72	1,42	0,24	0,77	0,77	0,21
1,17	0,14	0,38	0,38	0,11	1,45	0,48	1,26	1,29	2,38
1,18	0,59	1,13	1,15	1,90	1,45	0,26	0,82	0,84	3,02

Le tableau 2.12 montre que 77% des erreurs relatives sont $\leq 5\%$.

II.3. Conclusion

Ce présent chapitre a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal de section droite trapézoïdal à angle d'inclinaison du talus de 73° , contrôlé par seuil à paroi mince. Dans un premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie pendant les essais. Passant en second temps aux résultats expérimentaux, cinq (05) hauteurs initiales h_1 ont été testées dix-huit (18) seuils s des hauteurs différentes. Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue. L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation de la hauteur conjuguée du ressaut pour le rapport de compacité $\gamma \leq 0,9$ et pour $\gamma > 0,9$ en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. Dans un second temps l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

Aussi, l'étude expérimentale s'est intéressée à la variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ . Le dernier point de cette étude expérimentale a abordé le profil généralisé du ressaut.

Conclusion de la deuxième partie

A travers cette deuxième partie nous avons abordé la partie expérimentale de l'étude de l'influence d'un seuil sur les caractéristiques du ressaut hydraulique en canal de section droite symétrique trapézoïdal, à angle d'inclinaison des talus de 73° .

Deux chapitres ont été nécessaires : nous avons effectué en premier lieu la description du modèle expérimental, qui a servi de base à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique. Nous avons abordé en deuxième lieu la procédure expérimentale suivie afin d'aboutir à des résultats significatifs. Nous avons décrit ensuite, l'appareillage utilisé pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique, moyennant des schémas et des photographies.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'exposition du problème et à l'analyse expérimentale des résultats obtenus. A travers cette analyse nous avons proposé des relations fonctionnelles régissant le ressaut hydraulique provoqué par seuil mince évoluant dans un canal trapézoïdal.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Notre étude a été dédiée à l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique. L'étude a pour but de déterminer expérimentalement l'influence du seuil sur les autres caractéristiques du ressaut. Deux grandes parties ont été proposées: une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine, et une deuxième partie qui a concerné notre propre contribution.

La première partie a été divisée en trois chapitres :

Le premier chapitre, est consacré au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire. On a commencé par l'équation de base, démontrée par Bélanger (1928) ; cette dernière est obtenue par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut classique, et elle exprime la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique, et le facteur adimensionnel connu par le nombre de Froude F_1 . La détermination de la valeur du nombre de Froude F_1 de l'écoulement à l'amont du ressaut hydraulique, a permis à Bradley et Peterka (1957), de donner les classifications des différentes formes du ressaut.

A travers les études de Hager et al (1990), sur le ressaut hydraulique, les auteurs ont montré que l'estimation des caractéristiques géométriques du ressaut, telle que la longueur du ressaut L_j et la longueur L_r du rouleau, n'est possible que par la voie expérimentale.

D'autres formes du ressaut ont été abordées, à travers les travaux de Forster et Skrinde (1950), sur le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince et épaisse. Les auteurs ont montré la variation des hauteurs relatives $S = s/h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 , pour des différentes valeurs de x/h_2 données. C'est dans ce but qu'ils ont établi un diagramme de trois courbes, qui se rapprochent l'une à l'autre, lorsque les valeurs des hauteurs relatives s/h_2 augmentent. La marche positive, était l'un des cas étudié par Forster et Skrinde (1950), et son influence sur le ressaut hydraulique. Ces derniers ont établi un diagramme qui sert à déterminer la longueur du bassin amortisseur.

Pour le ressaut forcé par seuil évoluant dans un canal rectangulaire, les travaux de Rand (1957) ont fait l'objet de notre étude bibliographique. L'auteur a élaboré une relation entre la hauteur du seuil et de sa position pour faire la classification du ressaut forcé en 10 cas typiques. A la base des résultats expérimentaux Rand (1965), a représenté, sur un diagramme, la relation entre la hauteur conjuguée et la fonction $f(S, K)$, où K est un facteur de position.

Sur le même sujet, Bretz (1988), Hager et Bretz (1988), Hager et Sinniger (1989) et Hager et Li (1991), ont étudié l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique. Bretz (1988) a établi trois équations qui relient le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y , le nombre de Froude F_1 et la hauteur relative du seuil. Ces résultats correspondent aux trois types du ressaut : ressaut type A, ressaut type B et ressaut type B-min. De même que pour la longueur relative du bassin d'amortissement, l'auteur a établi trois équations en fonction du nombre de Froude F_1 , pour chaque type du ressaut hydraulique cité ci-dessus. Les courbes obtenues sont situées au-dessous de celles du ressaut classique. Ce fait indique la réduction nette de la longueur du ressaut forcé par rapport au ressaut classique dans l'intervalle des valeurs de nombre de Froude $5 \leq F_1 \leq 13$.

Pour le deuxième chapitre de la partie bibliographique nous avons passé en revue les travaux principaux, établis par Debabeche (2003), qui ont été consacrés à l'étude expérimentale de l'influence du seuil à paroi mince sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire. L'étude s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident. Il a été montré que pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $Y = a F_1 + b$. Dans un second temps, l'étude montre que pour une valeur donnée du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente. L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport S en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type quasi-linéaire. Dans un troisième temps l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ . Il a été montré que pour un rapport γ de compacité égale à l'unité, la relation donne un rapport $Lr^*/h_2 = 4,432$. Ce dernier est très proche de celui proposé par Safranez (1955) $Lr/h_2 = 4,5$. L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un quatrième temps, à la variation expérimentale du profil de surface ($y=f(X)$) du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite rectangulaire, pour trois rapports intermédiaires de compacité.

Le dernier chapitre de la partie bibliographique, a pour objectif de faire le point sur les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. La détermination des caractéristiques du ressaut, a été souvent l'objectif principal des travaux entrepris par : Posey et Hsing (1938), Silvester (1964), Ohtsu (1976), et plus récemment ceux de Hager et Wanoschek (1989).

Le cas du canal trapézoïdal est le plus général; par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut, nous avons déterminé la relation des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 , nous avons ensuite déduit le cas du canal rectangulaire et triangulaire. Même procédé pour la détermination du rendement du ressaut, mais

pour ce cas l'application du théorème de Bernoulli a été nécessaire. La représentation graphique de la relation du rendement obtenue, montre que c'est le canal triangulaire qui présente le plus grand intérêt de point de vue rendement.

La deuxième partie de notre travail a concerné notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale symétrique, d'angle d'inclinaison des talus de 73° .

Cette partie a été divisée en deux chapitres :

Le premier chapitre a été consacré à la description du modèle expérimental, utilisé dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique. Une description détaillée de l'appareillage utilisé pour les essais avec des illustrations photographiques nous a aidés à donner une vue plus claire sur le déroulement des travaux d'expérimentation.

Le deuxième chapitre a été consacré à la position du problème et à la description des essais et à l'analyse expérimentale des résultats obtenus. A travers cette analyse nous avons proposé les relations fonctionnelles régissant le ressaut hydraulique, provoqué par seuil mince, évoluant dans un canal trapézoïdal. Un nombre suffisant des relations entre les différents paramètres du ressaut hydraulique, nous permettra, dans la pratique, de dimensionner notre bassin amortisseur.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Première partie

Chapitre I :

Figure 1.1 : Ressaut hydraulique.....	3
Figure 1.2.a : Ressaut ondulé.....	4
Figure 1.2.b : Le pré-ressaut.....	4
Figure 1.2.c : Le ressaut de transition.....	5
Figure 1.2.d : Le ressaut stable.....	5
Figure 1.2.e : Le ressaut clapoteux.....	6
Figure 1.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut.....	6
Figure 1.4 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger.....	8
Figure 1.5 : Hauteur du ressaut.....	8
Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique.....	9
Figure 1.7 : Ligne de charge totale le long du ressaut classique.....	11
Figure 1.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction de nombre de Froude F_1	13
Figure 1.9 : Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.....	14
Figure 1.10 : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince quelques valeurs de x/h_2 , selon Forster et Skrinde (1950).....	14
Figure 1.11 : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L	15
Figure 1.12 : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950).....	16
Figure 1.13 : Ressaut forcé par marche positive de hauteur « s ».....	16
Figure 1.14 : Variation du nombre de Froude F_1 , en fonction de h_3/h_1 et de la hauteur relative x/h_1 de la marche positive, selon Forster et Skrinde (1950).....	17
Figure 1.15 : Cas typique d'écoulement divisés en trois classes, selon Rand (1957).....	18
Figure 1.16 : Hauteurs conjuguées h_2/h_1 , $f(S, K)$ pour $F_1 = 9$, valeurs et courbes expérimentales.....	19
Figure 1.17 : Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $F_1 = 5.23$ et $S = 1.42$	20
Figure 1.18 : Ressaut forcé par seuil, selon Bretz (1965).....	21
Figure 1.19 : Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_A = f(F_1, S)$ avec $0.5 \leq S \leq 6$. $S = s/h_1$	22

Figure 1.20 : Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_B = f(F_1, S)$	22
Figure 1.21 : Ressaut forcé type B _{min} . Rapport des hauteurs conjuguées $Y_{B-min} = f(F_1, S)$	23
Figure 1.22 : Longueur relative $\lambda_s = f(F_1)$ pour le ressaut forcé.....	24
Figure 1.23 : Longueur relative $\lambda_B = f(F_1)$ pour le ressaut forcé.....	24

Chapitre II :

Figure 2.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par une seuil continu à paroi mince.....	27
Figure 2.2 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction du nombre de Froude IF_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ	28
Figure 2.3 : Variation du rapport Y de hauteurs conjuguées en fonction de $(Y = 1.386 \cdot IF_1 - \sqrt{2} \cdot \ln(\gamma) - 0,617)$	29
Figure 2.4 : Variation de s/h_1 en fonction du nombre de Froude IF_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ	29
Figure 2.5 : Variation de $\zeta(S, \gamma)$ en fonction de $IF_1 - 1$	30
Figure 2.6 : Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ	30
Figure 2.7 : Variation expérimentales du profil de surface ($y=f(X)$) du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite rectangulaire, pour trois rapports intermédiaires de compacité.....	31
Figure 2.8 : Variation expérimentale de Π en fonction de y , pour différents configurations de ressaut contrôlé dans un canal rectangulaire.....	32

Chapitre III :

Figure 3.1 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M.....	36
Figure 3.2 : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdal.....	37
Figure 3.3 : Représentation graphique de la relation (3.12) du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1	39

Deuxième partie

Chapitre I :

Figure 1.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal, ayant servi à l'expérimentation.....	43
Figure 1.2 : Photographie du model expérimentale du canal.....	44
Figure 1.3 : Pompe centrifuge axiale (pompe principale).....	44
Figure 1.4 : Deuxième pompe (pompe de renforcement).....	45
Figure 1.5 : Raccordement des pompes.....	45
Figure 1.6 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction Latérale ayant servi à la mesure du débit.....	46
Figure 1.7 : Photographie d'une boite en charge	46
Figure 1.8 : Photographie d'une série de convergent.....	47
Figure 1.9 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.....	48
Figure 1.10 : Photographie des seuils minces testés.....	49
Figure 1.11 : Support du seuil.....	49

Chapitre II :

Figure 2.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince.....	51
Figure 2.2 : Différentes configurations du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince, obtenues à débit croissant pour une position de seuil $x = 85$ cm, une hauteur initiale $h_1 = 1$ cm et $\Delta x \approx 5$ cm	55
Figure 2.3 : Variation de la longueur relative Lr^*/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.....	56
Figure 2.4 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ	58
Figure 2.5 : Variation du coefficient b en fonction du rapport γ de Compacité.....	60
Figure 2.6 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de $(1,222 - 0,116\gamma)$	61
Figure 2.7 : Variation de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ	64

Figure 2.8 : Variation du coefficient a en fonction du rapport γ de compacité	65
Figure 2.9 : Variation du coefficient b en fonction du rapport γ de compacité.....	65
Figure 2.10 : Variation des hauteurs relatives $S=s/h_1$ du seuil en fonction de $(1,17 - 0,29\gamma).F_1 + (1,29\text{Ln}(\gamma) - 1,55)$	67
Figure 2.11 : Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ pour le ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$).....	69
Figure 2.12 : Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ	70
Figure 2.13 : Variation expérimentales du profil de surface [$y = f(X)$] du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite trapézoïdal, pour Cinq rapports de compacité.....	71
Figure 2.14 : Variation du coefficient a en fonction du rapport γ de compacité.....	73
Figure 2.15 : Variation expérimentale de Π en fonction de y , pour différent configuration de ressaut contrôlé dans un canal trapézoïdal.....	73

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Deuxième partie

Chapitre 2 :

Tableau 2.1 : Centres des classes de valeurs du rapport de compacité.....	53
Tableau 2.2 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure 2.3.....	57
Tableau 2.3 : Valeurs expérimentales des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince pour des rapports γ de compacité du ressaut et des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.....	59
Tableau 2.4 : Coefficients des relations expérimentales issues de l'ajustement de la relation liant Y au nombre de Froude F_1 pour différents rapport γ de compacité.....	60
Tableau 2.5 : Erreur relative entre la relation ϕ et les valeurs expérimentaux du rapport des hauteurs conjuguées	62
Tableau 2.6 : Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant S au nombre de Froude F_1 pour différents γ de compacité.....	64
Tableau 2.7 : Valeurs expérimentales des hauteurs relatives s/h_1 du seuil du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince pour des rapports γ de compacité du ressaut et des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.....	66
Tableau 2.8 : Erreur relative entre la relation ψ et les valeurs expérimentaux des hauteurs relatives du seuil.....	67
Tableau 2.9 : Variation de la position relative du seuil x/h_2 pour chaque intervalle du rapport de compacité γ	69
Tableau 2.10 : Valeurs expérimentales de X et de y pour chaque valeurs de compacité γ de ressaut contrôlé.....	71
Tableau 2.11 : Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant S au nombre de Froude F_1 pour différents γ de compacité.....	72
Tableau 2.12 : Erreur relative entre les valeurs expérimentales de y est les valeurs de la relation théorique obtenue Π	75

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achour, B., (1989). Jump flowmeter in a channel of triangular cross-section without weir, *Journal of Hydraulic Research* 27(2), 205-214.
- Achour, B., (1997) Dissipation d'énergie par ressaut, these d'état, Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil.
- Achour, B., Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire. *Journal of Hydraulic Research* 41(3), 319-325.
- Arghyropoulos, P. A., (1962). General Solution of the Hydraulic Jump in Sloping Channels, *Proc. ASCE, J; Hydraulics Division*, Vol.88, pp.61-75.
- Andersen J, V. M., (1978). Undular hydraulic jump, *Proc, ASCE, j, Hydraulics Division*, Vol. 104, pp. 1185-1188.
- Bakhmeteff, B. A., Matzke, A E, (1936). The Hydraulic Jump terms of dynamic similarity, *Transactions, American society of civil engineers*, Vol.101, pp, 630-647.
- Belanger, J.B., (1828). Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes, Carilian-Goeury, Paris.
- Bradley, J. N., Peterka, A. J., (1957). The hydraulic design of stilling basins, Hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I), paper 1401; High dams, earth dams, and large canal structures (Basins II), paper 1402; short stilling basins for canal structures, small outlet works, and small spillways (Basin III), paper 1403; stilling basin and wave suppressors for canal structures, outlet works and diversion dams (Basin IV), paper 1404; stilling basin with sloping; apron (Basin V), paper 1405; small basins for pipe or open channel outlets no tailwater required (Basin VI), paper 1406, *Proceedings, American Society of Civil Engineers, J. hydraulics division*, vol. 83, No.HY5.
- Bidone , G., (1819). "Observations on the Height of the Hydraulic Jump", a Report Presented in Meeting of Royal Academy of Science of Turin, pp. 21-80, 1819.
- Bretz, N., V., (1988). Ressaut Hydraulique Forcé par seuil, *Laboratoire de constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil*, Communication No. 2.
- Carlier, M., (1980). *Hydraulique Générale et Appliquée 1^{er} édition*.
- Debabeche, M., Achour, B., (1996). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, 1^{er} Séminaire Maghrébin sur l'eau, Université de Tizi-Ouzou.
- Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Debabeche, M., (1996). Contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, Thèse de Magistère, Université de Biskra.

- Debabeche, M., Achour, B., (2006). Effet du seuil sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. *Journal of Hydraulic Research* (article accepté pour publication en 2007).
- Debabeche, M., Achour, B., (2007). Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45(1), pp. 135-139.
- Debabeche, M., Lakehal, M., Mansri, N. and Achour b., (2008). Theoretical study of the forced hydraulic jump by positive step in a triangular channel. *Journal of fluid mechanics research*, Vol. 35(4), pp. 318-326.
- Debabeche, M., Lakehal, M., Mansri, N. and Achour b., (2006). Ressaut hydraulique force par marche positive. The third international conference on the 'Water Resources in the Mediterranean Basin', watmed 3 – Tripoli – Lebanon.
- Forster, J. W. and Skrinde, R. A., (1950). Control of Hydraulic jump by sills, *Trans. ASCE*, 115,973-1022.
- Hachemi rachedi, L., (2006). Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, mémoire de magistère en science hydrauliques, Département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Hager, W., h., (1987). Der Ablufss im U-Profil. *Korrespondenz Abwasser* 34(5): 468-482.
- Hager, W.H., Bretz N.V., (1986). Hydraulic Jump at positive and negative step; *J. hydraulic research* 24(4), 237-253.
- Hager, W.H., Sinniger, R., (1985). Flow characteristics of the Hydraulic jump in Stilling Channel with an abrupt bottom rise, *J. Hydraulic Research* Vol. 23, 1985, No. 2 pp. 101-113; Vol. 24(3), pp. 207-215.
- Hager, W., Bremen R., H., et Kawogoshi N. (1990). Classical hydraulic jump; length of roller, *J. Hydraulic research* 28(5), 591-608.
- Hager, W. H., Li, D., (1992). Sill-controlled Energy Dissipator, *J. Hydraulic research*, vol.30, n°2,165-181.
- Hager, W. H., wanoschek, R., (1987). Hydraulic jump in triangular channel, *J. Hydraulic Research*, Vol.25, n°5,549-564.
- Lakehal, M., Debabeche, M., Mansri, N., (2008). Effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. *Larhyss journal* (Article accepté pour publication).
- Moore, W. L., (1943), Energy loss at the base of a free overfall. *Trans. ASCE* 108, 1343-1392.
- Mansri, N., (2006). Ressaut Hydraulique Contrôlé par Marche Positive Dans un Canal Triangulaire, Mémoire de Magistère, Université de Biskra.
- Negm et Abdel-Azim M. (2000). Semi-theoretical Approach for Detection of Cavitation at Steps in Sloping Stilling Basins Under Hydraulic jump Conditions, Faculty of Engineering, Zagazig University, Egypt.

Ohtsu, I., (1976). Free hydraulic jump and submerged hydraulic jump in trapezoidal and rectangular channels. Trans. JSCE 8, 122-125.

Posey, C.J., Hsing, P.S. (1938). The hydraulic jump in trapezoidal channel. Engineering News Record 121, 797-798.

Rajaratnam, N., (1964). The Forced Hydraulic Jump. Water Power, January, 14-19, February, 61-65.

Rajaratnam, N., (1964), Discussion to Silvester (1964) Journal of Hydraulic Division, ASCE 90(HY4), 341-350.

Rajaratnam, N., (1967). Hydraulic jumps, Advances in hydroscience, 4: 197-280, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York, N.Y.

Rand W., (1957). An approach to generalized design of stilling basin. Trans. New York academy of Sciences. 1957. 20(2), 173-191.

Rao N.S.G., Muralidhar D. (1963). Discharge characteristics of weirs of limit crest width, La houille Blanche, Vol. 18,537-545.

Silvester, R. (1964). Hydraulics Jump in all Shapes of Horizontal Channels, Proc.ASCE, J. Hydr.Divi., 90, 23-55.

Wanoschek, R., Hager, W. H., "hydraulic jump in trapezoidal channel", j. hydr. Research, Vol. 27, 1989, 429-446.

PRINCIPALES NOTATIONS

PRINCIPALES NOTATIONS

A_1	L'aire de la section mouillée initiale	$[m^2]$
A_2	L'aire de la section mouillée finale	$[m^2]$
B	La grande base du canal trapézoïdal	$[m]$
b	La petite base du canal trapézoïdal	$[m]$
F_1	Nombre de Froude incident	$[-]$
F	Force de frottement	$[N/m^2]$
G	Accélération de la pesanteur	$[m/s^2]$
G	Poids de la tranche liquide	$[N]$
h	Hauteur du ressaut	$[m]$
h_1	Hauteur initiale du ressaut	$[m]$
h_2	Hauteur finale du ressaut	$[m]$
\bar{h}	Distance entre le centre de gravité de la section transversale et la surface libre de l'écoulement	$[m]$
$h(x)$	Profondeur d'eau à la distance x du pied du ressaut	$[m]$
H	Charge totale	$[m]$
ΔH	Perte de charge due au ressaut	$[m]$
K	Facteur de position	$[-]$
L_B	Longueur du bassin	$[m]$
L_j	Longueur du ressaut	$[m]$
L_r	Longueur du rouleau de surface	$[m]$
L_{RF}	Longueur du rouleau de fond	$[m]$
L_S	Position du seuil ou d'une marche par rapport au début de ressaut	$[m]$
M	La hauteur relative initiale du ressaut $M = (mh_1)/b$	$[-]$
m	Cotangente de l'angle d'inclinaison d'un talus	$[-]$
P_1	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	$[N]$
P_2	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	$[N]$
P_s	Force de réaction due à la force de pression exercée sur la face latérale de la marche positive	$[N]$
Q	Débit volume	$[m^3/s]$
q	Débit unitaire	$[m^2/s]$
s	Hauteur du seuil ou de la marche positive	$[m]$

S	Hauteur relative du seuil ou de la marche positive	[-]
V_1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m/s]
V_2	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m/s]
W	Rapport d'aspect $W = h_1/b$	[-]
x	Position de seuil ou de la marche	[m]
X	Position relative de seuil ou de la marche	[-]
x_{rf}	Position de la fin du rouleau de fond à l'aval	[m]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	[-]
Y*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
Y_A	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut de type A	[-]
Y_B	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut de type B	[-]
Y_{Bmin}	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut de type B-min	[-]
α	Facteur de correction de l'énergie cinétique	[-]
β	Facteur de correction de la quantité de mouvement	[-]
Θ	Angle d'inclinaison du canal	[-]
$\bar{\omega}$	Poids spécifique du liquide	[Kg/m ³]
η	Rendement du ressaut	[-]