République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar – El OUED

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

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

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

THEME

Contribution à l'étude de ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à largeur variable

Dirigé par :

Mr. ZAID Zaid

Présenté par :

MASSOUDI Boubaker

TEDJANI Hassan

Président	Dr. ghomri ali	Université El-Oued
Examiner	Dr. riget ferhat	Université El-Oued
Encadreur	Dr. zaid zaid	Université El-Oued

Promotion : Septembre 2024

Résumé :

Cette étude expérimentale a pour objectif d'analyser le comportement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à section variable, en présence d'un seuil.

Cette étude comporte deux volets complémentaires. Une première partie bibliographique a permis de dresser un état de l'art sur les recherches menées dans le domaine du ressaut hydraulique. Dans un second temps, une campagne expérimentale a été menée pour étudier l'influence d'un seuil sur les caractéristiques du ressaut dans un canal à section variable. Les résultats obtenus ont conduit à l'élaboration de relations empiriques adimensionnelles, généralisables à d'autres configurations.

Mots clés : ressaut hydraulique, canal rectangulaire de forme composée, seuil mince.

Abstract :

This experimental study aims to analyze the behavior of a hydraulic jump in a rectangular channel with a variable cross-section, in the presence of a weir.

The study consists of two complementary parts. A first part, a literature review, provided a state of the art on research conducted in the field of hydraulic jumps. In a second part, an experimental campaign was conducted to study the influence of a weir on the characteristics of the jump in a channel with a variable cross-section. The results obtained led to the development of dimensionless empirical relationships, generalizable to other configurations.

Keywords: hydraulic jump, rectangular channel of composite shape, sharp-crested weir.

ملخص:

تهدف هذه الدراسة التجريبية إلى تحليل سلوك القفزة المائية في قناة مستطيلة ذات مقطع متغير، وذلك في وجود عائق (سَد).

تتكون الدراسة من جزئين رئيسيين .الجزء الأول هو استعراض شامل للأبحاث والاعمال المنجزة في هذا المجال أما الجزء الثاني، فقد تضمن إجراء تجارب عملية لدراسة تأثير السد على خصائص الانقطاع في قناة ذات مقطع متغير .وقد أدت النتائج التي تم الحصول عليها إلى تطوير علاقات تجريبية لا تعتمد على وحدات القياس، ويمكن تطبيقها على حالات أخرى مشابهة.

الكلمات المفتاحية: القفزة المائية، قناة مستطيلة مركبة الشكل، عتبة حاده.

Liste d'abréviation :

A1	L'aire de la section mouillée initiale	[m^2]
A2	L'aire de la section mouillée finale	[m^2]
B et b	Largeur de lit majeur et de lit mineur du canal	[m]
F1	Nombre de Froude à l'amont du ressaut	[–]
f1 ; f2	Force hydrostatique au pied et à la fin du ressaut	[N]
F1	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	[N]
F2	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	[N]
g	Accélération de la pesanteur	[m/s^2]
h	Hauteur de plein bord du lit mineur	[m]
h_1	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h_2	Hauteur finale du ressaut	[m]
h_{c0}	La hauteur du lit mineur du canal rectangulaire composée [m]	
h_{c1}	La hauteur du lit majeur du canal rectangulaire composée [m]	
$\bar{h}$	Profondeur du centre de gravité de la section mouillée	[m]
H_1 et H_2	Charges totales au pied et à la fin du ressaut	[m]
ΔH	Pertes de charge dues au ressaut	[m]
H_{dev}	Hauteur de la lame déversant	[m]
K	Facteur de position	[-]
Lj	Longueur du ressaut	[m]
Lr	Longueur du rouleau	[m]
Lj*	Longueur relative du ressaut classique	[m]
Lr*	Longueur relative du rouleau classique	[m]

ΔP	La variation dans la quantité de mouvement	$[kg.m.s^{-1}]$
P	Pression	$[N/m^2]$
P_1	Pression hydrostatique appliquée à la section amont du ressaut	[Pa]
P_2	Pression hydrostatique appliquée à la section aval du ressaut	[Pa]
Q	Débit volume	$[m^3/s]$
q	Débit unitaire	$[m^2/s]$
Re	Nombre de Reynolds	[-]
R_h	Rayon hydraulique	[m]
s	Hauteur d'un seuil	[m]
V	Le volume du liquide	$[m^3]$
V_1 et V_2	Vitesses moyennes au pied et à la fin de ressaut	[m/s]
W	Rapport d'aspect $W = h_1/b$	[-]
X	Coordonnée longitudinale	[m]
X	Position d'un seuil	[m]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées	[-]
Y*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
β	Rapport de l'élargissement	[-]
τ	Rapport des hauteurs	[-]
λ_B	Longueur relative du bassin	[m]
λ_S	Position relative du seuil	[m]
λ_r^*	La variation de la longueur relative du rouleau	[m]
η	Rendement du ressaut	[-]
η^*	*Rendement du ressaut classique*	*[-]*

Table des matières

Résumé : I

Liste d'abréviation : II

Liste des figures VI

Liste des tableaux VIII

Introduction générale : 1

Chapitre I Ressaut hydraulique en canal rectangulaire I

I.1. Introduction 2

I.2. Definition 3

I.3. Ressaut hydraulique classique 4

I.3.1 Classification du ressaut classique 4

I.3.2 Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut 6

I.3.3 Caractéristiques géométriques du ressaut 9

I.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire 14

I.4.1 Approche de Forster et Skrinde (1950) 14

I.5. Ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire 19

I.5.1 Approche de Rand 19

I.5.2 Approche de Bretz 21

I.6. Conclusion 28

Chapitre II Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée 12

II.1. Introduction 30

II.2. APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR 2012 30

II.2.1 Les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique 30

II.2.2 Le Rendement du ressaut hydraulique : 33

II.3. L'étude expérimentale des caractéristiques du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée 34

II.3.1 La problématique 35

II.3.2 Analyse des essais expérimentaux 36

II.3.3 Résultats expérimentaux 37

.II.4 Conclusion 40

Chapitre III Description du modèle expérimentale 29

III.1. Introduction 42

III.2. Description du canal 42

III.3. Limnimètre : 47
III.4. Les seuils minces....49
III.5. Modèle expérimental 51
III.6. Conclusion 51
Chapitre IV Étude expérimentale....41
IV.1. Introduction 52
IV.2. Effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire de forme composée....52
IV.2.1 Position du problème....52
IV.2.2 Mesure du débit volume Q 53
IV.2.3 Procédure expérimentale....54
IV.3. Analyse des résultats expérimentaux 57
IV.3.1 Variation de la longueur relative Lr/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude $Fr_1$57
.IV.4 Conclusion 60
Concluion Generale 61

Liste des figures

Figure I.1: Ressaut Hydraulique 3
Figure I.2 a: Ressaut ondulé.....4
Figure I.3: Représentation des forces agissantes sur le ressaut 6
Figure I.4: Représentation graphique de l'équation de Bélanger (1828).....8
Figure I.5 : : Hauteur du ressaut Longueur du rouleau 9
Figure I.6: Aspect du ressaut classique a) Rouleau développé b) Rouleau non développé.....10
Figure I.7: (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique.....12
Figure I.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F1, (—) Courbe tracée selon la relation (1.25), (-----) courbe tracée Selon la relation (1.26). 14
Figure I.9: Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince. 15
Figure I.10: Variation expérimentale du nombre de Froude F1 en fonction de la hauteur relative s/h1 du seuil à paroi mince quelques valeurs de x/h2, selon Forster et Skrinde (1950).....15
Figure I.11 : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L. Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.....16
Figure I.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) 17
Figure I.13: Ressaut forcé par marche positive de hauteur ''s'', les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions 18
Figure I.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) 19
Figure I.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 Ls,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. 20
Figure I.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. 21
Figure I.17: Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour F1 = 5,23 et S = 1,42. 1) Ressaut type A ; 2) Ressaut type B ; 3) Ressaut type Bmin ; 4) Ressaut type C et 5) onde. (Bretz, 1987). 22
Figure I.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, Lr longueur du rouleau de surface, Ls position du seuil par rapport au pied du ressaut, L_{RF} longueur du rouleau de fond aval, L_B distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval. 23
Figure I.19: Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_A = f(F1, S)$ 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).....24
Figure I.20: Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées YB = f (F1, S). Même notation que la (Figure 1.19). 25
Figure I.21: Ressaut forcé type B-min. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_{B\text{-}min} = f(F_1, S)$ Même notation que la (Figure 1.19).....25
Figure I.22: Longueur relative λB = f(F1) 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. 27
Figure I.23: Longueur relative λ S = f(F1) 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. 27

Figure II.1: Configuration du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée .30
Figure II.2 : Le rapport de Y, calculé par (2.4), varie en fonction de F_1. (−−−):β=1. 32
Figure II.3 : Le rapport de Y varie en fonction de F_1, (o) : expression (2.6), (+) : expression (2.4). ...33
Figure II.4: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1. 34
Figure II.5: Variation de η en fonction de F_1. (o) : équation (2.7), (*)avec frottement. 34
Figure II.6 : Configuration du ressaut contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire de forme composée.....35
Figure II.7: Le canal ayant servi à l'expérimentation (F. Riguet et al 2019).....37
Figure II.8 : Le rapport des hauteurs conjuguées Y varie en fonction de Froude F_1 pour le canal composée. (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustements.....38
Figure II.9: La représentation de la longueur relative Lj/h_1 du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude F_1, (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'rouleur de surface. 39
Figure II.10: Représentation de la longueur relative Lr/h_1 du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude F_1, (○) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....40
Figure III.1: Schéma simplifié du canal de mesure de section droite rectangulaire de forme composée, ayant servi à l'expérimentation. 42
Figure III.2 : : Photographie du model expérimentale du cana (vu latérale) 43
Figure III.3 : Photographie du model expérimentale du canal (vue plan). 43
Figure III.4 : Pompe centrifuge axiale (pompe principale).....44
Figure III.5 : Deuxième pompe (pompe de renforcement). 44
Figure III.6 : Raccordement des pompes. 45
Figure III.7 : Photographie d'une boite en charge. 45
Figure III.8 : Photographies de la convergent (la hauteur de l'ouverture =2cm).....46
Figure III.9 : Photographie d'un vérin manuel et vanne de manipulation. 46
Figure III.10 : Photographies des limnimètres qui sont utiliser dans le model.....47
Figure III.11 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique. 48
Figure III.12 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit. 49
Figure III.13 : Photographie des seuils minces testés. 50
Figure III.14 : Support du seuil. 50
Figure IV.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil en canal composé droit. 53
Figure IV.2 : Différentes configurations du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince, obtenues à débit croissant pour une position de seuil x = 233 cm, une hauteur initiale h1 = 2 cm et $\Delta x \approx 5$ cm. .56

Liste des tableaux

Tableau I.1 : valeurs expérimentales de rapports Lr/h_1 du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude Fr_1 pour : $h_2 \leq h_{c0}$ 58

Tableau I.2 : valeurs expérimentales de rapports Lr/h_1 du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude Fr_1 pour : $h_{c0} < h_2 \leq h_{c1}$ 59

Tableau I.3 : valeurs expérimentales de rapports Lr/h_1 du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude Fr_1 pour : $h_2 > h_{c1}$ 59

Introduction générale

Introduction générale :

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, Khatti et Ashour (2012), F. Riguet, M. Debabeche et A. Ghomri en 2019 qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composé.

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, notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée a largeur variable. 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 rectangulaire de forme composée a largeur variable, seront proposées.

Chapitre I Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

I.1. Introduction

Dans la genèse historique des recherches sur les ressauts hydrauliques, on voit que l'étude en amont dans ce domaine était basée sur le modèle du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, et que, par conséquent, le ressaut hydraulique classique a été le point de départ des recherches en hydraulique.

La transition d'un régime torrentiel en régime fluvial est assurée par le ressaut, qui dissipe une grande quantité d'énergie hydraulique en écoulement brusquement varié. Le nombre de Froude F1 est un nombre adimensionnel qui définit l'écoulement en amont du ressaut. 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 F1. 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 Lr* de son rouleau ainsi que par la longueur Lj* 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_{1-2}, 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.

À la fin de ce chapitre, nous aborderons le ressaut hydraulique contrôlé et forcé par seuil dans un canal rectangulaire. Les travaux les plus récents effectués dans ce domaine, sont ceux de Forster et Skrinde (1950), et ceux de Rand (1957) et Bretz (1988). Nous

représenterons la relation reliant le rapport des hauteurs conjuguées Y, le nombre de Froude F_1, et la hauteur relative S du seuil. Nous aborderons aussi leurs approches sur l'écoulement franchissant un seuil continu à paroi mince et le seuil contenu à paroi épaisse.

I.2. Definition

Le ressaut hydraulique est une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement permanant, qui se produit lors du passage du régime torrentiel au régime fluvial. Il est accompagné d'une agitation marquée et de grandes pertes d'énergie (figure1.1) L'écoulement en amont du ressaut est caractérisé par un nombre adimensionnel, c'est le nombre de Froude F_1 (pour un canal de section droite rectangulaire), qui est donné par :

$$F_1 = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

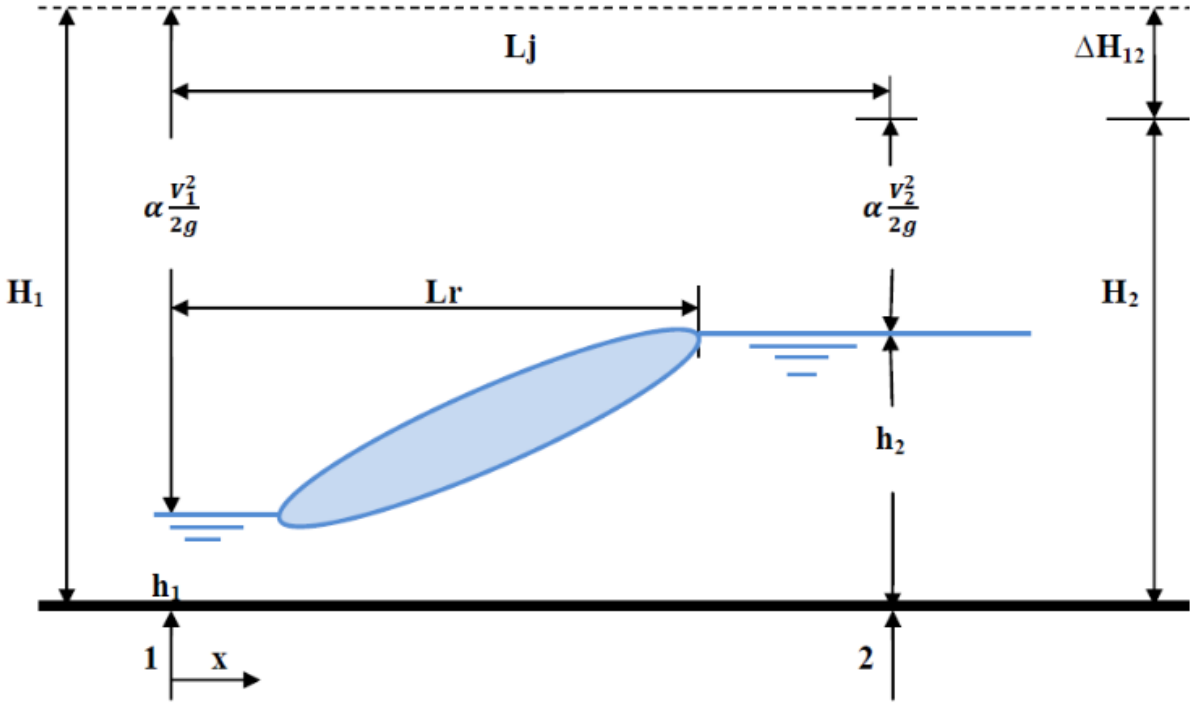


Figure I.1: Ressaut Hydraulique

Les hauteurs h_1 et h_2 sont appelées profondeurs conjuguées du ressaut. La distance Lj entre la section 1 et 2 est appelée longueur du ressaut et la distance Lr est appelée longueur du rouleau du surface. La perte de charge est représentée par $\Delta H_{1\text{-}2}$.

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 nulle 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, il n'y a pas de ressaut. Pour des valeurs de nombre de Froude comprises 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 légère rides à la surface libre, aspect qui diffère peu de celui que l'on observe dans le régime critique, c'est le ressaut ondulé (figure 1.2.a)

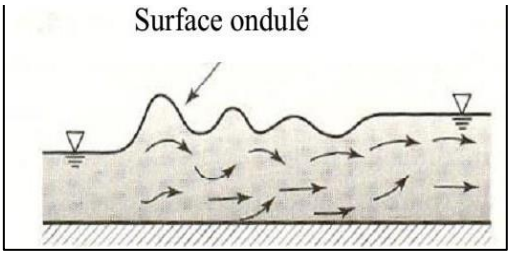


Figure I.2 a: Ressaut ondulé

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).

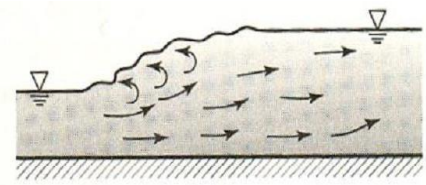


Figure I.2.b: Le pré-ressaut

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

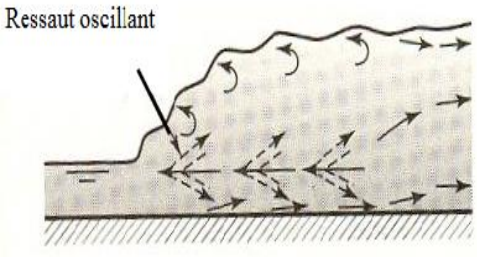


Figure 1.2.c : Le ressaut de transition

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).

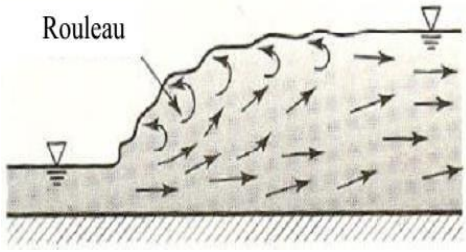


Figure 1.2.d: Le ressaut stable

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).

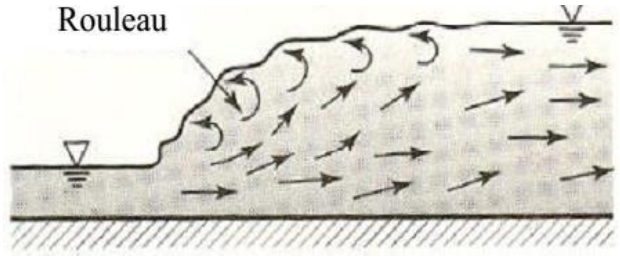


Figure 1.2.e: Le ressaut clapoteux

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 n'est pas connu et que les formules du régime uniforme d'Euler qui permet de résoudre ce problème. Considérons un ressaut classique évoluant entre la section initiale et finale respectivement 1 et2 (figure 1.3).

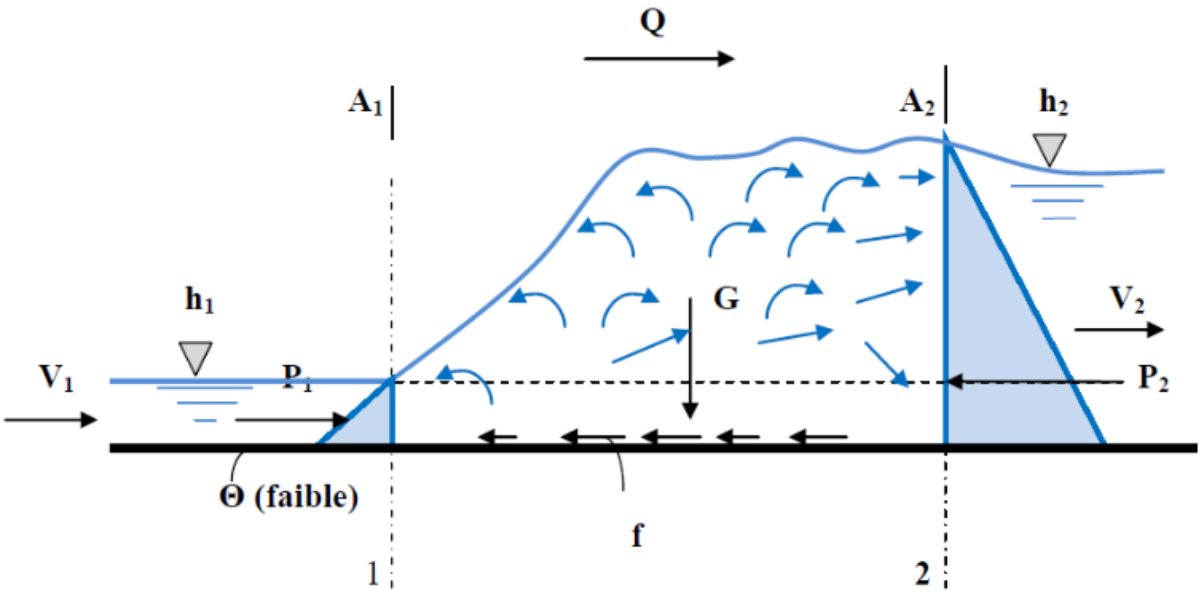


Figure I.3: Représentation des forces agissantes sur le ressaut

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

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

D'après le résultat classique dû à Bélanger (1828) qui s'obtenait 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 crée 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, considérées uniformes.
- La résistance de l'aire est négligeable.

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

$$\beta_2.\rho.Q.V_2 - \beta_1 \cdot \rho.Q.V_1 = P_1 - P_2 + G.\text{Sin}\ \theta - f \quad (1.3)$$

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 θ = 0°)

f : force de frottement (considérée comme négligeable).

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

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

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

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

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

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

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).

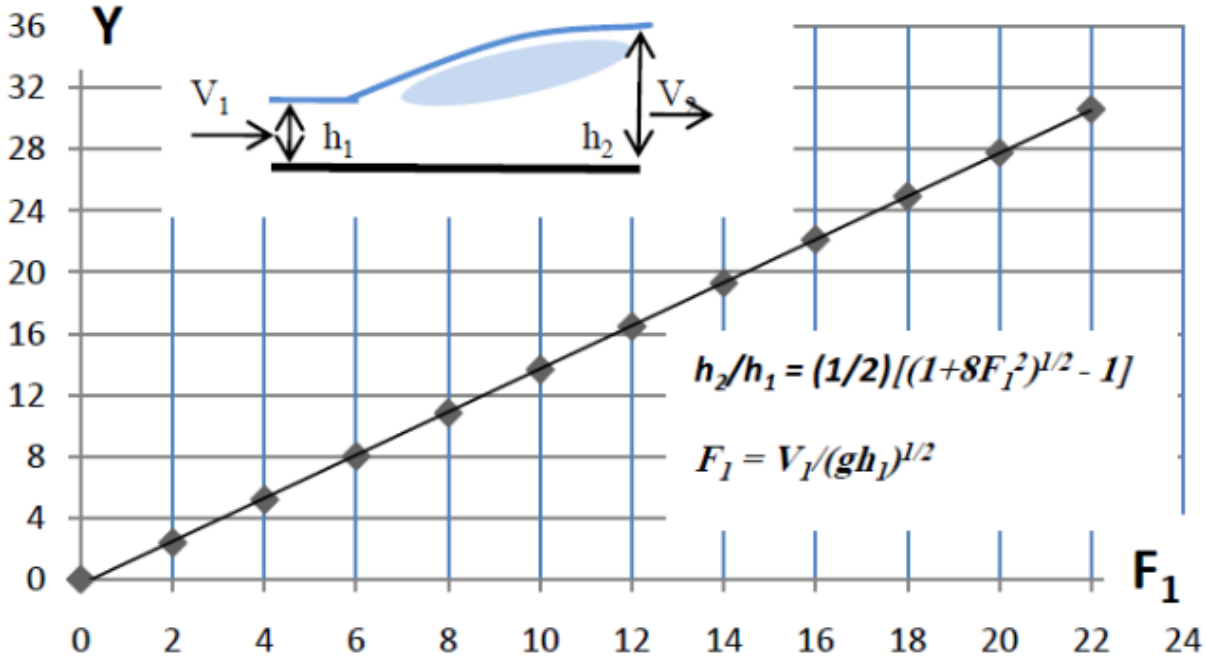


Figure I.4: Représentation graphique de l'équation de Bélanger (1828)

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

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

I.3.3 Caractéristiques géométriques du ressaut

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

I.3.3.1 Hauteur du ressaut

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

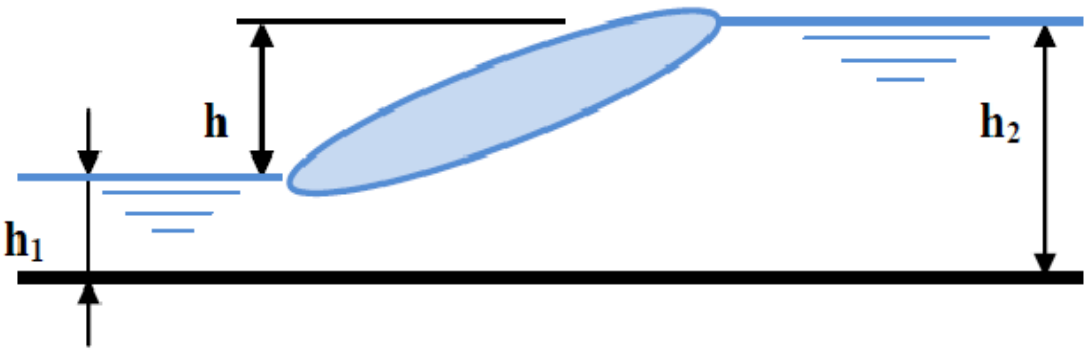


Figure I.5 : : Hauteur du ressaut Longueur du rouleau

En 1990 Hager et al. Définissent deux types de longueur du rouleau tous dépondent de la 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 Lr qui correspondent.

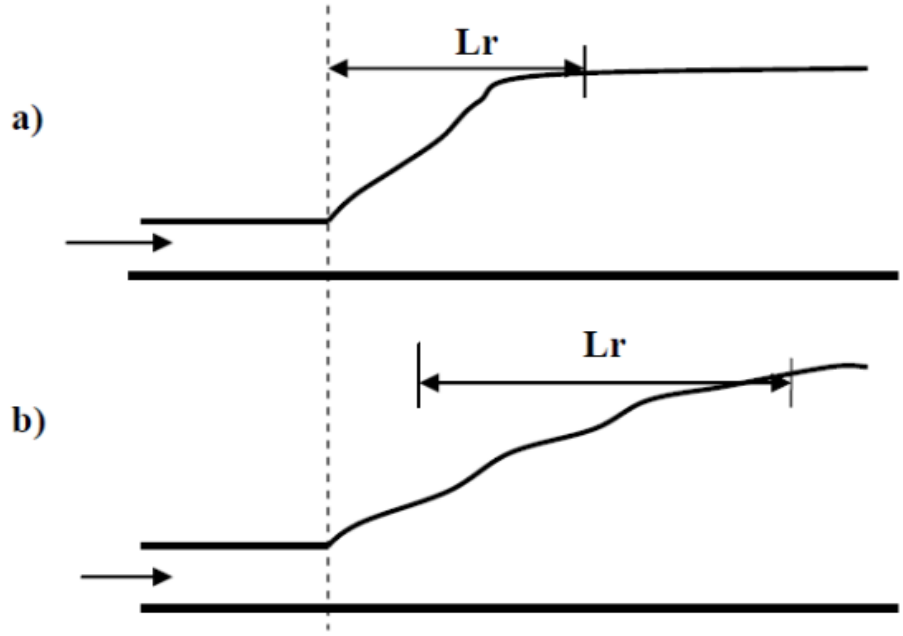


Figure I.6: Aspect du ressaut classique a) Rouleau développé b) Rouleau non développé

La forme générale du rouleau développé est presque uniforme (figure 1.6.a). Par contre le rouleau non développé est présenté par une surface libre perturbée sous l'effet des vagues qui se forment à l'aval (figure 1.6.b).

Les résultats expérimentaux de Hager et al. (1990) ont permis de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur relative du rouleau de surface du ressaut, peut s'écrire :

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

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

Où

$$W = \frac{h_1}{b} \quad et \quad \lambda_r = \frac{L_r}{h_1}$$

Le rapport λ_r est lié au nombre de Froude F_1 et au rapport d'aspect.

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 la relation suivante :

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

I.3.3.2 Longueur du ressaut

Les longueurs caractéristiques du ressaut définies ci-dessus L_r et L_j sont très difficiles à déterminer. Dans ce cas les auteurs ont employé la voie expérimentale pour évaluer ces grandeurs. Hager et al. (1990) ont proposé une relation permettant d'évaluer la longueur L_j du ressaut, peut s'écrire comme suite :

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

D'après Hager et al. (1990), la variation de la longueur relative Lj h2 en fonction du nombre de Froude F1 montre que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à 6 pour une gamme pratique $4 < F_1 < 12$ on peut écrire :

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

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

- Formule de Smetana (1933) $L_j = 6(h_2 - h_1)$ (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.3.3.3 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, $\Delta H_{1\text{-}2} = H_1\text{-}H_2$ produite par le ressaut en admettant que $Z_1 = Z_2$, (figure 1.7), on obtient :

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

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 avaldu ressaut et le facteur de correction de l'énergie cinétique α est admis égale à l'unité.

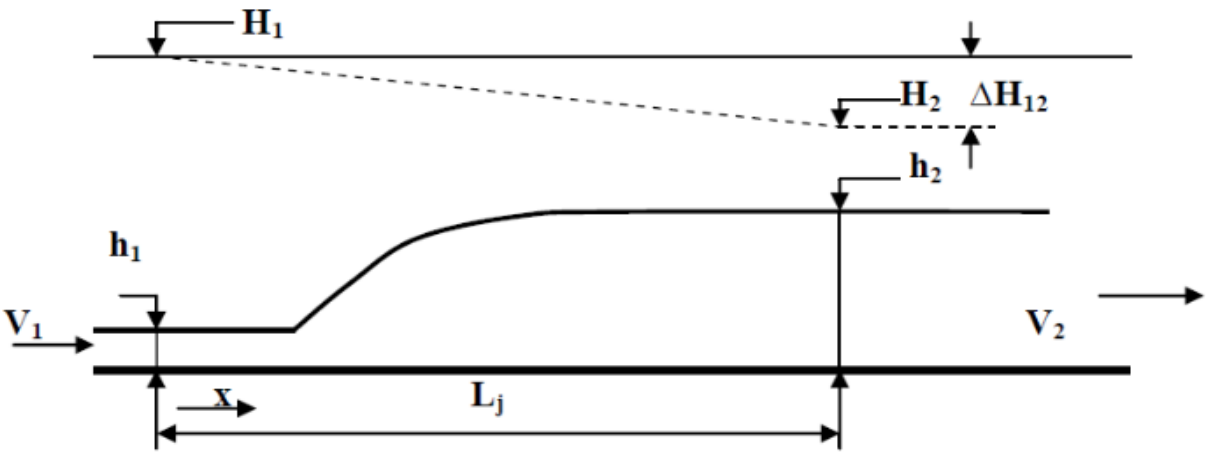


Figure I.7: (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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

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

Où : $A_1 = b.h_1$

$A_2 = b.h_2$

Donc en introduisant la relation (1.18) dans (1.15) on obtient une expression classiquede la perte de charge due au ressaut en canal rectangulaire de pente faible ou nul est :

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

$q = \frac{Q}{b}$, est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'expression de la

quantité demouvement définie par la relation (1.4).

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

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

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

Donc à partir de la relation (1.20) on peut conclure que la perte de charge dûe au ressaut classique ne dépend que des hauteurs conjuguées. La capacité de dissipation du ressaut est représentée par η :

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

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 :

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

$$H_2 = h_1 . \left[Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}\right] \tag{1.24}$$

Où Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique définit par la relation (1.6) de Bélanger (1828).

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

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

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 $F_1 > 2$.

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

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

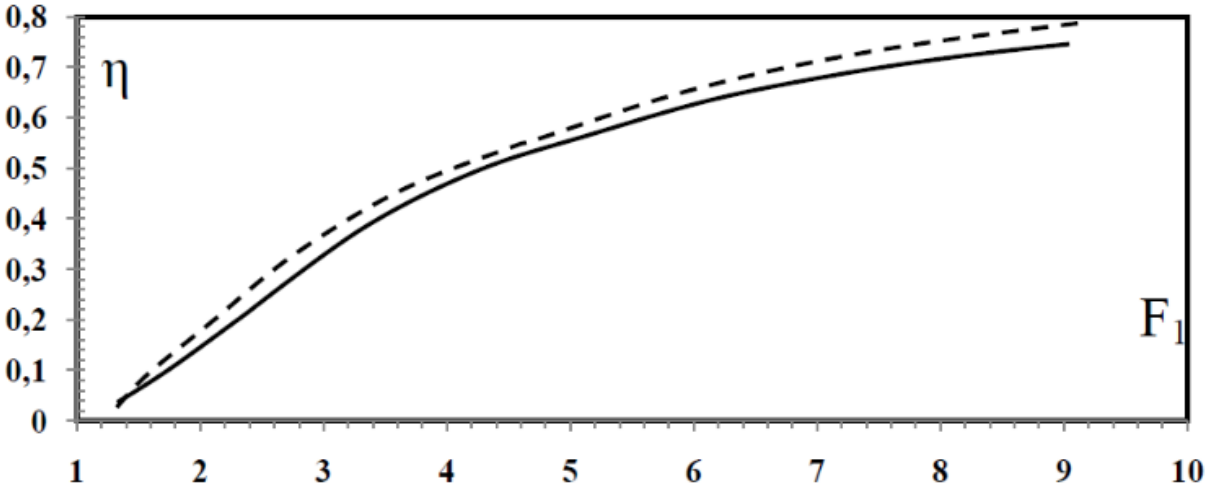


Figure I.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F1, (—) Courbe tracée selon la relation (1.25), (-----) courbe tracée Selon la relation (1.26).

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 $F_1 \geq 5$ 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 part ; 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 F1 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).

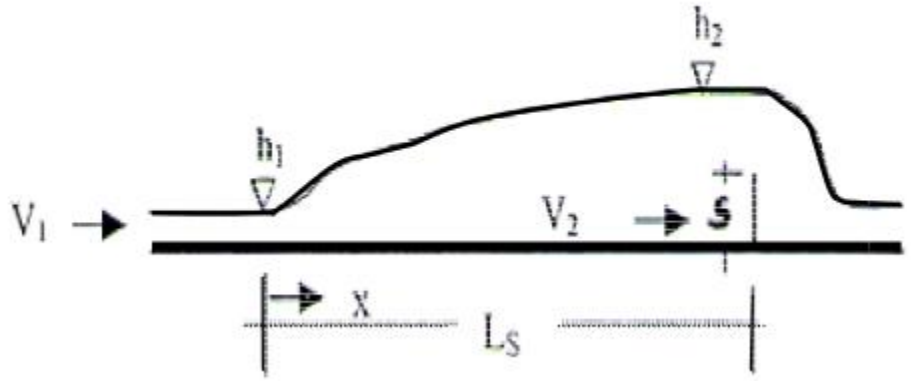


Figure I.9: Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

Le seuil de hauteur s est dénoyé et fonctionne comme un déversoir ; la profondeur h3 de l'écoulement à l'aval n'a ainsi aucune influence sur le débit franchissant le seuil. Cette condition est satisfaite lorsque :

$$h_3 < h_2 - 0{,}75.s \qquad (1.27)$$

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

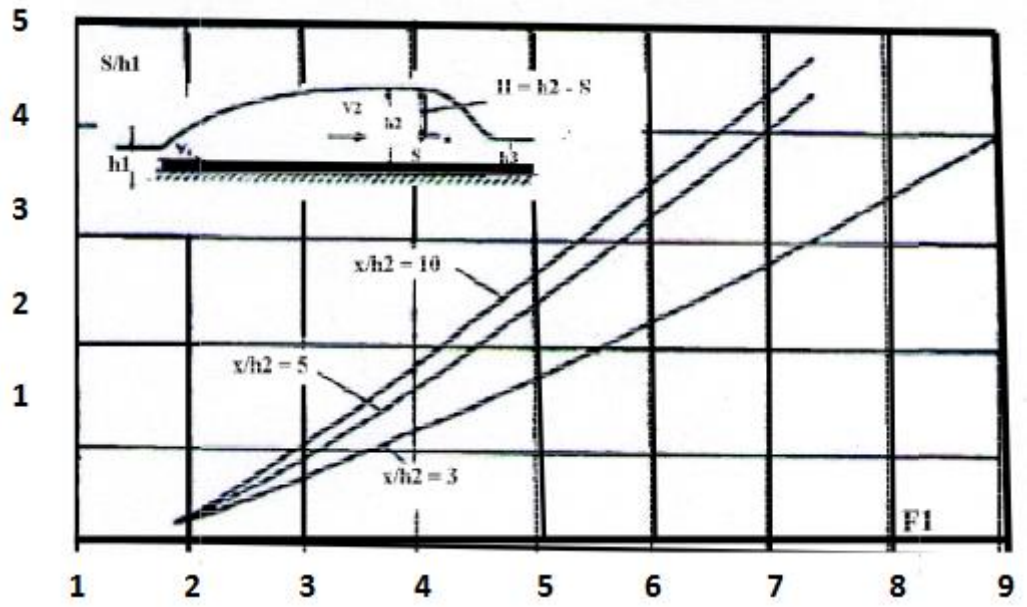


Figure I.10: Variation expérimentale du nombre de Froude F1 en fonction de la hauteur relative s/h1 du seuil à paroi mince quelques valeurs de x/h2, selon Forster et Skrinde (1950)

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 :

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

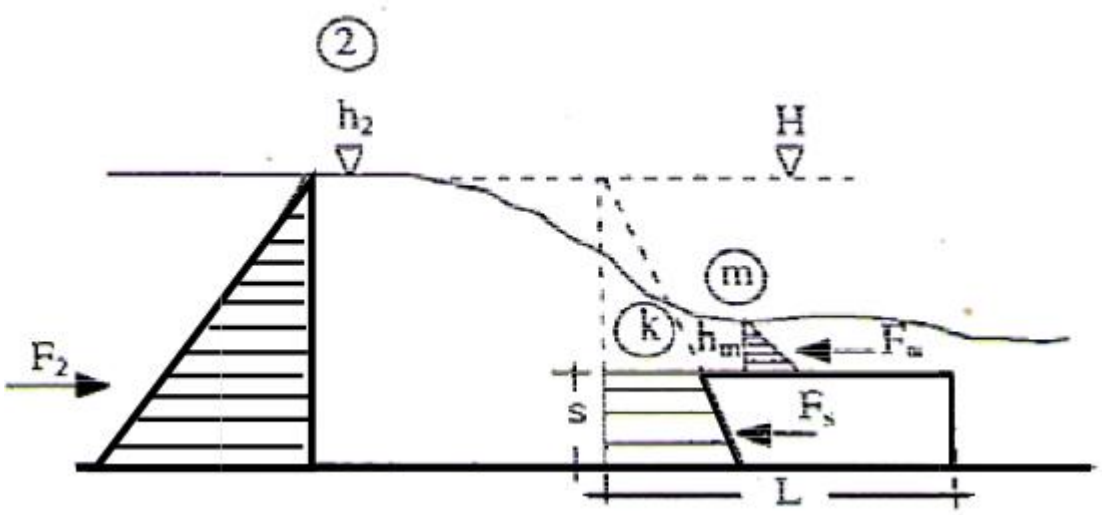


Figure I.11 : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L. Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions

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

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

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

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:

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

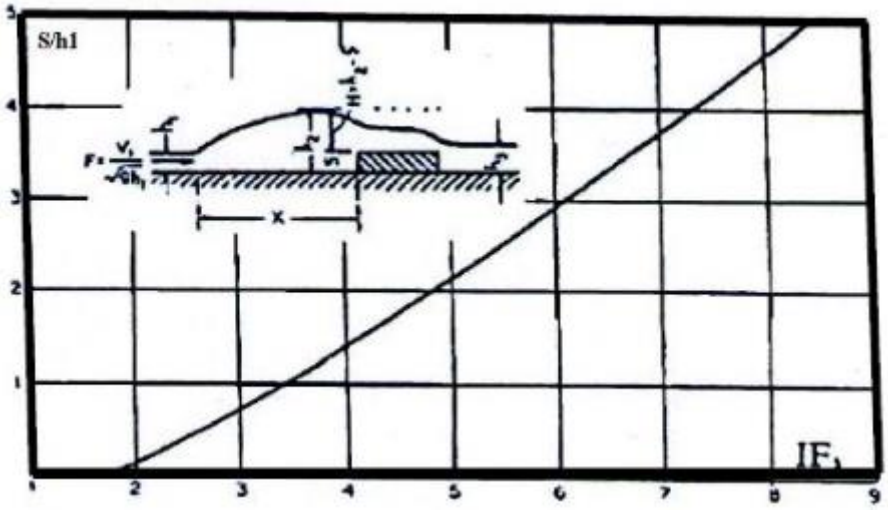


Figure I.12: Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation (1.30)

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.

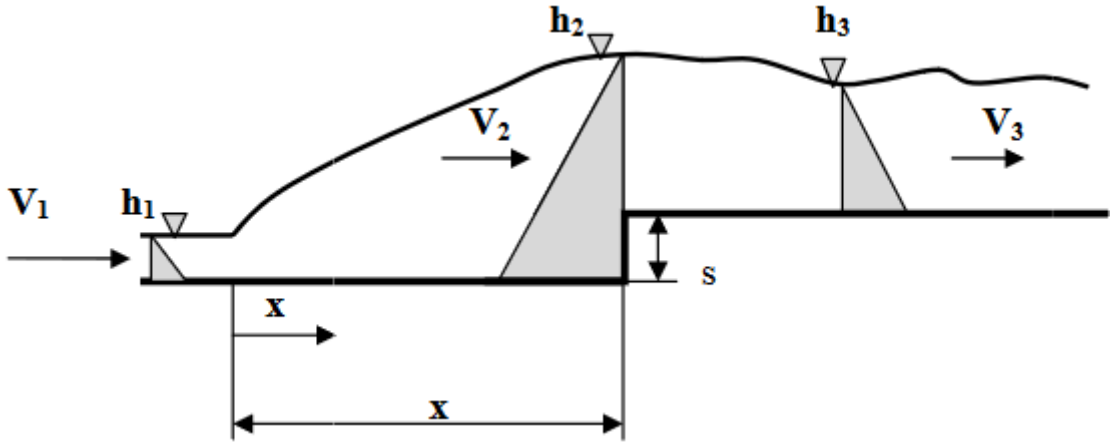


Figure I.13: Ressaut forcé par marche positive de hauteur ''s'', les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions

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.

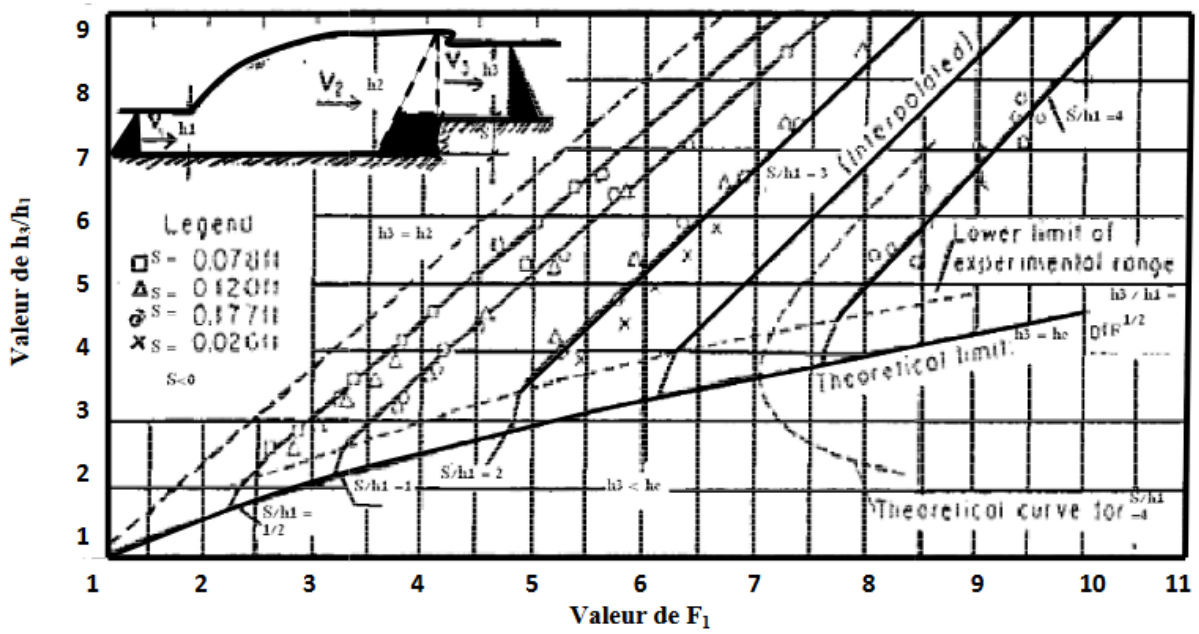


Figure I.14: Variation du nombre de Froude F_1, en fonction de h_3/h_1 et de la hauteur relative s/h_1 de la marche positive, selon Forster et Skrinde (1950)

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 Ls, min.
2. Position intermédiaire L_s.
3. Position maximale $L_{s\,max}$.

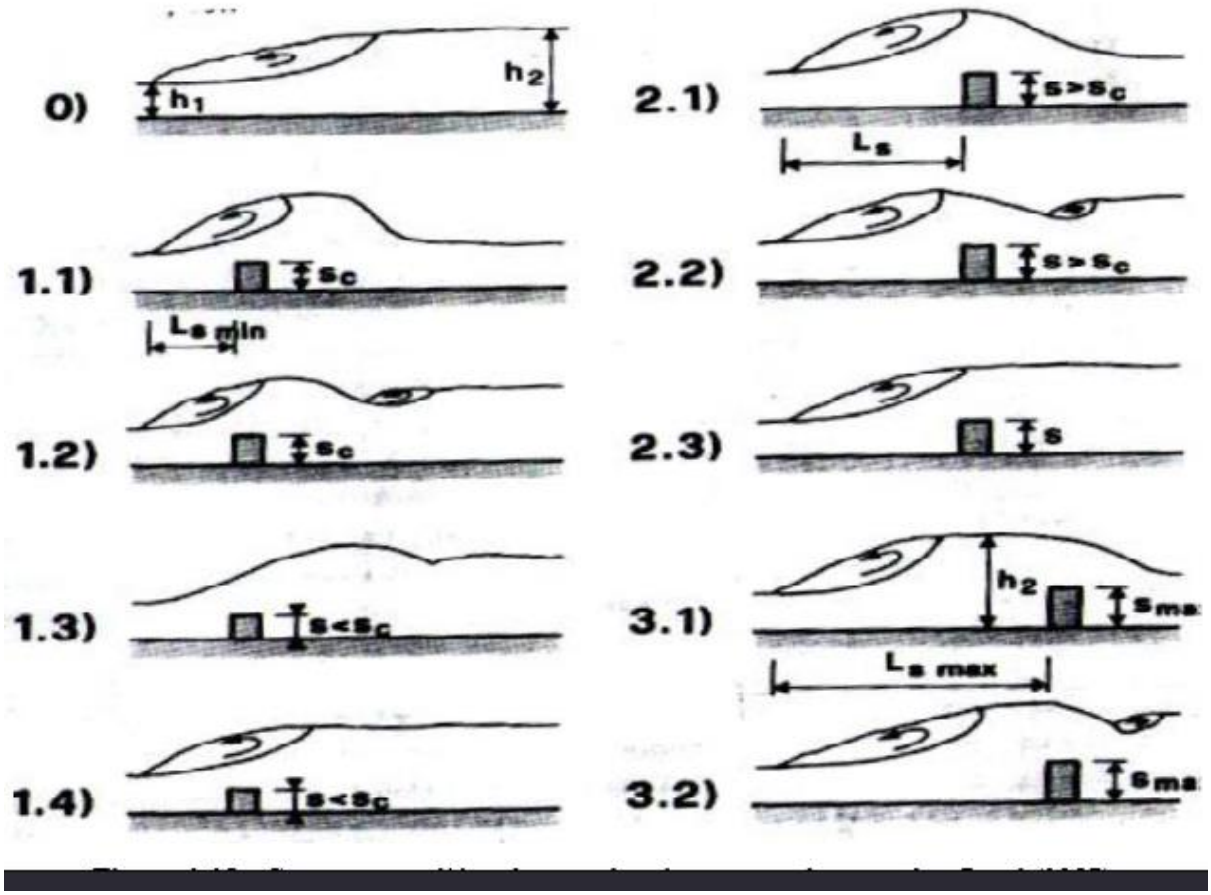


Figure I.15: Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes selon Rand (1957) : 0) Ressaut classique avec hauteurs conjuguées h_1 et h_2 ; 1) class 1, longueur Ls,min. ; 2) class 2, longueur intermédiaire L_s ;3) class 3, longueur $L_{s,max}$. ; s : hauteur du seuil, s_c : hauteur critique du seuil et s_{max} : hauteur maximale du seuil.

Afin de décrire tous les cas, Rand (1957) a défini un facteur de position :

$$K = \frac{\left(\frac{L_S}{h_1}\right) - \left(\frac{L_S}{h_1}\right)_{min}}{\left(\frac{L_S}{h_1}\right)_{max} - \left(\frac{L_S}{h_1}\right)_{min}} \tag{1.31}$$

Variant 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 disparaitre 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 diverses 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.

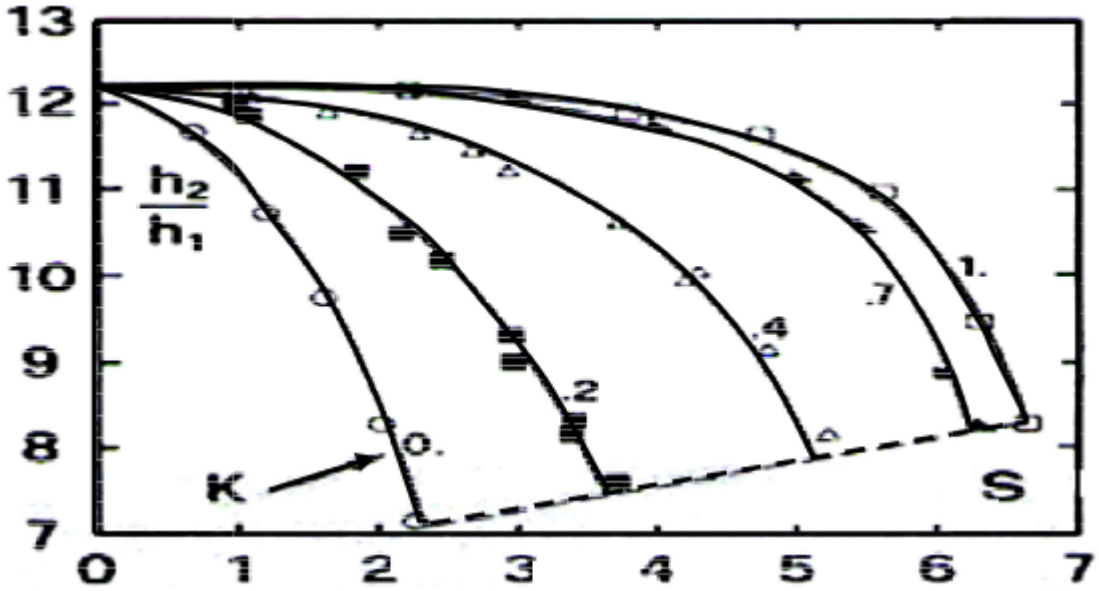


Figure I.16 Hauteurs conjuguées $h_2/h_1 = f(S, K)$ pour $F_1 = 9$. Valeurs et courbes expérimentales : (----) limite d'influence de l'aval sur l'amont.

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)

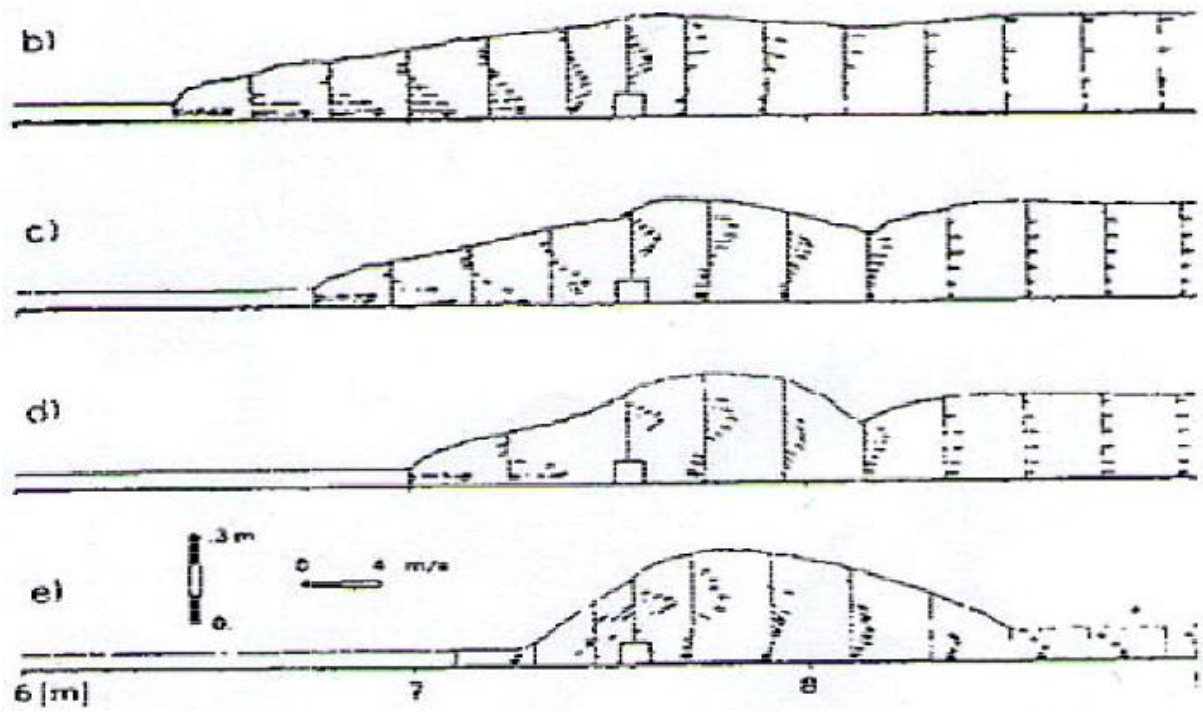


Figure I.17: Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour F1 = 5,23 et S = 1,42. 1) Ressaut type A ; 2) Ressaut type B ; 3) Ressaut type Bmin ; 4) Ressaut type C et 5) onde. (Bretz, 1987).

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

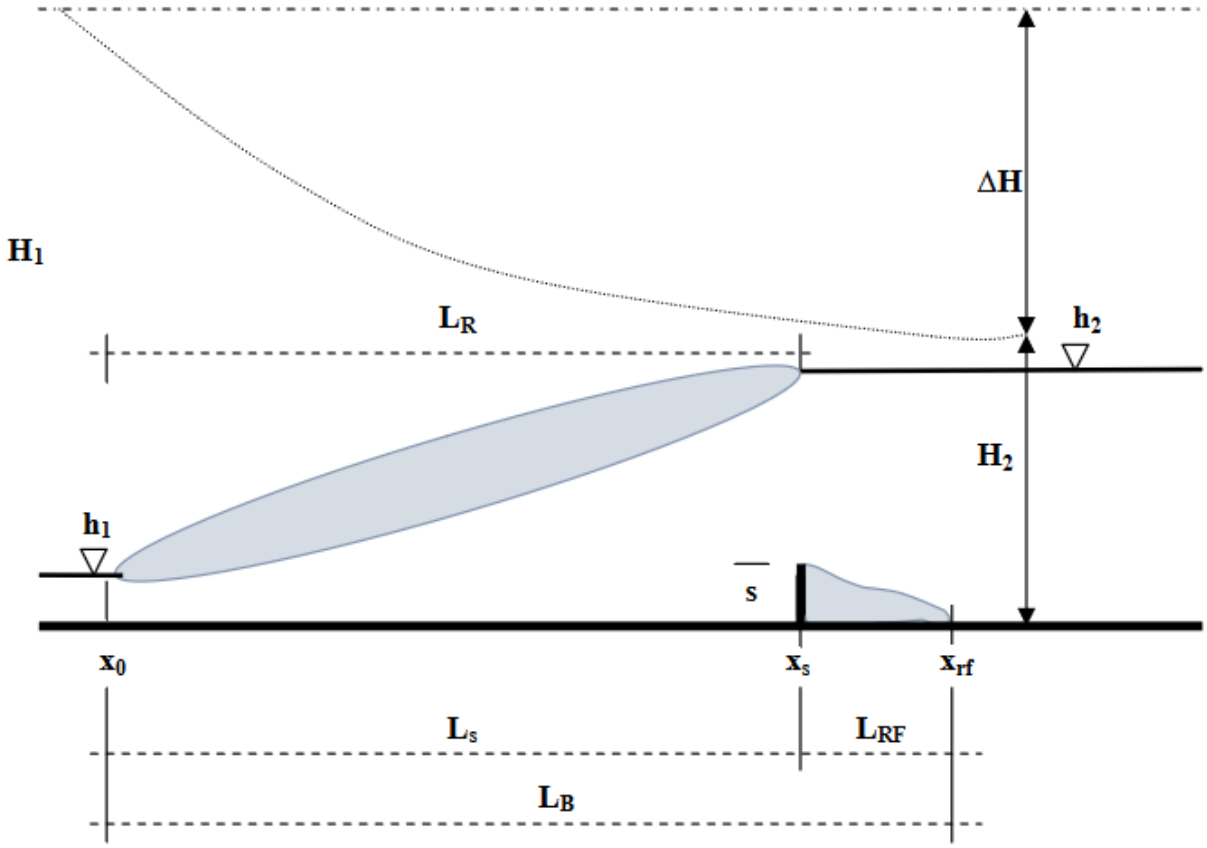


Figure I.18: ressaut forcé par seuil selon Bretz (1965) : définition des termes. H_1 charge amont, H_2 charge aval, ΔH perte de charge, h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x_0 position du pied du ressaut, x_s position du seuil, x_{rf} position de la fin du rouleau de fond à l'aval, Lr longueur du rouleau de surface, Ls position du seuil par rapport au pied du ressaut, L_{RF} longueur du rouleau de fond aval, L_B distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval.

Dans le but d'augmenter le nombre de Froude F1 et de pouvoir simultanément contrôler la hauteur d'eau amont h1 , 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 H0 , hauteur d'eau aval h2 , 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 :

$$Y_A = 1{,}307F_1 - 0.4S^{0{,}85} - 0{,}142 \qquad (1.32)$$

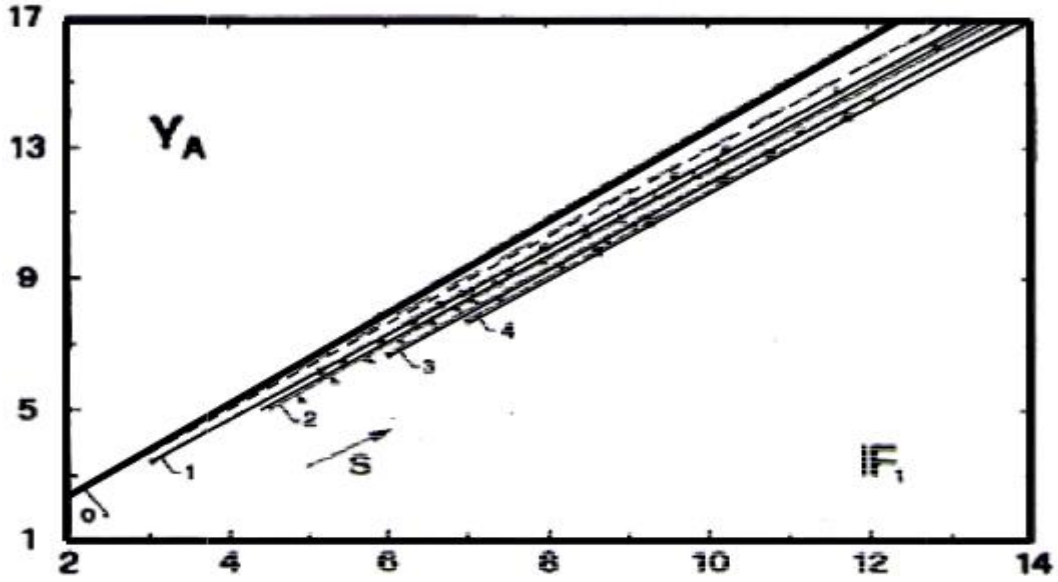


Figure I.19: Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_A = f(F1, S)$ avec $0{,}5 \leq S \leq 6$. $S = s/h_1$ (—) courbe selon l'équation de Bélanger. (----) courbe du ressaut classique selon l'équation (1.32)

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 :

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

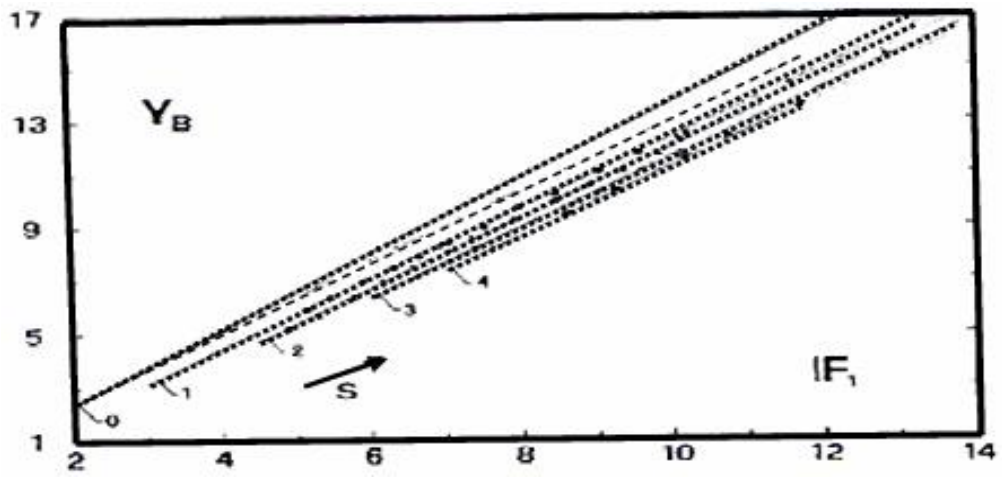


Figure I.20: Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées YB = f (F1, S). Même notation que la (Figure 1.19).

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 :

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

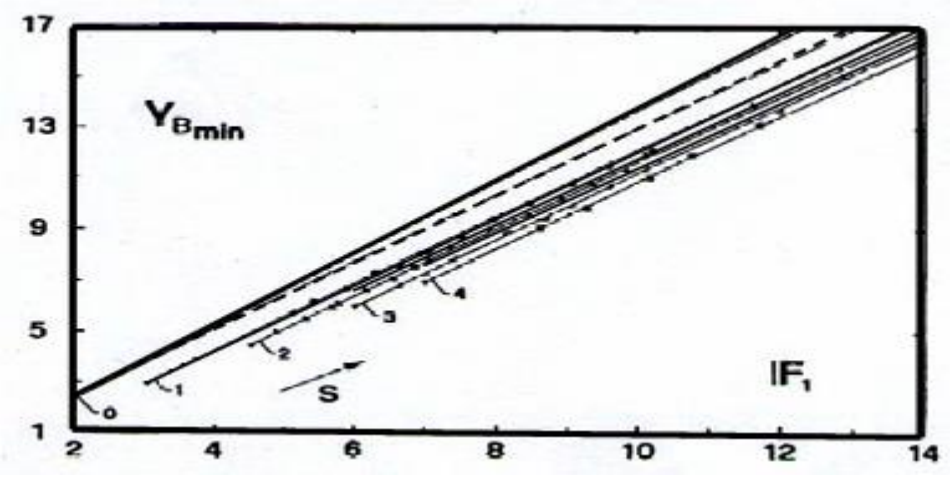


Figure I.21: Ressaut forcé type B-min. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_{B\text{-}min} = f(F_1, S)$ Même notation que la (Figure 1.19)

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 :

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

YF est données 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 $\Delta Y_S = \alpha.Y_S^{\beta}$. 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 λB = LB/h1 et la position relative du seuil λS = LS/h1, en fonction du nombre de Froude F1, sont représentées dans la figures (1.22) et la figure (1.23).

Pour les trois types du ressaut forcé, λS croit quasi linéairement avec F1, la pente de la courbe étant plus forte pour le type A et la moindre pour le type B-min. Quand à λB, les courbes présentent une pente plus forte que celle pour λS.

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 $5 \leq F1 \leq 13$:

- Ressaut forcé type A $\lambda=6{,}27F-5{,}75$ (1.36), $\lambda=8{,}68F-11{,}23$ (1.39)
- Ressaut forcé type B $\lambda=5{,}29F-5{,}37$ (1.37), $\lambda=8{,}44F-12{,}96$ (1.40)
- Ressaut forcé type B-min $\lambda=4{,}64F-4{,}84$ (1.38), $\lambda=6{,}93F-6{,}83$ (1.41)

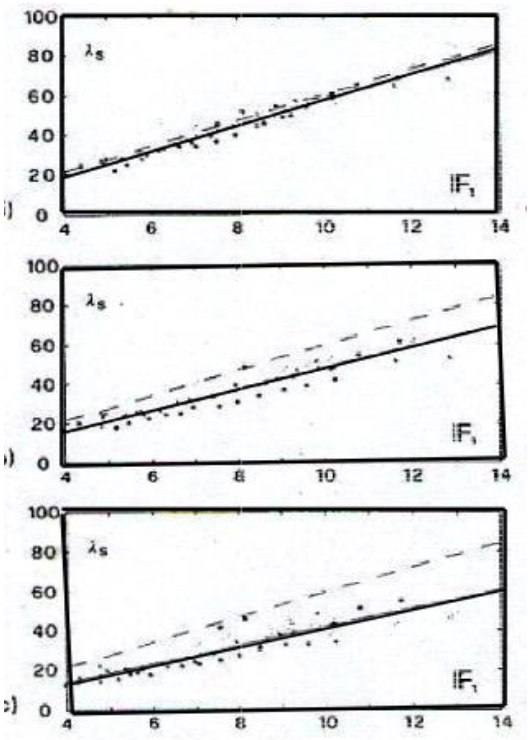


Figure I.23: Longueur relative λ S = f(F1) pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B -min . (—) courbe selon l'équation: a) (1.36), c) (1.37) et (1.38) respectivement.

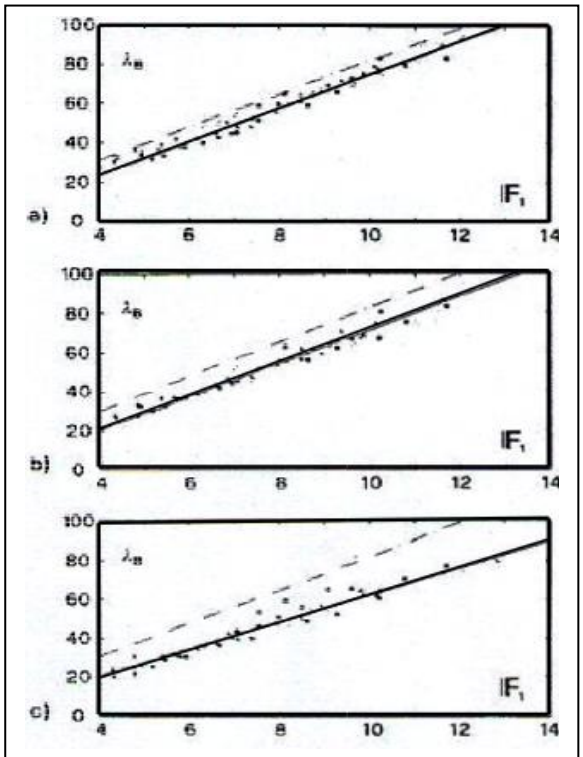


Figure I.22: Longueur relative λB = f(F1) pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B-min. (—) courbe selon l'équation : a) (1.39),b) (1.40) et c)(1.41) respectivement.(----) courbe limite.

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.

Chapitre II Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée

II.1. Introduction

Deux axes seront traités pour ce présent chapitre, pour le premier axe, l'approche théorique sera présentée par Khattoui et Achour en 2012 concernent le ressaut hydraulique en lit composé, le deuxième sera consacré à l'étude expérimentale la plus récente de F. Riguet, M. Debabeche et A. Ghomri en 2019 reflétant l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée.

II.2. APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR 2012

II.2.1 Les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique

La figure ci-dessous (II.1) indique les caractéristiques hydrauliques et géométriques du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de forme composée.

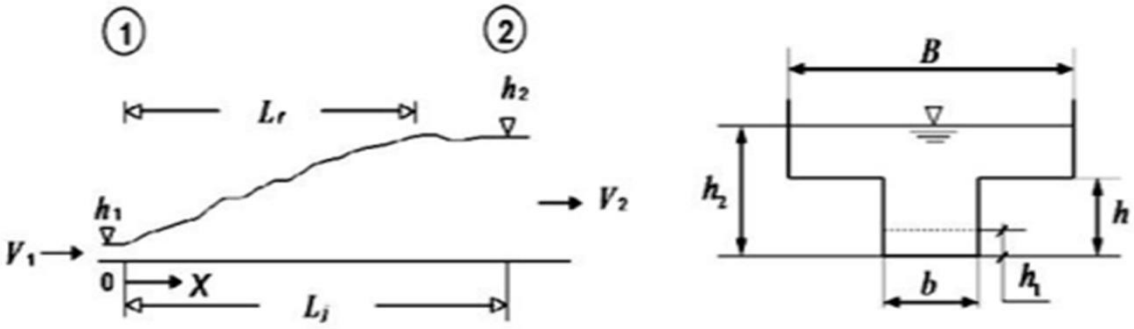


Figure II.1: Configuration du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée

Selon l'auteur (*Bousmar et al. En 2004),* entre le lit mineur et le lit majeur du canal rectangulaire de section composée, un transfert de quantité de mouvement et de masse se produit. Entre le pied et la fin du ressaut hydraulique, la théoriede la quantité de mouvement entre le pied et la fin du ressaut, présenté par la figure II.1, se résume de la manière suivante :

$$\rho Q(P_2V_2 - P_1V_1) = F_1 - F_2 \qquad (2.1)$$

En se penchant sur les travaux de *Achour (2000),* et en utilisant la relation *de Borda-Carnot* et compte tenue l'expression (2.1). Il semble acceptable d'additionner une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement aurait comme relation suivante :

$$f_x = -k\bar{\omega}(h_2 - h)^x h_1^y (B - b)^Z \qquad (2.2)$$

Cette expression représente la perte de charge engendrée par le transfert quantité de mouvement et de la masse entre le lit mineur et celui majeur. Les exposants x, y et z sont exprimées par la relation x+y+z=3, le facteur k s'écrit comme suit: $k = \varphi(L_j \text{ ou } L_r, h_1, h_2, h)$

Tenant compte de l'expression de f_x l'équation de la quantité de mouvement d'Eulerse transforme comme suit :

$$\rho Q^2(1/A_2 - 1/A_1) = f_1 - f_2 + f_x \quad (2.3)$$

Étudions l'équation en prenant compte de cette relation suivante :

$$f_x = (1/2)\bar{\omega}(h_2 - h)h_1(B - b)$$

La supposition de la distribution des vitesses uniforme dans les sections au pied et à la fin du ressaut donne $f3_1=f3_2=1$. Les deux sections A_1 et A_2 sont écrites par: $A_1=bh_1$ et $A_2=B(h_2-h)+bh$. Tenant compte en considération de l'hypothèse qui suppose que la distribution des pressions est hydrostatique pour deux sections 1 et 2 du ressaut, ainsi les deux relations des forces s'écrivent comme suit :

$$f_1 = \bar{\omega}\left(\frac{h_1}{2}\right)bh_1 \text{ Et } f_2 = \bar{\omega}(h_2 - h/2)bh + \bar{\omega}[(h_2 - h)/2]B(h_2 - h).$$

Tenant en considération de ces hypothèses et de la relation de continuité $V_1A_1= V_2A_2= Q$, l'expression (2.3) se transforme après réarrangement de la manière suivante :

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

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

L'équation finale serait, après l'annulation de la force de résistance, comme suit :

$$2F_1^2\left(\frac{\beta}{Y-(1-\beta)/\tau} - 1\right) = 1 - \frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} \quad (2.6)$$

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

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

$Y^3 + pY + q = 0$ Dont la solution sefait facilement par l'utilisation le procédé trigonométrique.

La variation de Y calculé par l'équation (2.6) en fonction deF_1est montrée par la figure (2.2). En faisant changer l'une des deux variables, f3 ou r, est fixée, la deuxième variable change de pas de 0.2. Les valeurs de F1 à prendre en considération doivent être strictement supérieure à la valeur minimale $F_{1\,\min} = [1/(2\sqrt{2})]\sqrt{(2/\tau + 1)^2 - 1}]$ qui correspond à h_2=h, dans le but que le ressaut se produise nécessairement dans le canal de forme composée (h_2>h). On Constate qu'à partir de ces deux figures montrées ci-dessous, que pour un β et τ fixées, Y s'accroit avec l'augmentation de F_1. Lorsque les valeurs de β seront importantes, l'augmentation du rapport Y en fonction de F_1 sera aussi plus rapide. Le rapport Y croit avec l'accroissement de β et diminue avec l'augmentation de τ, Pour un nombre de Froude F_1 fixé,

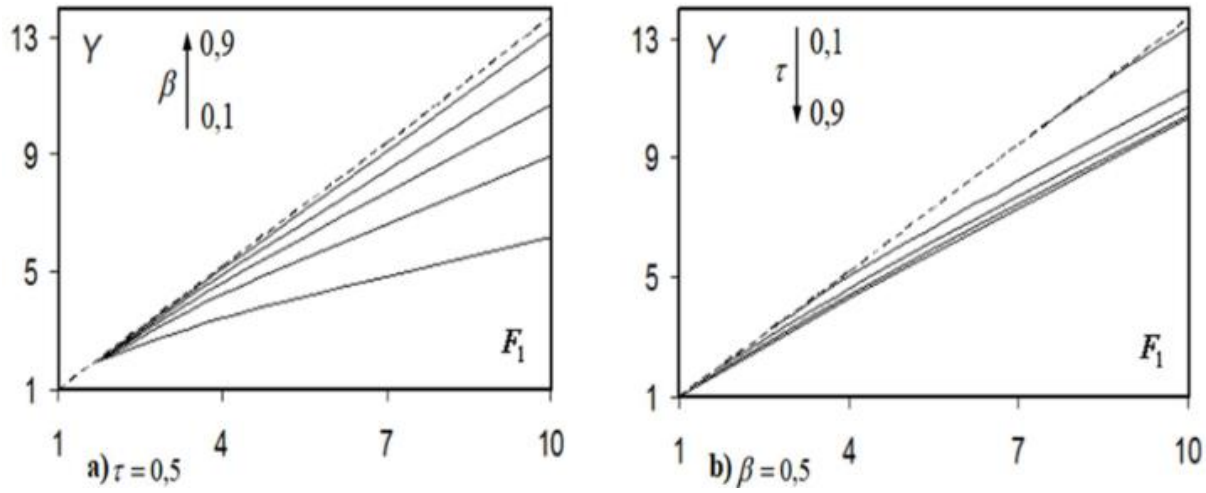


Figure II.2 : Le rapport de Y, calculé par (2.4), varie en fonction de F_1. (−−−):β=1.

La figure ci-dessus montre la variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 avec β = τ = 0,5. On note que les rapports Y calculés selon la relation (2.4) qui tient compte des forces de frottements sont inférieurs à celles calculés de la relation (2.6). Cette baisse est remarquée lorsque le nombre de Froude F_1sera important. La force explique les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

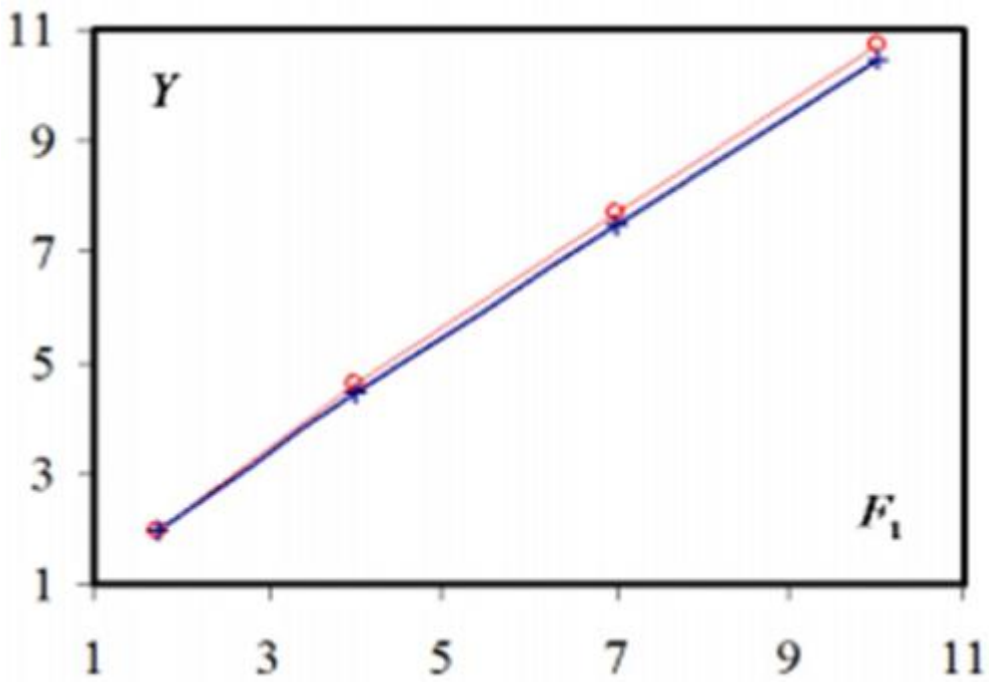


Figure II.3 : Le rapport de Y varie en fonction de F_1, (o) : expression (2.6), (+) : expression (2.4).

II.2.2 Le Rendement du ressaut hydraulique :

Le rendement $\eta = \Delta H / H_1$, peut s'exprimer par l'expression (2.7), en tenant compte les mêmes suppositions que pour le rapport des Y.

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

Cette relation (2.7) permet de calculer explicitement, le rendement du ressaut hydraulique qui se produit en canal rectangulaire de forme composée, en connaissant F_1, Y, β et τ.

En supposant les valeurs de Y qui se calculent par la relation (2.6). La figure (II.4) présente la variation de η variant en fonction de F_1. Pour un τ et un β donnés, il est montré clairement sur cette figure que le rendement η d'un ressaut hydraulique évoluant en canal composé augmente proportionnellement avec l'augmentation de F_1. Pour un τ donné, en fixant F_1, on peut voir facilement que le rendement η qui augmente avec l'accroissement de τ.

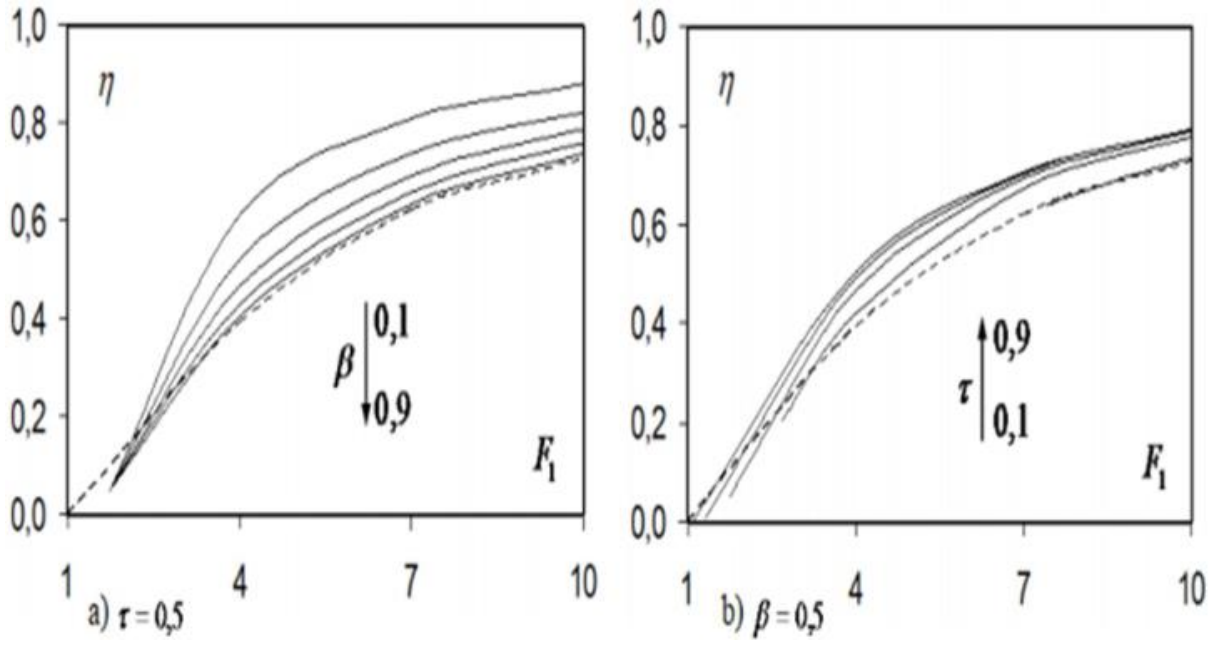


Figure II.4: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1. (− − −) : β=1, η est calculé par l'équation (2.7).

La présentation du rendement η qui varie en fonction du nombre de Froude F_1 pour β=τ=0.5, est mentionnée dans la figure (II.5). Il est remarqué que les rendements η calculés en tenant compte de la force de frottement dépassent ceux calculés sans frottements.

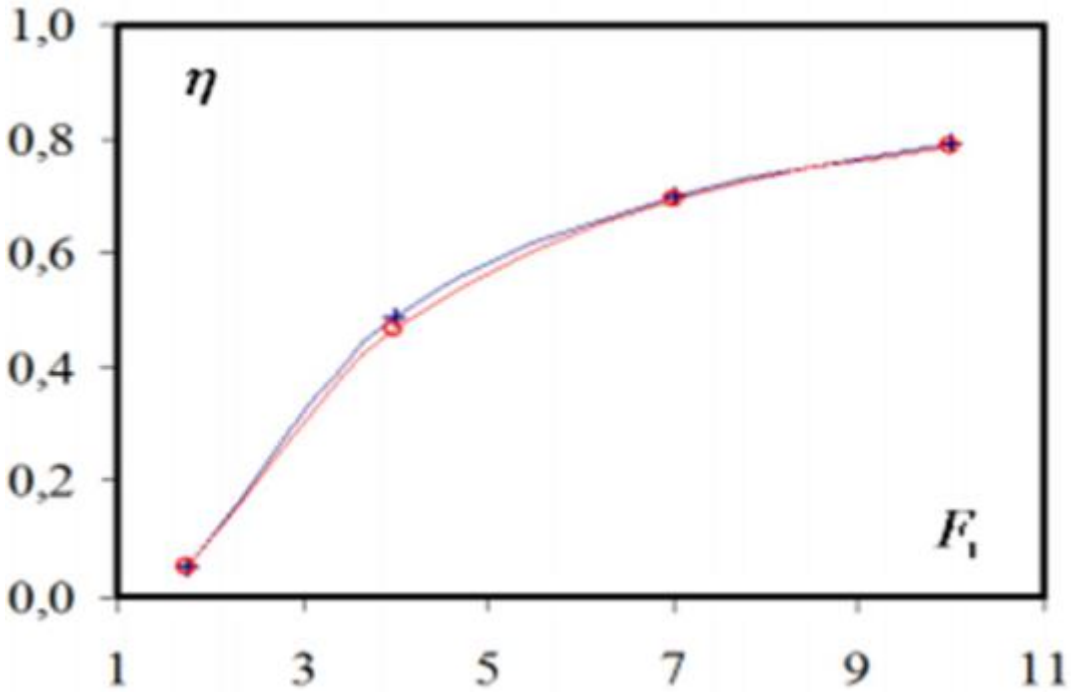


Figure II.5: Variation de η en fonction de F_1. (o) : équation (2.7), (*)avec frottement.

II.3. L'étude expérimentale des caractéristiques du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée

II.3.1 La problématique

Des différentes configurations du ressaut hydraulique peuvent être présentées, avec la modification des conditions à l'amont tel que débits, hauteurs etc… et à l'aval tel que le type d'obstacle, sa position, etc. Le ressaut s'appelle classique quand il se forme dans un canal rectangulaire de pente nulle ou faible, sans obstacle à l'aval. Il s'appelle contrôler quand sa création est conditionnée par un obstacle mis à l'aval de l'écoulement. Il s'appelle forcé quand il se crée de part et d'autre de l'obstacle. L'évolution du ressaut hydraulique peut être formé dans des canaux non prismatiques ou prismatiques, avec lit rugueux ou lisse. Il s'agit pour notre cas le ressaut hydraulique formé par seuil Minc évoluant dans un canal de forme composée avec des différentes ouvertures h_1 (Figure II.6). Pour une ouverture initiale h_1 donné, l'évolution du débit engendre le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation aussi de la longueur de rouleau de surface Lr. La distance Δx sur laquelle le ressaut se forme augmente aussi et pour rendre celui-ci dans sa position initiale, environ à 5 cm de la sortie du convergent, le seuil premier de hauteur « s » doit être augmenté. Par conséquent pour chaque nombre de Froude incident F_1, correspond la longueur du ressaut Lj et la longueur du rouleau de surface Lr, ainsi pour une hauteur h_2 à l'aval du ressaut hydraulique et une hauteur du seuil « s » (Figure II.6).

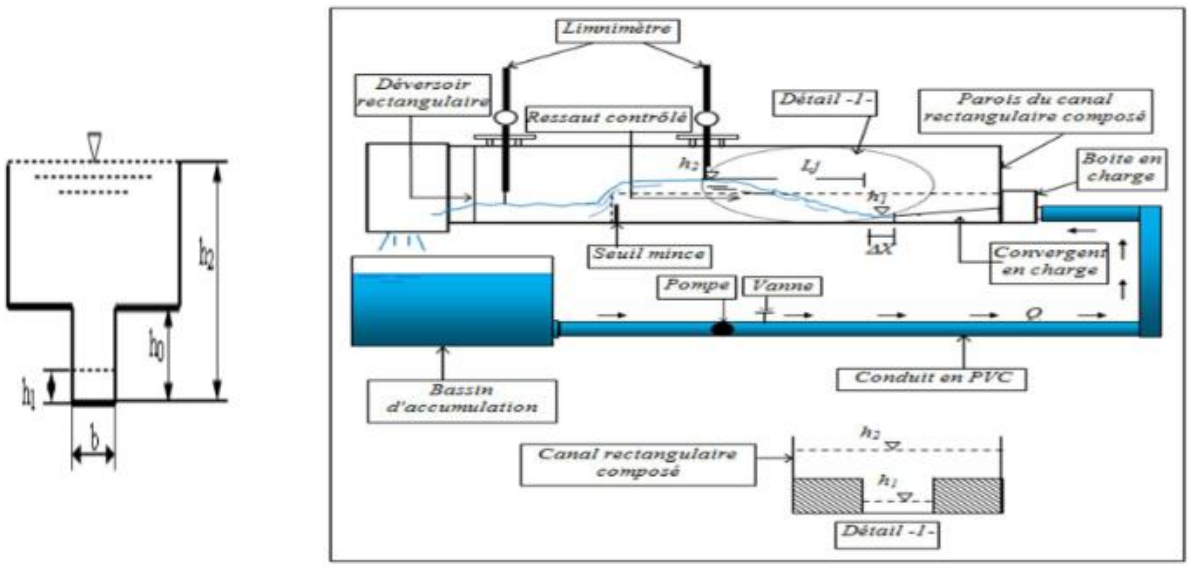


Figure II.6 : Configuration du ressaut contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire de forme composée.

II.3.2 Analyse des essais expérimentaux

Une série de mesures expérimentales ont été obtenues lors de l'expérimentation faite au laboratoire, pour chacune des mesures obtenues intervient au phénomène du ressaut hydraulique formé, a permis aussi, d'aboutir à des résultats fiables. Ces caractéristiques obtenues sont : la hauteur amont h_1, le débit d'écoulement Q, la hauteur du seuil mince « s », la hauteur aval h_2, Ces mesures permettent de composer les produits adimensionnels tel que : le rapport des profondeurs $Y = h_2/h_1$, et le nombre de Froude F_1 :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{b^2 h_1^3 g} \tag{2.8}$$

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

1. La mesure de la hauteur déversant H_{dev} se détermine par le déversoir rectangulaire.
2. La détermination du débit spécifique en appliquant la relation du débitmètre rectangulaire (Hachemi Rachedi L.2006) :

$$Q = 0{,}3794 B\sqrt{2g}\beta(1 + 0{,}16496\beta^{2{,}0716})^{3/2} H_{dev}^{3/2} \tag{2.9}$$

Ou:

Q : Le débit volumique en (m^3/s).

β = b/B: Rapport de l'élargissement.

b : L'échancrure du canal (m).

B : La largeur au miroir du canal (m).

g : l'accélération gravitationnelle (m/s^2).

H_{dev} : La lame déversant en (m).

3. Le nombre de Froude se calcule, par application de l'expression (2.8).
4. La lecture de la hauteur aval h_2 du ressaut hydraulique.

Figure II.7: Le canal ayant servi à l'expérimentation (F. Riguet et al 2019).

II.3.3 Résultats expérimentaux

II.3.3.1 Rapport des hauteurs conjuguées

Y est le rapport de la hauteur aval du ressaut h_2 sur la hauteur amont h_1 tel que $Y = h_2/h_1$. La figure ci-dessous représente la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut variant en fonction du nombre de Froude F_1, pour cinq ouvertures h_1 :2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 et 4cm pour le lit mineur et celui majeur du canal rectangulaire de forme composée.

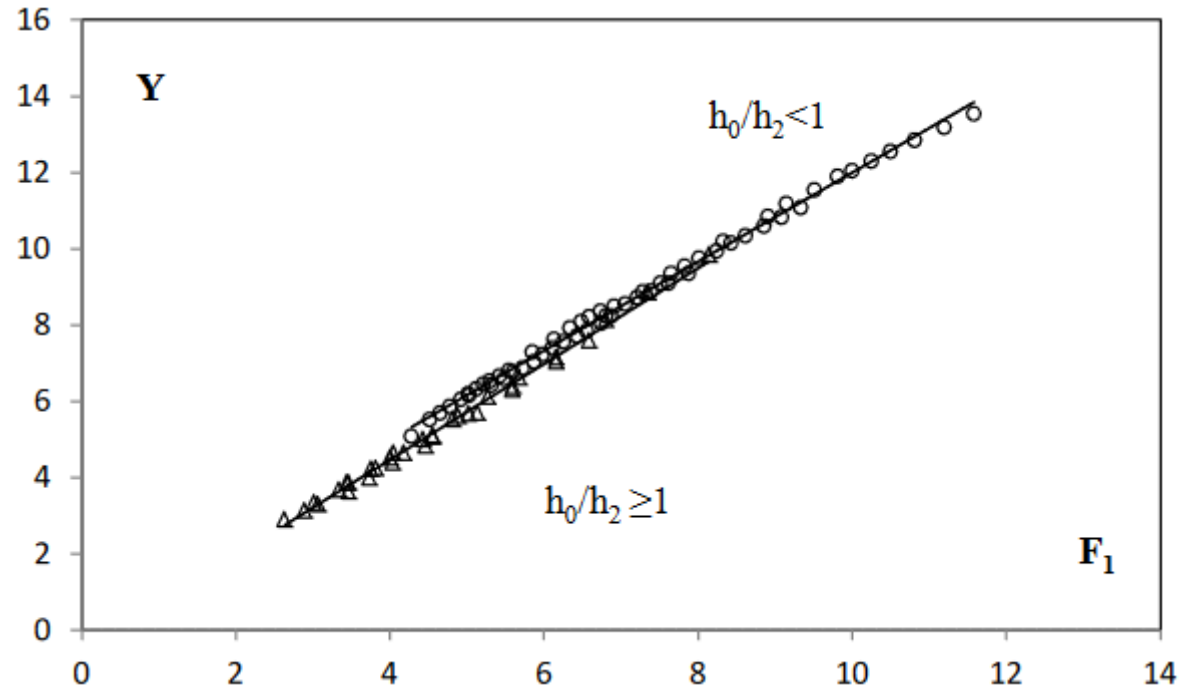


Figure II.8 : Le rapport des hauteurs conjuguées Y varie en fonction de Froude F_1 pour le canal composée. (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustements.

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

Pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $2.64 < F_1 < 8.14$

$$Y = 1{,}258F_1 - 0{,}573 \quad (2.10)$$

Pour $h_0/h_2 < 1$ et $4.27 < F_1 < 11.58$

$$Y = 1{,}165F_1 + 0{,}328 \quad (2.11)$$

II.3.3.2 Les caractéristiques du ressaut hydraulique

II.3.3.2.1 La longueur relative Lj/h_1 du ressaut varie en fonction du nombre de Froude F_1

La longueur du ressaut hydraulique Lj est la distance qui sépare la section amont du ressaut et la section aval. Le but fondamental de cette étude est de mesurer la longueur relative du ressaut hydraulique Lj/h_1 pour une gamme testée.

Cette variation est montrée par la figure ci-dessous (II.9).

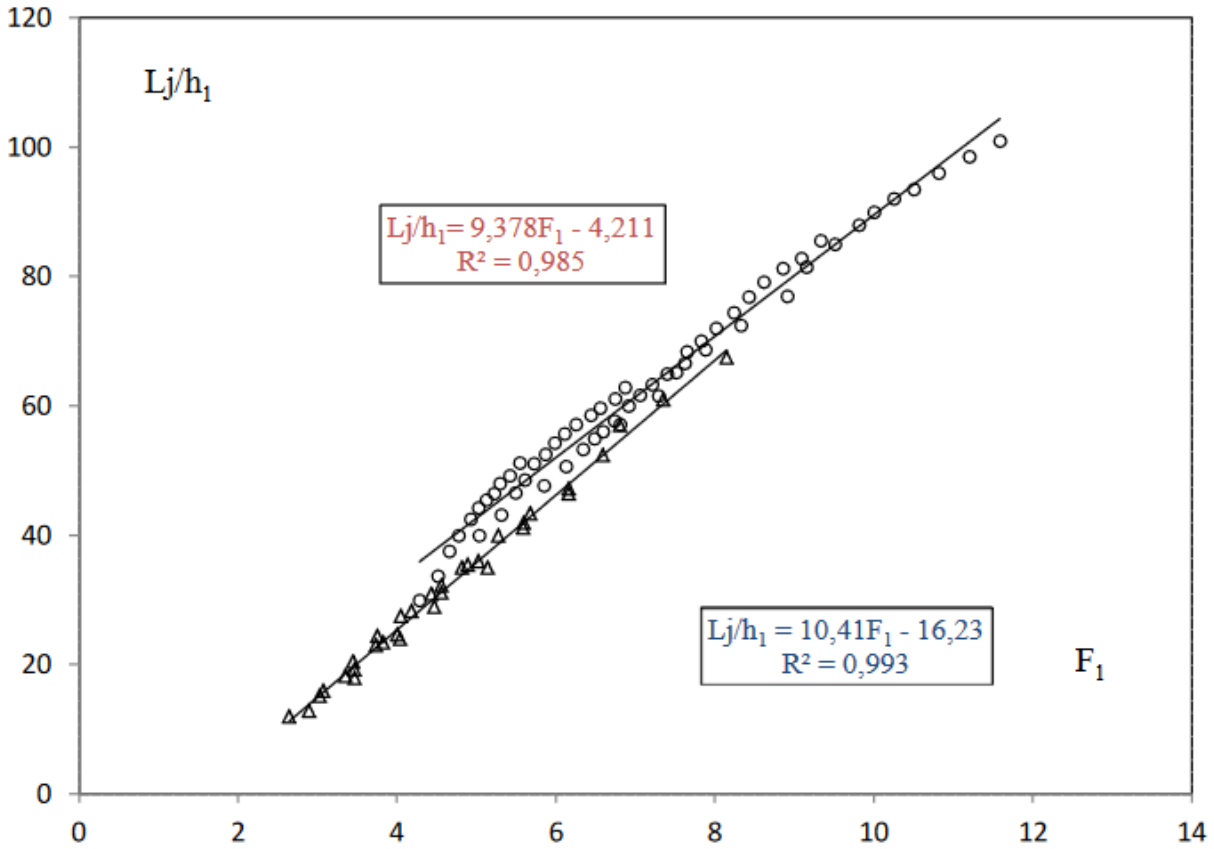


Figure II.9: La représentation de la longueur relative Lj/h₁ du ressaut hydraulique variant en fonction du nombre de Froude F₁, (o) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'rouleur de surface.

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

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

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

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

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

II.3.3.2.1 La longueur relative Lr/h₁ du rouleau de surface varie en fonction du nombre de Froude F₁

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

Cette variation de la longueur relative Lr/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 est montrée

par la figure (II.10).

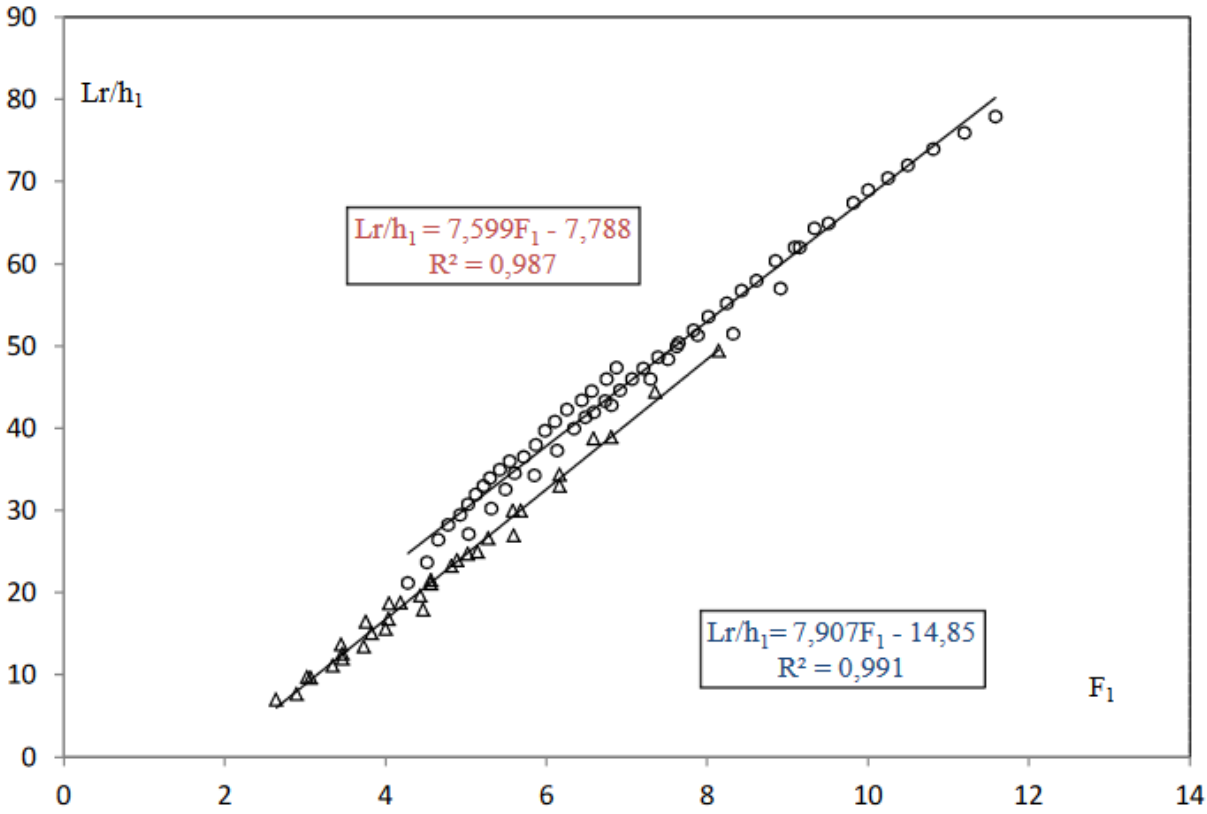


Figure II.10: Représentation de la longueur relative Lr/h_1 du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude F_1, (○) les mesures expérimentales pour le lit majeur ; (Δ) les mesures expérimentales pour le lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.

On peut conclure qu'à partir de cette figure que la section composée présente un rouleau de surface compacte en lit mineur que celui en lit majeur.

II.4. Conclusion

En nous appuyant sur les travaux de Khattoui et Achour (2012), ce chapitre explore le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à section composée. Ces auteurs ont développé une relation fonctionnelle ϕ (Fr_1, Y, β, τ) = 0 pour décrire ce phénomène. Nous avons ensuite étendu cette étude en considérant l'influence des forces de frottement, en nous inspirant des travaux d'Achour (2000) sur les galeries circulaires brusquement élargie.

Les mesures expérimentales réalisées au LARHYSS mettent en évidence une corrélation significative entre les ouvertures h_1 et la variation du rapport Y du ressaut hydraulique. Cette variation est d'autant plus marquée que le nombre de Froude incident F_1 augmente.

L'étude s'est intéressée, en premier temps à la variation de rapport Y qui varie en fonction du nombre de Froude F_1 pour différentes ouvertures pour les deux lits du canal rectangulaire de forme composée. On constate que ce rapport Y s'accroit avec l'augmentation du nombre de Froude F_1 et que pour un nombre de Froude fixé F_1, Y est plus important en lit majeur. On note que pour une série des nombres de Froude et pour différentes ouvertures testées h_1, le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée, présente deux relations expérimentales globales adimensionnelles telles que $Y = f(F_1)$ par lesquelles on dimensionnerait les ouvrages hydrauliques (bassin de tranquillisation).

En second temps, L'étude expérimentale s'est intéressée, à l'estimation des longueurs qui caractérisent le ressaut hydraulique. Pour chaque lit du canal, Il a été prouvé qu'une relation de type linéaire est obtenue. Finalement, On peut conclure que le ressaut hydraulique qui s'évolue dans le canal rectangulaire de forme composée a pour effet réducteur à leurs caractéristiques au lit mineur que celui au lit majeur.

Chapitre III
Description du modèle expérimentale

III.1. Introduction

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

III.2. Description du canal

Les expériences ont été conduites dans un canal à surface libre représenté sur la (Figure III.1) et (Figure III.2), Il s'agit d'un canal de 12 m de longueur, ayant une hauteur de 0,6m, une distance suffisante pour la formation du ressaut, les parois latérales sont en verre. Il est constitué d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure par une conduite circulaire en PVC d'un diamètre de 115 mm L'ensemble fonctionne en circuit fermé. L'écoulement est entretenu par deux pompes centrifuges (en disposées parallèles). (Figure III.6) qui alimente un convergent en charge (Son rôle est de générer un écoulement à grande vitesse) (Figure III.7) (Figure III.8) débouchant dans le canal de mesure. On dispose ici d'un canal horizontal de sectionrectangulaire composée, d'une longueur est de 3 m et dont les hauteurs respectivement lit mineur h_{c0}=20 cm et lit majeur h_{c1}=32.5 cm et les largeurs des trois lits du canal sont respectivement lit majeur b=20 cm, lit moyenne b_m=39 cm, li majeur B=60 cm. Il est relié en sa partie aval à un second canal de section droite rectangulaire dont le fond présente une pente nulle. Un déversoir rectangulaire est inséré sans hauteur de pelle avec contraction latérale (Figure III.12), permettant la mesure du débit.

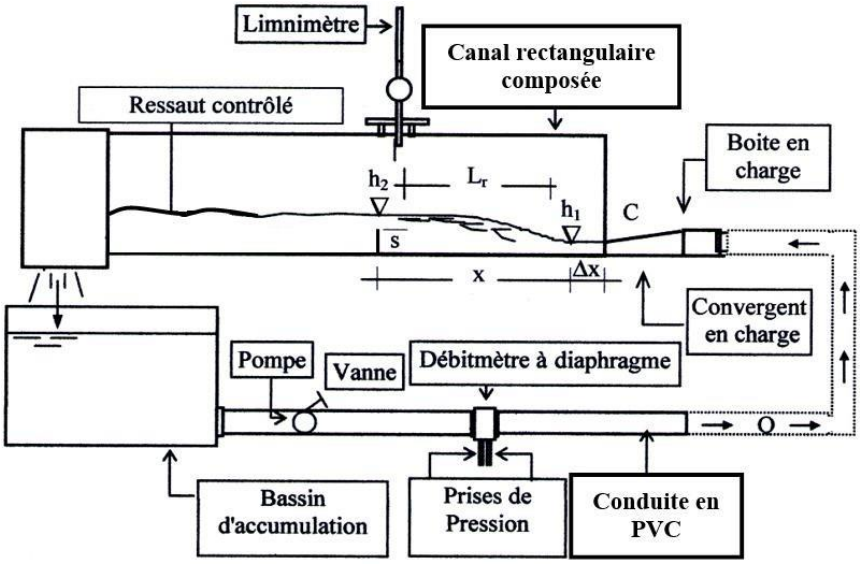


Figure III.1: Schéma simplifié du canal de mesure de section droite rectangulaire de forme composée,ayant servi à l'expérimentation.

Figure III.2 : : Photographie du model expérimentale du cana (vu latérale)

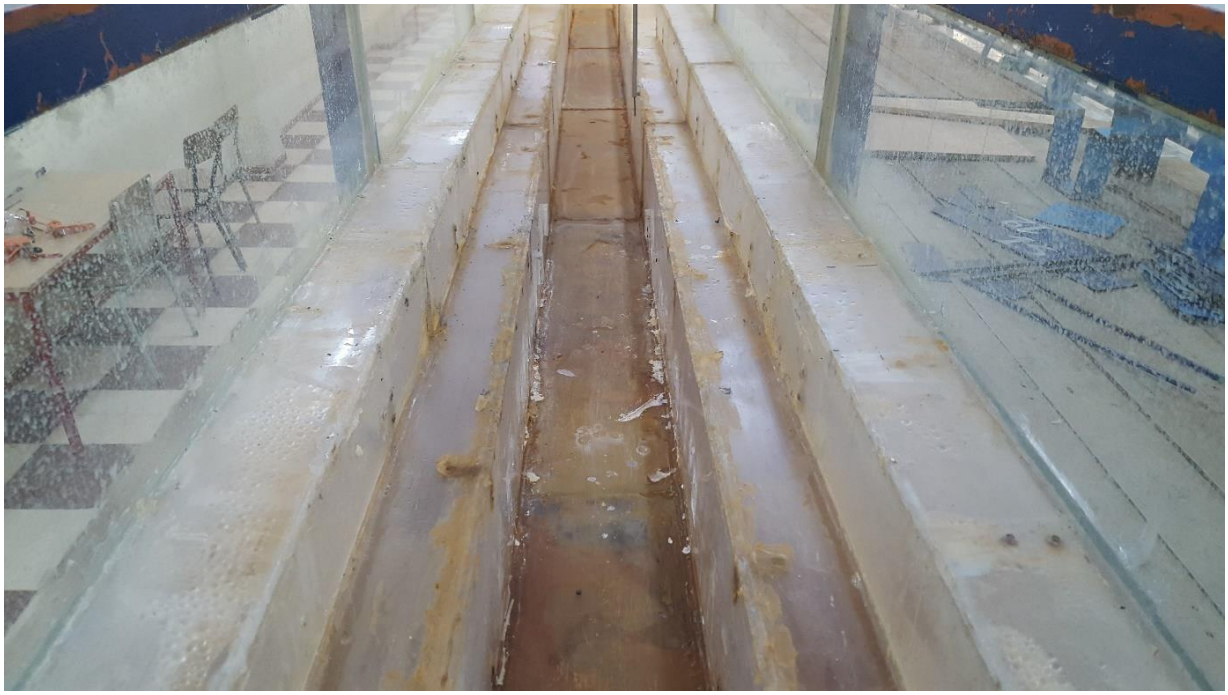


Figure III.3 : Photographie du model expérimentale du canal (vue plan).

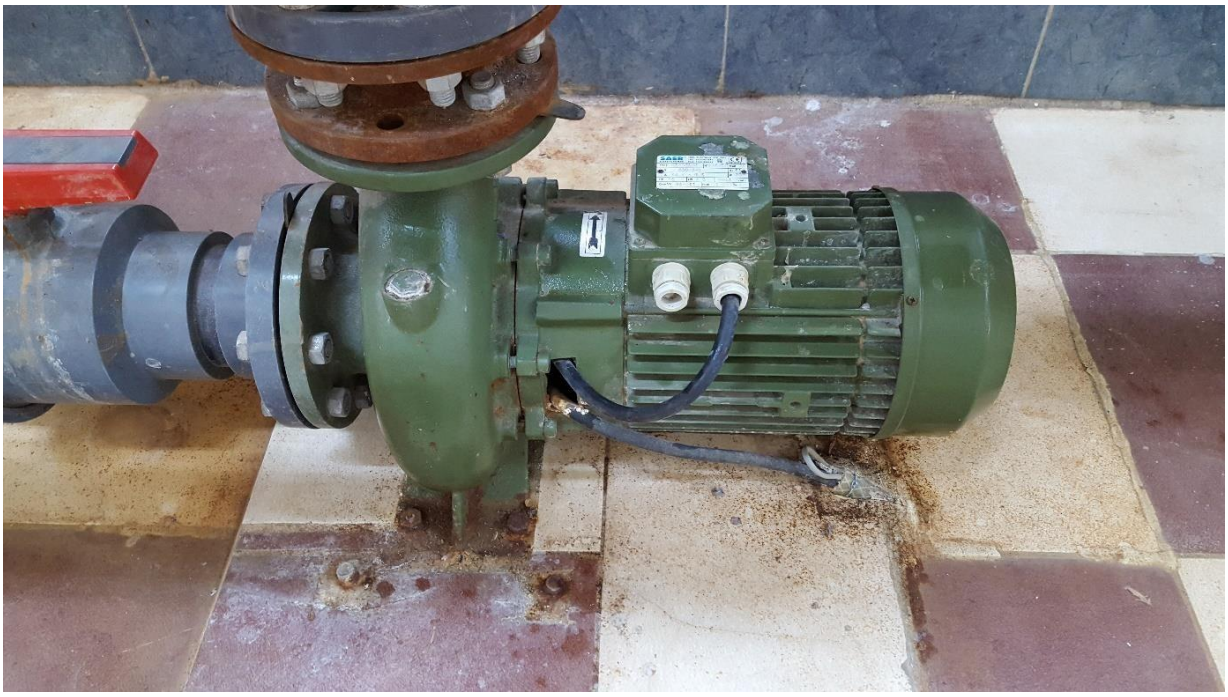


Figure III.4 : Pompe centrifuge axiale (pompe principale).

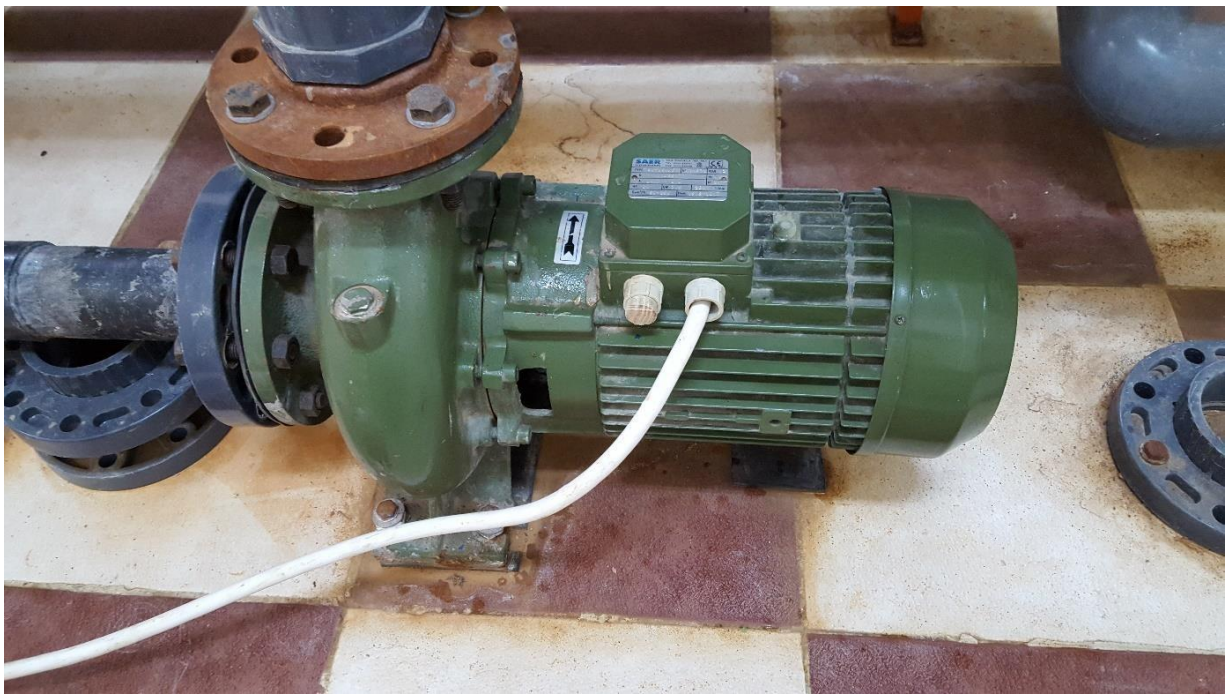


Figure III.5 : Deuxième pompe (pompe de renforcement).

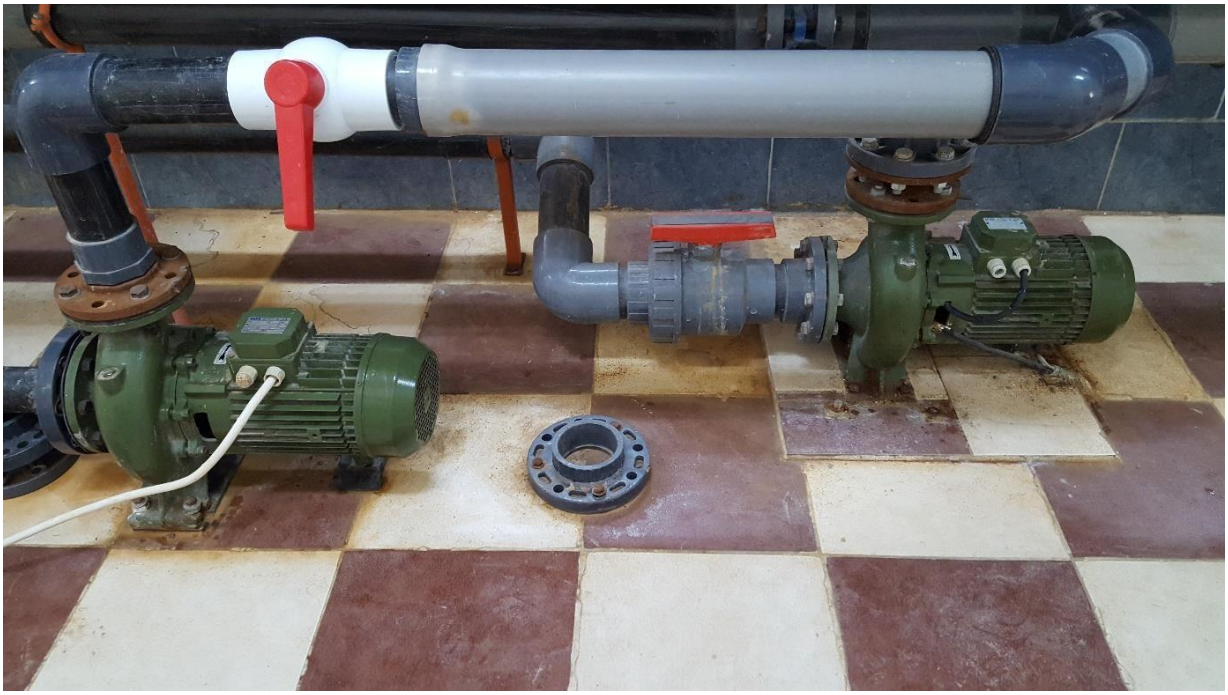


Figure III.6 : Raccordement des pompes.

Le canal rectangulaire de forme composée est relié, dans sa partie amont, à une boite en charge (figure III.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 III.7 : Photographie d'une boite en charge.

Figure III.8 : Photographies de la convergent (la hauteur de l'ouverture =2cm).

Figure III.9 : Photographie d'un vérin manuel et vanne de manipulation.

III.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 mesureont été évaluées par un limnimètre. (Figure III.10).

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 del'eau (figure III.11).

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 effectuela 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 III.10 : Photographies des limnimètres qui sont utiliser dans le model.

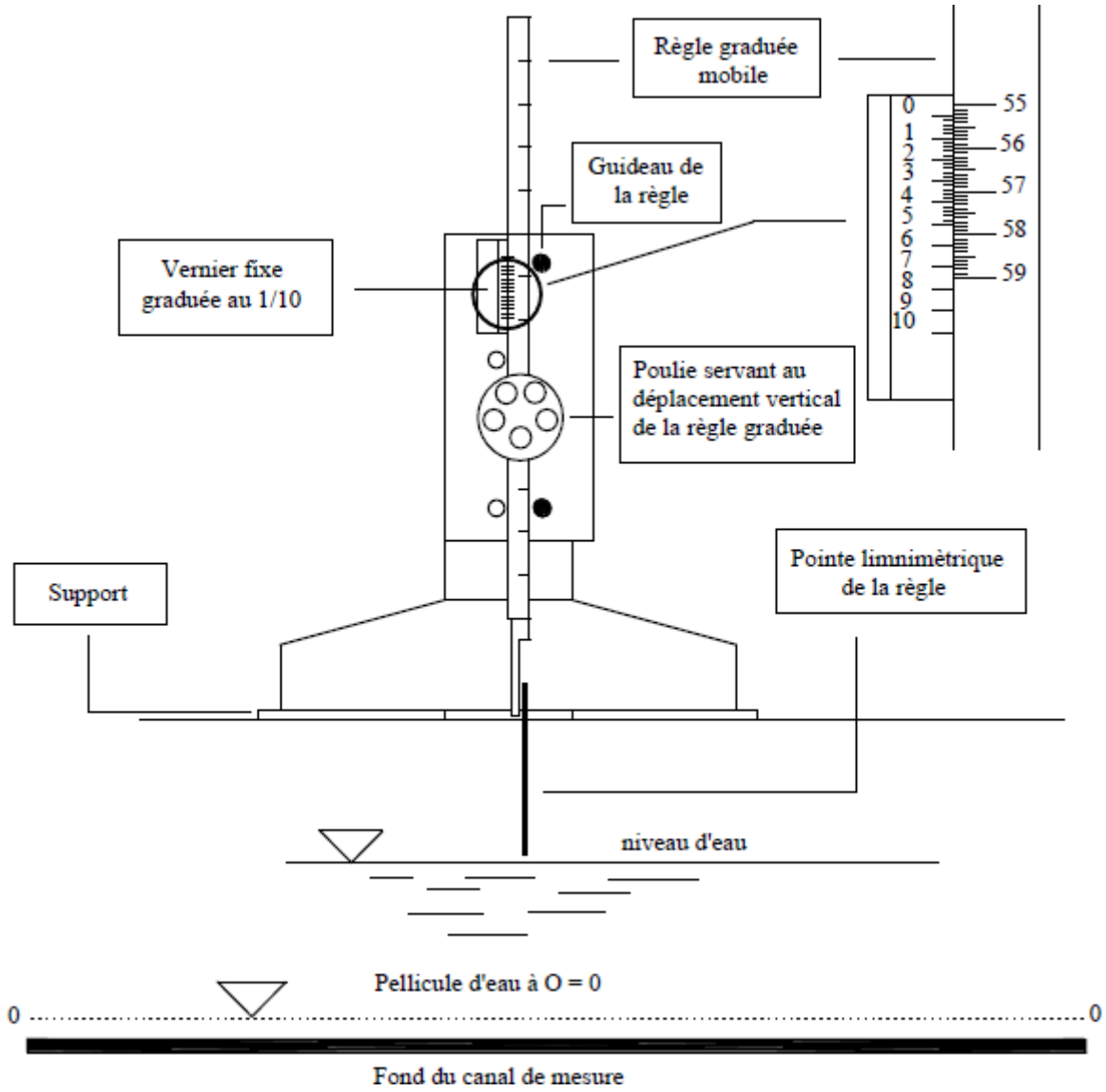


Figure III.11 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.

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

Figure III.12 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latéraleayant servi à la mesure du débit.

III.4. Les seuils minces

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

Dans le but d'obtenir un nombre n'important de points de mesures, nous avons préparé 25 seuils minces de différentes hauteurs (figure III.13) :

s = (4 cm; 5 cm; 6 cm; 7 cm; 8 cm; 9 cm; 10 cm; 11 cm; 12 cm; 13 cm; 14 cm; 15 cm;16 cm; 17 cm; 18 cm; 19 cm; 20 cm; 23 cm; 25 cm; 26 cm; 27 cm; 28 cm; 29 cm; 30 cm; 31 cm).

Figure III.13 : Photographie des seuils minces testés.

La fixation des seuils minces sur le fond du canal rectangulaire, est assurée par le support duseuil (figure III.14).

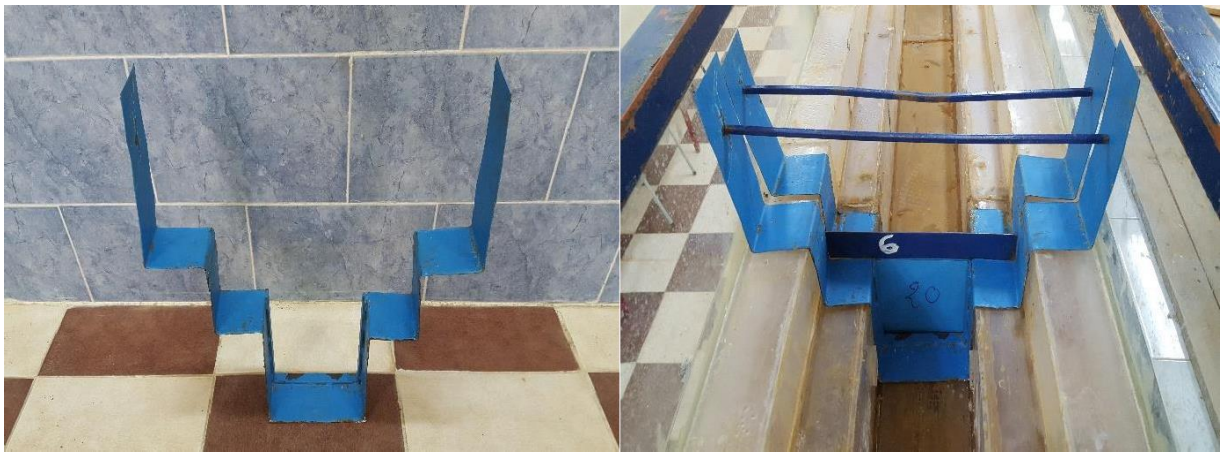


Figure III.14 : Support du seuil.

III.5. Modèle expérimental

Le positionnement longitudinal de l'obstacle n'est pas anodin. En effet, il est placé sur la paroi du fond du canal, après avoir positionné le pied du ressaut.

Les distances horizontales ont été mesurées à l'aide d'un ruban gradué telle que la longueur duressaut Lj et de son rouleau Lr.

Afin d'atteindre un plus grand nombre de points de fonctionnement dans le plan des paramètresvoulus, on a pris un pas $\Delta x=5$ cm cette distance n'a pu être réduite davantage en raison de l'instabilité horizontale du ressaut, notamment pour les débits fort. Pour chaque Δx ont utilisé 25 seuils de tailles différentes.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons une étude expérimentale détaillée du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à section composée équipé d'un seuil mince. Nous décrivons le modèle physique utilisé, le dispositif expérimental, les procédures de mesure et les résultats obtenus. Des schémas et des photographies illustrent les différentes étapes de l'expérimentation.

Pour mesurer les débits, nous avons opté pour un débitmètre à déversoir rectangulaire sans pelle, avec contraction latérale, développé par Hachemi Rachedi (2006). Malgré les incertitudes liées à la mesure de la hauteur d'eau h_2 en raison de son instabilité, ce dispositif s'est révélé efficace et nous a permis d'obtenir des résultats satisfaisants. L'étanchéité des joints, assurée par l'utilisation de pâte à modeler, a garanti la stabilité de la configuration expérimentale tout au long des mesures.

Chapitre IV Étude expérimentale

IV.1. Introduction

Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé expérimentalement le comportement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à lit composé de pente nulle équipé d'un seuil mince. Les expériences ont été conduites pour une hauteur d'eau initiale fixe (h_1 = 2 cm) et en faisant varier systématiquement le nombre de Froude incident dans un intervalle allant de 4,19 à 15,65. Cette plage de valeurs a permis d'explorer un large éventail de conditions d'écoulement.

La création d'un ressaut hydraulique contrôlé nécessite la mise en place d'un obstacle, en l'occurrence un seuil, dans le lit du canal. Afin d'évaluer l'influence de la hauteur de cet obstacle sur les caractéristiques du ressaut, nous avons expérimenté avec des seuils de différentes hauteurs.

Afin de mener à bien cette étude, ce chapitre est organisé en deux sections distinctes. La première section décrit en détail le dispositif expérimental, les procédures de mesure et les conditions d'essai. La seconde section est consacrée à l'analyse approfondie des données expérimentales, permettant d'évaluer l'influence des différents paramètres sur le comportement du ressaut hydraulique.

IV.2. Effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire de forme composée

IV.2.1 Position du problème

Notre étude vise à analyser les caractéristiques d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire à géométrie variable. Les paramètres mesurés incluent le débit (Q) déterminé à partir des convergents, la hauteur d'eau finale (h_2) mesurée au limnimètre, et les longueurs caractéristiques du rouleau (Lr) et du ressaut (Lj).

Pour une analyse dimensionnelle complète, les résultats expérimentaux sont exprimés en termes de nombres adimensionnels suivants : le nombre de Froude incident (Fr_1), le rapport des hauteurs d'eau conjuguées (Y), les hauteurs relatives du seuil (S) et des différentes longueurs caractéristiques du ressaut (λj et λr), ainsi que le rendement énergétique (η).

La reproductibilité des résultats a été assurée en maintenant une hauteur d'eau initiale unique de 2 cm tout au long des expériences. La figure IV.1 offre une vue d'ensemble du dispositif expérimental, mettant en évidence la configuration caractéristique du ressaut hydraulique étudié.

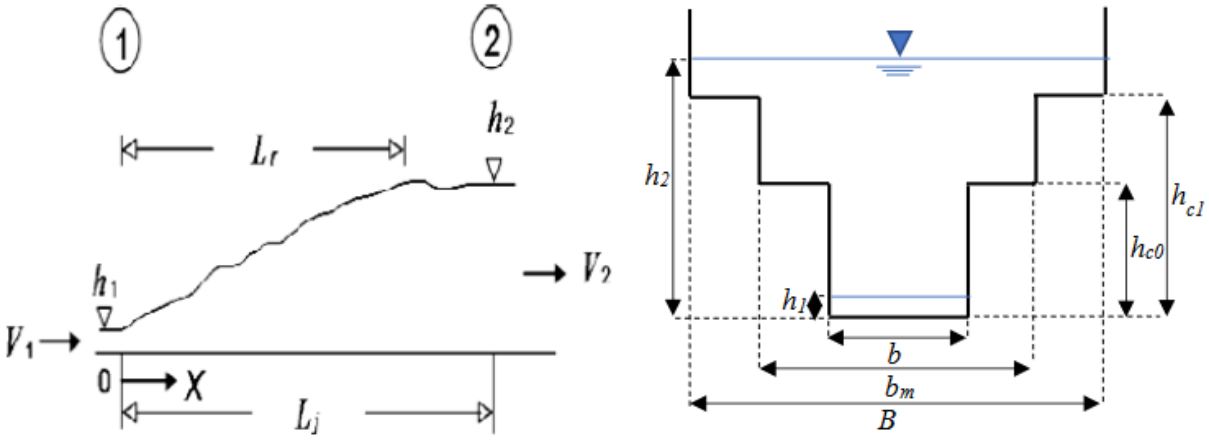


Figure IV.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil en canal composé droit.

IV.2.2 Mesure du débit volume Q

Pour déterminer le débit volumique Q, le canal de mesure est relié à un second canal équipé d'un déversoir rectangulaire sans contraction latérale. Ce déversoir, mis au point par Hachemi Rachedi (2006), est utilisé pour mesurer la hauteur d'eau déversante ($h_{dév}$). En connaissant cette hauteur, il est possible de calculer le débit correspondant à l'aide de relations empiriques établies pour ce type de déversoir.

Dans la formule (4.1) en assurant la condition d'application de celle-ci qui est :

$$Q = 0{,}3794B\sqrt{2g}\beta(1 + 0.16496\beta^{2{,}0716})^{3/2}h_{dev}^{3/2} \qquad (4.1)$$

Avec :

$\beta = b_{dév}/B$.

Q : le débit en (m^3/s).

B : la largeur du canal en (m).

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

β : rapport de forme.

$b_{dév}$: Largeur de l'échancrure en (m).

$h_{dév}$: La hauteur de la lame déversant en (m).

La condition d'application de cette relation est satisfaite car : $\beta = b_{dév}/B = 0{,}24/0{,}60 = 0{,}4$ ($0{,}4 < 0{,}45$).

IV.2.3 Procédure expérimentale

Notre étude expérimentale vise à caractériser les propriétés du ressaut hydraulique se formant dans un canal à section composée, constitué d'un canal rectangulaire principal.

Comme il a été signalé précédemment, la mesure de la hauteur initiale h_1 s'effectue sur l'axe central de l'écoulement. Un convergent a été testé de hauteur : h convergent = 20 mm.

La gamme des nombres de Froude obtenue par cette ouverture est : 4,19≤ Fr1 ≤ 15,65. Les résultats obtenus par cette large gamme de nombre de Froude Fr1, nous a fournis des échantillons de mesures assez significatifs pour le type du ressaut étudier.

La formation complète du ressaut est conditionnée par la mise en place de seuil au travers de l'écoulement, pour cela 25 seuils ont été préparées et testées, de hauteur géométrique varie de 4cm à 31cm.

Dès l'obtention de la forme complète du ressaut, nous effectuerons pour chaque hauteur s et position x de pied du ressaut les étapes suivantes :

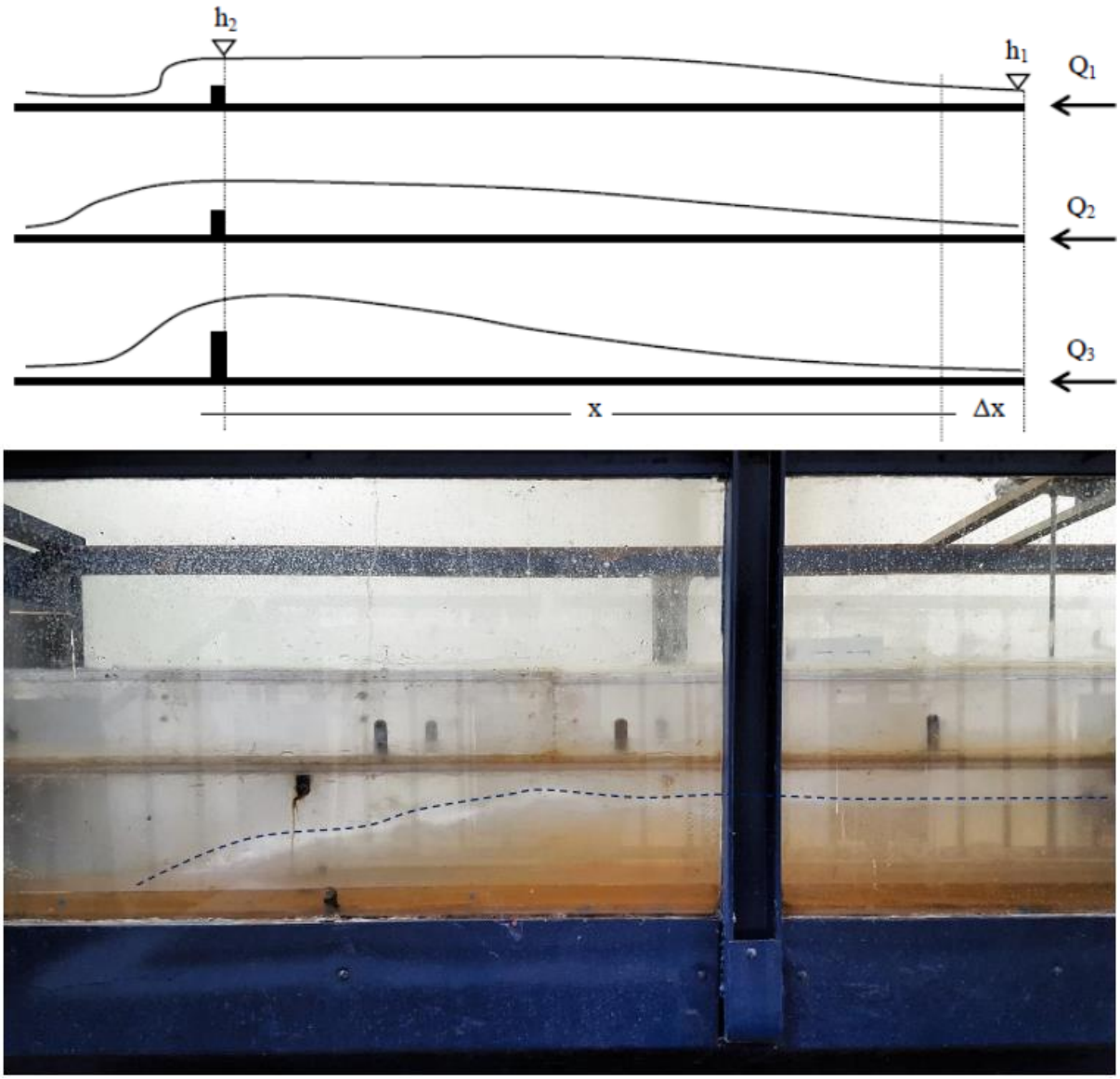
- Mesure de la hauteur déversant hdév.
- Calcule du débit volume Q par l'application de la relation (4.1).
- Calcule du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, par l'application de la relation :

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} \qquad (4.2)$$

- Mesure de la longueur Lr du rouleau.
- Mesure de la longueur Lj du ressaut.
- Mesure de la hauteur conjuguée aval h_2 du ressaut.

Pendant l'expérimentation on a remarqué que l'accroissement du nombre de Froude Fr_1 entraine un déplacement du ressaut vers l'aval ce qui provoque une augmentation de la longueur de son rouleau Lr. Par ailleurs la longueur Lj du ressaut.

La figure IV.2 représente trois configurations différentes du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite rectangulaire composé, obtenues à débit croissant pour une position x de seuil et une convergente fixées.



Fr_1 = 5,13, s = 6 cm, h_2 = 13,2 cm

Fr_1 = 10,19, s = 18 cm, h_2 = 26 cm

Fr_1 = 13,58, s = 28 cm, h_2 = 36 cm

Figure IV.2 : Différentes configurations du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince, obtenues à débit croissant pour une position de seuil x = 233 cm, une hauteur initiale h1 = 2 cm et $\Delta x \approx 5$ cm.

IV.3. Analyse des résultats expérimentaux

IV.3.1 Variation de la longueur relative Lr/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude Fr_1

La longueur caractéristique Lr du rouleau de surface est définie comme la distance séparant les sections correspondant au début et à la fin de la zone de turbulence intense.

La figure IV.3 représente la courbe de variation de la longueur relative adimensionnelle du rouleau (Lr/h_1) en fonction du nombre de Froude adimensionnel (Fr_1), mettant ainsi en évidence l'effet du régime d'écoulement sur la géométrie du ressaut hydraulique.

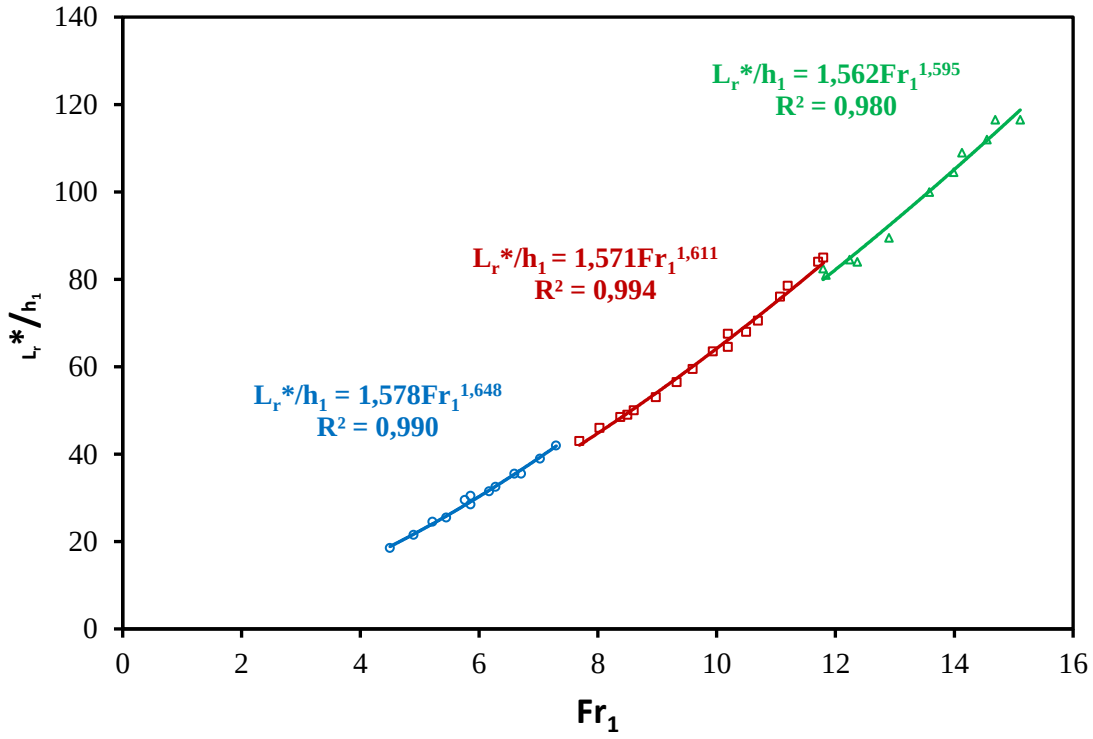


Figure IV.3 : Variation du rapport Lr/h_1 du ressaut en fonction de nombre de Froude Fr_1.

Pour $h_2 \leq h_{c0}$:(•) ; (---) Pour $h_{c0} < h_2 \leq h_{c1}$: (■) ;(---) Pour $h_2 > hc_1$: (▲) ;(---)

Les valeurs numériques correspondant aux points expérimentaux représentés sur la figure IV.3 sont consignées dans les tableaux IV.1, IV.2, IV.3

Pour : $h_2 \leq h_{c0}$ **:**

Courbe de $Lr/h_1 = f(Fr_1)$ pour : $h_2 \leq h_{c0}$

$$\frac{Lr}{h_1} = 1{,}58 Fr_1^{1{,}65} \qquad R^2=0{,}99$$

Tableau IV.1 : valeurs expérimentales de rapports Lr/h_1 du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude Fr_1 pour : $h_2 \leq h_{c0}$

L_r^*/h_1	Fr_1	$\gamma^*=L_r^*/x$	L_r^*/h_1	Fr_1	$\gamma^*=L_r^*/x$
18,50	**4,50**	**0,16**	**32,50**	**6,28**	**0,31**
21,50	**4,90**	**0,18**	**35,50**	**6,60**	**0,34**
24,50	**5,22**	**0,21**	**39,00**	**7,03**	**0,38**
28,50	**5,86**	**0,24**	**42,00**	**7,30**	**0,41**
31,50	**6,17**	**0,27**	**25,50**	**5,45**	**0,53**
35,50	**6,71**	**0,30**	**30,50**	**5,86**	**0,63**
29,50	**5,76**	**0,29**			

Pour : $h_{c0} < h_2 \leq h_{c1}$

Courbe de $Lr/h_1 = f(Fr_1)$ pour : $h_{c0} < h_2 \leq h_{c1}$

$$\frac{Lr}{h_1} = 1{,}57 Fr_1^{1{,}61} \qquad R^2=0{,}99$$

Tableau IV.2 : valeurs expérimentales de rapports Lr/h_1 du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude Fr_1 pour : $h_{c0} < h_2 \leq h_{c1}$

L_r^*/h_1	Fr_1	$\gamma^*=L_r^*/x$	L_r^*/h_1	Fr_1	$\gamma^*=L_r^*/x$
84,00	**11,71**	**0,48**	**70,50**	**10,70**	**0,61**
85,00	**11,80**	**0,49**	**78,50**	**11,20**	**0,67**
43,00	**7,69**	**0,37**	**48,50**	**8,38**	**0,47**
46,00	**8,03**	**0,39**	**59,50**	**9,60**	**0,57**
50,00	**8,61**	**0,43**	**63,50**	**9,94**	**0,61**
53,00	**8,98**	**0,45**	**67,50**	**10,19**	**0,65**
56,50	**9,33**	**0,48**	**76,00**	**11,07**	**0,73**
64,50	**10,19**	**0,55**	**49,00**	**8,50**	**0,94**
68,00	**10,50**	**0,58**	**70,50**	**10,70**	**0,61**

Pour : $h_2 > h_{c1}$

Courbe de $Lr/h_1 = f(Fr_1)$ pour : $h_2 > h_{c1}$

$$\frac{Lr}{h_1} = 1{,}56 Fr_1^{1{,}60} \qquad R^2=0{,}98$$

Tableau IV.3 : valeurs expérimentales de rapports Lr/h_1 du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude Fr_1 pour : $h_2 > h_{c1}$

L_r^*/h_1	Fr_1	$\gamma^*=L_r^*/x$	L_r^*/h_1	Fr_1	$\gamma^*=L_r^*/x$
109,00	**14,13**	**0,50**	**81,00**	**11,84**	**0,70**
116,50	**14,69**	**0,54**	**84,00**	**12,37**	**0,72**
112,00	**14,55**	**0,57**	**82,50**	**11,79**	**0,80**
116,50	**15,11**	**0,59**	**84,50**	**12,24**	**0,82**
100,00	**13,58**	**0,58**	**89,50**	**12,90**	**0,86**
104,50	**13,99**	**0,60**	**81,00**	**11,84**	**0,70**

IV.4. Conclusion

L'analyse visuelle du nuage de points révèle que les données expérimentales obtenues pour les trois lits du canal présentent une tendance similaire. Il est donc possible de modéliser l'ensemble des données par une seule courbe, ce qui suggère que la relation entre la longueur relative du rouleau et le nombre de Froude est insensible aux variations de la section du canal.

Ce chapitre présente une étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal rectangulaire de forme composée à section variable. Les caractéristiques de ce type de ressaut cité précédemment ont été déterminées expérimentalement. Nous avons notamment étudié l'évolution de la hauteur et de la longueur du ressaut en fonction du débit.

Notre étude expérimentale visait également à analyser l'influence du nombre de Froude (Fr_1) sur les paramètres caractéristiques du ressaut, tels que les longueurs relatives du rouleau (λr)

Concluion Générale

Conclusion Générale

Le chapitre initial de cette étude est consacré à l'examen critique des travaux antérieurs portant sur l'hydrodynamique des ressaux hydrauliques en canaux rectangulaires. 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.

À 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 Lj et la longueur Lr du rouleau, n'est possible que par la voie expérimentale.

Forster et Skrinde (1950) ont notamment étudié l'influence de seuils à parois minces et épaisses sur les caractéristiques du ressaut hydraulique. Leurs travaux ont mis en évidence la variation de la hauteur relative du seuil (S) en fonction du nombre de Froude (F_1) pour différentes positions du seuil par rapport à la profondeur d'eau aval.

La marche positive, était l'un des cas étudiés 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.

Les travaux de Rand (1957 et 1965) ont été une référence pour notre étude sur les ressaux forcés par seuil. L'auteur a proposé une classification détaillée de ces ressaux en fonction de la hauteur et de la position du seuil, ainsi qu'une représentation graphique de la relation entre la hauteur conjuguée et des paramètres adimensionnels.

En complément des travaux de Rand, Bretz (1988) et Hager et ses co-auteurs ont approfondi l'analyse des ressaux hydrauliques contrôlés par seuil. Ils ont développé des

modèles empiriques permettant de prédire les caractéristiques du ressaut (hauteur conjuguée, Y, et longueur relative du bassin d'amortissement) en fonction du nombre de Froude (F1) et de la hauteur relative du seuil (S), en distinguant trois types de ressaut (A, B, B-min).

Le deuxième chapitre de notre étude bibliographique a été consacré aux travaux portant sur le ressaut hydraulique dans des canaux rectangulaires à géométrie complexe. Khattoui et Achour (2012) ont développé un modèle théorique pour décrire le ressaut dans ce type de configuration, en proposant des relations fonctionnelles entre les principaux paramètres du ressaut. Leur approche s'appuie sur les travaux d'Achour (2000) sur les galeries circulaires. Parallèlement, les résultats expérimentaux de Riguet et al. (2019) ont mis en évidence le rôle crucial des ouvertures dans la modification du comportement du ressaut, notamment en ce qui concerne la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude.

L'étude a porté sur l'influence des ouvertures sur le comportement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à géométrie variable. Les résultats ont montré que le rapport des hauteurs conjuguées Y augmente avec le nombre de Froude F_1. De plus, pour un F_1 donné, la valeur de Y est supérieure dans le lit majeur. Ces observations ont permis d'établir deux relations empiriques adimensionnelles reliant Y à F_1, pour différentes valeurs des ouvertures h_1, offrant ainsi des outils pour dimensionner les ouvrages hydrauliques dans ce type de configuration.

Le troisième chapitre est consacré à la description exhaustive du modèle expérimental utilisé pour mener à bien notre étude expérimentale sur le ressaut hydraulique. Les illustrations photographiques fournies permettent au lecteur de se familiariser avec le dispositif expérimental et de mieux comprendre les conditions dans lesquelles les essais ont été réalisés.

Le quatrième chapitre présente l'analyse détaillée des résultats expérimentaux obtenus. À partir de ces données, nous avons établi des relations empiriques permettant de décrire le comportement du ressaut hydraulique dans notre canal rectangulaire à section composée. Ces relations fournissent les outils nécessaires pour dimensionner de manière adéquate les bassins d'amortissement.

Le résultat obtenu est la relation entre le rapport Lr/h_1 et le nombre de Froude, $Lr/h_1=f(Fr_1)$ est une courbe puissance pour chaque configuration du ressaut.

Rréférences Bibliographiques

Références Bibliographiques

Achour, B., (1997) Dissipation d'énergie par ressaut, thèse d'état, Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil.

Achour B, Khattaoui M. (2012) Ressaut hydraulique en lit composé. Revue scientifique et technique. LJEE 2012 ; 44-51.

Ackers P. (1991) Hydraulic design of straight compound channels. SR281, HR Wallingford, Wallingford, UK, 1991.

Andersen J, V. M., (1978). Undular hydraulic jump, Proc, ASCE, j, Hydraulics Division, Vol. 104, pp. 1185-1188.

Arghyropoulos, P. A., (1962). General Solution of the Hydraulic Jump in Sloping Channels, Proc. ASCE, J; Hydraulics Division, Vol.88, pp.61-75.

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.

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.

Bousmar D, Rivière N, Proust S, Paquier A, Morel R, Zech Y. (2005) Upstream discharge

distribution in compound-channel flumes. J H Eng 2005, ASCE ; 131(5) : 408-412.

Bousmar D, Wilkin N, Jacquemart, J H Zech Y. (2004) Overbank flow in symmetricaly narrowing flood plains. J H Eng 2004 ; 130(4) :305-312.

Carlier, M., (1980). Hydraulique Générale et Appliquée 1er édition.

Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

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.

Riguet, F., Debabeche, M., Ghomri, A., (2019). Expérimental study off he sequentdepthration of the hydraulic jump in a straight compond rectangular channel; Journal of Fundamental and Applied Sciences ISSN 1112-9867.

Hager, W., h., (1987). Der Ablufss im U-Profil. Korrespondenz Abwasser 34(5): 468-482.

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.

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., (1965), Hydraulic Jump in horizontal conduit, Water Power, 17, pp. 80-83.

Rajaratnam, N., (1967). Hydraulique jumps, Advaces in hydro science, 4: 197-280, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York, N.Y.

Rajaratnam, N., (2002), Hydraulic jump on corrugated beds, J. Hydraulic Engrg., Volume 128, Issue 7,656-663.

Rajaratnam, N., Subramania, K., (1968, 1969, 1970), Profil of the hydraulic jump, Proc.