

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

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية والري
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat LMD
Spécialité : **Hydraulique**

Option : Hydraulique Urbaine

Thème

**Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal brusquement
élargi**

Présenté par : **SIAD Rafik**

Soutenu le :/..... / 2018 devant le jury composé de

OUAMANE	Ahmed	Professeur	Président	Université de Biskra
DEBABECHE	Mahmoud	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
REMINI	Boualem	Professeur	Examineur	Université de Blida
BOUDOUKHA	Abderrahmane	Professeur	Examineur	Université de Batna
CHERHABIL	Sonia	M.C.A	Examineur	Université de Biskra

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement mon promoteur le professeur DEBABECHE Mahmoud, Directeur du Laboratoire de Génie civil et Hydraulique développement durable et environnement «LARGHYDE» qui n'a, à aucun moment, cessé de prodiguer ses aides et assistance scientifique et moral, afin de rendre mon travail plus aisé et pour l'achèvement de cette thèse.

Mes remerciements vont également au professeur OUAMANE Ahmed professeur à l'université de Biskra, pour avoir accepté de m'honorer par sa présence en qualité de président de jury.

Je remercie cordialement le Professeur REMINI Boualem, Professeur de l'université de Blida d'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail. Je souhaite adresser également mes remerciements au Professeur BOUDOUKHA Abderrahmane, professeur de l'université de Batna et Madame CHERHABIL Sonia, Maitre de conférences « A » à l'université de Biskra d'avoir acceptés d'examiner mon travail.

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

Résumé

Cette étude a pour but d'analyser par voie expérimentale les ressauts hydrauliques contrôlés par seuil mince évoluant dans un canal trapézoïdal brusquement élargi en rectangulaire.

L'objectif principal étant la détermination des relations fonctionnelles pratiques permettant le dimensionnement des bassins de dissipation à ressaut hydraulique à l'aval des barrages, ces relations fonctionnelles ont été présentées en termes adimensionnels, faisant apparaître l'influence de la position du pied de ressaut par rapport à la section élargi et aussi l'élargissement du canal sur l'évolution de différentes caractéristiques du ressaut.

Mots clés : Ressaut hydraulique, Canal trapézoïdal, Canal brusquement élargi, Seuils minces, Bassin de dissipation

Abstract

This research aims to study by experimental way the hydraulic jump controlled by a thin sill evolving in a trapezoidal channel abruptly expanded in rectangular one.

The main objective is the determination of practical functional relations allowing the design of the stilling basins downstream of dams; these functional relations were presented on non-dimensional terms, showing the influence of the toe position and the enlargement of the channel in the evolution of different characteristics of the hydraulic jump.

Keywords: Hydraulic jump, Trapezoidal Channel, Abruptly expanding channel, Thin sills, Stilling Basin.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى إجراء التحليل التجريبي للقفزة المائية المراقبة بالعتبة قليلة السمك داخل قناة مفتوحة شبه منحرفة الشكل موسعة فجائياً نحو قناة مفتوحة مربعة الشكل. الهدف الأساسي هو إيجاد علاقات صالحة للتطبيق تسمح بحساب ابعاد احواض التبيد خلف السدود والحواجز المائية. تم تقديم هذه العلاقات بدون ابعاد والتي تظهر أثر موقع قدم القفزة وأيضاً أثر التوسعة الفجائية في تطور مختلف خصائص القفزة المائية.

الكلمات المفتاحية: القفزة المائية، قناة شبه منحرفة الشكل، قناة موسعة فجائياً، عتبة رقيقة، حوض التبيد

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	I
-----------------------------	---

Première partie

ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE

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

Chapitre I

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

I.1. Introduction	3
I.2. Ressaut hydraulique classique.....	3
I.2.1. Classification du ressaut classique	4
I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	6
I.2.3. Profil de surface libre du ressaut.....	9
I.2.4. La longueur du rouleau	10
I.2.5. La longueur de ressaut	12
I.2.6. Rendement du ressaut hydraulique.....	14
I.3. Ressaut hydraulique contrôlé	16
I.3.1. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire	16
I.3.1.1. Approche de Forster et Skrinde (1950)	16
I.3.1.1.1. Seuil continu à paroi mince.....	16
I.3.1.1.2. Etude de Achour, Sedira et Debabeche (2002)	18
I.3.1.1.3. Seuil continu à paroi épaisse	19
I.3.1.1.4. La marche positive	20
I.4. Conclusion.....	22

Chapitre II

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL

II. 1. Introduction	23
II. 2. Généralité	23
II.3. Ressaut hydraulique classique dans un canal trapézoïdal.....	24
II.3.1. Les travaux de Hager et Wanoschek (1987-1989)	24
II.3.1.1. Descriptions des essais (1989).....	25
II.3.1.2. Caractéristique de l'écoulement (1989).....	25

II.3.1.3. Rapport des hauteurs conjuguées -----	26
II.3.1.4. Les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique-----	28
II.3.1.4.1. Longueur du rouleau du fond-----	28
II.3.1.4.2. La longueur de l'écoulement latérale en retour L_s -----	30
II.3.1.4.3. La longueur de ressaut L_j -----	31
II.3.1.5. Perte de charge relative du ressaut hydraulique -----	32
II.4. Ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal contrôlé par marche positive --	34
II.4.1. Travaux de Kateb, Debabache et Benmalek (2013) -----	34
II.4.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut-----	34
II.4.1.2. Hauteur relative du seuil et de la marche positive -----	35
II.4.1.3. Position relative de la marche positive -----	36
II.4.1.4. Le rendement du ressaut hydraulique-----	37
II.5. Conclusion-----	38

Chapitre III

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DES CANAUX A ELARGISSEMENT BRUSQUE

III.1 Introduction-----	39
III.2. Notation-----	40
III.3. Classification du ressaut hydraulique dans un canal brusquement élargi -----	41
III.3.1. Le ressaut repoussé -----	41
III.3.2. Le ressaut spatial -----	42
III.3.3. Le ressaut de transition -----	42
III.4. Les travaux entretenus de 1960-1990 -----	43
III.4.1. Les travaux de Nosedá (1963) sur le ressaut repoussé-----	43
III.4.2. Les travaux de Rajaratnam et Subramanya (1968) sur le ressaut repoussé-----	44
III.4.3. Les travaux de Unny (1960) sur le ressaut spatial-----	45
III.4.4. Les travaux de Herbrand (1973) sur le ressaut spatial -----	48
III.4.4.1. Le rapport des hauteurs conjuguées -----	48
III.4.4.2. La longueur du ressaut-----	50
III.4.5. Les travaux de Sharma (1964) sur le ressaut de transition-----	51
III.5. Les travaux entretenus de 1990-2015 -----	52
III.5.1. Les travaux de Hager et Bremen (1993) -----	52
III.5.1.1. Les hauteurs conjuguées du ressaut-----	52
III.5.1.2. Rendement du ressaut-----	54

III.5.1.3. La longueur du ressaut-----	55
III.5.1.4. La symétrie du ressaut -----	56
III.5.2. Les travaux de Zare et Doering (2011) -----	57
III.5.2.1. Les hauteurs conjuguées du ressaut-----	57
III.5.2.2. Le rendement du ressaut -----	60
III.5.2.3. La longueur du bassin de dissipation-----	62
III.5.3. La contribution de Scorzini et al (2015)-----	64
III.5.3.1. Installation et modalités expérimentales -----	64
III.5.3.2. Résultats de travail-----	66
III.6. Conclusion -----	69
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE-----	71

Deuxième partie

ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL BRUSQUEMENT ELARGI EN RECTANGULAIRE

INTRODUCTION A LA DEXIEME PARTIE-----	74
---------------------------------------	----

Chapitre I

DESCRIPTION DU MODELE EXPERIMENTAL

I.1. Introduction -----	75
I.2. Description du modèle-----	75
I.2.1. Description du canal-----	75
I.3. Appareillage de mesure -----	78
I.3.1. Mesure des hauteurs (Limnimètre)-----	78
I.3.2. Mesure de débit (déversoir) -----	79
I.3.3. Mesure des longueurs (ruban gradué)-----	79
I.4. Description des essais-----	79
I.5. Conclusion-----	80

Chapitre II

ETUDE EXPERIMENTALE

II.1. Introduction -----	81
II.2. Description de l'écoulement -----	81
II.3. Analyse des résultats expérimentaux-----	86
II.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut -----	86

II.3.2. Equation générale régissant le contrôle du ressaut-----	90
II.3.3. Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 -----	97
II.3.4. Longueur relative du bassin -----	103
II.3.4.1. Variation de la longueur relative du ressaut $\lambda_j = L_j/h_1$ en fonction de nombre du Froude F_1 -----	103
II.3.4.2. Variation de la longueur relative du rouleau de surface $\lambda_r = L_r/h_1$ en fonction de nombre du Froude F_1 -----	106
II.3.5. Rendement du ressaut-----	109
II.3.6. La symétrie du ressaut -----	110
II.4. Conclusion-----	114
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE -----	115
CONCLUSION GENERALE -----	116
PRINCIPALES NOTATIONS -----	119
LISTE DES TABLEAUX-----	120
LISTE DES FIGURES-----	122
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES-----	128

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les ouvrages de retenue, tels que les barrages hydrauliques, sont souvent soumis à des fortes crues. Dans les périodes de crues, la retenue étant pleine, l'eau est restituée à travers un évacuateur de crue vers la rivière. Le lit de la rivière se trouve alors confronté à un écoulement torrentiel à forte énergie cinétique. Celle-ci provoque des forces tractrices préjudiciables par leur effet érosif. Afin d'éviter d'importantes modifications du lit de la rivière, situé à l'aval du barrage, il serait nécessaire de dissiper cette énergie. Le moyen le moins onéreux et le plus pratique est certainement le ressaut hydraulique.

Le principe consiste à transformer l'écoulement torrentiel en un écoulement fluvial engendrant une diminution des forces tractrices, cette transformation est réalisée dans les bassins de dissipation.

Le ressaut hydraulique est dit classique, lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente faible ou nulle (*Hager et Bremen 1990*). Il peut également être contrôlé ou forcé (*Hager et Bretz 1989 ; Forster et Skrinde 1950*) par un seuil mince ou épais, continu ou discontinu, disposé dans le canal en travers de l'écoulement. Le seuil peut être noyé ou dénoyé.

Le ressaut est dit contrôlé, lorsqu'il se forme entièrement à l'amont de l'obstacle. Il est dit forcé, lorsqu'il se forme de part et d'autre de ce dernier.

L'obstacle (ou seuil) a pour rôle de provoquer la formation du ressaut et de contrôler sa position surtout lors de changement de débit.

Le ressaut hydraulique évoluant dans les canaux prismatique a connu une forte contribution notamment en canal rectangulaire, quant au canal trapézoïdal, la première étude systématique peut être celle de *Posey et Hsing (1938)*. Par la suite *Sandover et Holmes (1962)* ont étudié le ressaut hydraulique dans des canaux trapézoïdaux pour des inclinaisons de parois latérales de 30°, 45° et 60°. En outre, *Hager et Wanoschek (1989)* ont étudié, le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique à angle d'inclinaison des parois $\alpha = 45^\circ$. Plus récemment, *Kateb, Debabache et Benmalek (2013)* ont conduit une étude expérimentale reflétant l'effet de la marche positive sur le contrôle du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal.

Le ressaut hydraulique évoluant dans les canaux non – prismatique n'a connu que peu d'étude. On peut citer, entre autre, les travaux de *Achour (2000) ; Herbrand (1973)*, de *Bremen (1990)*, de *Hager et Bremen (1993)*. Plus récemment *Zare et Badduor (2007-2009)*, *Zare et Doering (2011)*. La majorité des travaux expérimentaux sont conduits, en particulier en canal rectangulaire brusquement élargi.

L'objectif de ces travaux est en particulier la recherche de la meilleure conception de bassin d'amortissement, en termes technique qu'économique. Les paramètres de tel ressaut hydraulique sont notamment le rapport des hauteurs conjuguées, les longueurs caractéristiques et la dissipation d'énergie.

Le but principal de cette étude est de trouver des relations empiriques permettant la détermination des caractéristiques géométriques de quelque type de ressauts hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal brusquement élargi en rectangulaire. L'étude a pour objectif également de comparer les résultats obtenus à ceux du canal trapézoïdal prismatique. Alors deux parties sont nécessaires :

La première partie sera consacrée à l'état de l'art, elle sera divisée en trois chapitres. Le premier chapitre aborde les principaux travaux entretenus dans un canal rectangulaire à savoir ; classique ou contrôlé. A travers ce chapitre nous allons passerons en revue la classification de *Bradley et Peterka (1957)*, les études de *Hager et Sinniger (1986-1989)* ; *Hager et Bremen (1989)* et *Hager et al (1990)*, sur les différentes caractéristiques du ressaut classique. Ensuite, les travaux de *Forster et Skrinde (1950)* et de *Achour, Sedira et Debabeche (2002)* sur le ressaut contrôlé par seuil ou par marche.

Le deuxième chapitre portera sur le ressaut évoluant en canal trapézoïdal classique et contrôlé. Nous allons citer les études de *Hager et Wanoschek (1987-1989)* sur le ressaut classique et de *Kateb, Debabache et Benmalek (2013)*. Quant au troisième chapitre, le ressaut dans les canaux à élargissement brusque, notamment dans le canal rectangulaire sera présenté. On peut citer, les études conduites par *Noseda (1963)* ; *Rajaratnam et subramanya (1968)* ; *Herbrand (1973)* ; *Bremen (1990)* ; *Hager et Bremen (1993)*, et plus récemment celles de *Zare et Doering (2011)* et de *Scarzoni et al (2015)*.

La deuxième partie de notre travail sera dédiée à notre contribution. Deux chapitres seront nécessaires. Dans le premier chapitre nous allons présenter le modèle expérimental, qui a servi de base pour notre expérimentation. Ce chapitre inclut aussi une présentation des appareils utilisés et une description des essais. Dans le deuxième chapitre les résultats expérimentaux seront analysés, des relations fonctionnelles du ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal brusquement élargi en rectangulaire seront présentées. Notamment, le rapport des hauteurs conjuguées, les longueurs caractéristiques du ressaut et la dissipation d'énergie. À travers notre contribution les résultats obtenus sont comparés avec le ressaut qui se forme entièrement dans le canal d'approche trapézoïdal et des conclusions intéressantes seront discutées.

Première partie

ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE RESSAUT

HYDRAULIQUE

INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE

Le but principal de cette partie bibliographique de notre travail est de synthétiser les travaux les plus intéressants entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique, ce phénomène beaucoup utilisé principalement pour dissiper l'énergie cinétique à l'aval des barrages a connu une attention particulière, vu son efficacité et son avantage économique.

Cette partie de notre étude sera divisée en trois chapitres.

- ✓ Le premier chapitre se consacre au ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire. Deux types seront alors abordés :
 - Le ressaut hydraulique classique, où nous allons parler de la première investigation systématique de *Bélanger (1928)* sur le ressaut hydraulique, puis les études de *Hager et Bremen (1989)* et de *Hager et al (1990)* seront discutées.
 - Par la suite, le ressaut hydraulique contrôlé sera présenté. on s'intéresse, notamment à l'étude de *Forster et Skrinde (1950)* concernant le ressaut contrôlé par seuil mince, suivi par l'étude de *Achour, Sedira et Debabeche (2002)*. Concernant le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse ou par marche positive, la contribution de *Forster et Skrinde (1950)* sera exposée.
- ✓ Le deuxième chapitre s'intéresse au ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. Comme son prédécesseur, il portera sur deux types du ressaut à savoir :
 - Le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal qui fera l'objet du premier axe. Dans lequel les études de *Hager et Wanoschek (1987-1989)* seront exposés.
 - Le deuxième axe portera sur le ressaut hydraulique contrôlé évoluant en canal trapézoïdal. Nous allons parler en particulier de l'étude expérimentale la plus récente de *Kateb, Debabache et Benmalek (2013)*.
- ✓ Le troisième chapitre traitera le ressaut hydraulique dans les canaux à élargissement brusque. Celui-ci sera divisé en deux axes :
 - Dans le premier axe qui portera sur les travaux entretenus de 1960 à 1990, nous discuterons les principales contributions sur la définition des paramètres hydrauliques régissant l'évolution du ressaut. Trois types de ressauts seront alors distingués, puis nous allons présenter les études menées dans chaque type.
 - Dans le deuxième axe, les études conduites de 1990 à 2015 feront l'objet de notre discussion, notamment ceux de *Bremen et Hager (1993)*, de *Zare et Doering (2011)*

et finalement celle de *Scorzini et al (2015)*, qui portera sur l'élimination du phénomène asymétrique connu dans ce type du ressaut.

Chapitre I

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

I.1. Introduction

Les premières investigations sur le domaine de ressaut hydraulique sont entretenues en canal rectangulaire, prismatique, presque horizontal et de rugosité nulle. Le ressaut évoluant dans ces conditions s'appelle le ressaut hydraulique classique.

Dans ce chapitre nous allons passer en revue les travaux entretenus dans le domaine de ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire à savoir :

- Ressaut hydraulique classique : d'abord, en premier lieu, nous allons présenter la classification de *Bradley et Peterka (1957)* du ressaut hydraulique en canal rectangulaire. En deuxième lieu, on va aborder la démonstration faite par *Bélanger (1928)*, qui prouve que le ressaut est régi par l'équation de la quantité de mouvement, suivi par la forme la plus simple du rapport des hauteurs conjuguées présenté par *Hager et Sinniger (1986)*. En dernier lieu et afin de confirmer que l'effet de frottement sur les hauteurs conjuguées est généralement négligé à l'issue de l'application du théorème de la quantité de mouvement, nous allons présenter l'étude de *Hager et Bremen (1989)*.

Ensuite, nous allons aborder l'étude de *Hager (1992)* concernant le profil de surface, puis, de *Hager et al (1990)* sur les longueurs caractéristiques de ressaut, notamment la longueur de rouleau développé et non développé. Enfin, le rendement de ressaut classique sera exposé, en comparant la formule trouvée avec celle de *Hager et Sinniger (1989)*.

- Ressaut hydraulique contrôlé : le ressaut hydraulique contrôlé fait l'objet de notre discussion. D'abord, la première investigation systématique de *Forster et Skrinde (1950)* concernant le ressaut contrôlé par seuil mince sera présentée, suivi par l'étude de *Achour, Sedira et Debabeche (2002)*. *Forster et Skrinde (1950)* ont aussi étudié le contrôle du ressaut par seuil à paroi épaisse d'une part, et par marche positive d'autre part.

I.2. Ressaut hydraulique classique

Le ressaut classique est la transition d'un régime torrentiel en régime fluvial dans un canal rectangulaire prismatique de pente nulle ou presque nulle. L'écoulement en amont du ressaut est caractérisé par un nombre adimensionnel, c'est le nombre de *Froude* F_1 « appelé également le coefficient cinétique », qui est donné par : $F_1 = \frac{V}{\sqrt{gh}}$, ce nombre représente la relation entre les forces d'inertie et celles de pesanteur ; En terme plus clair, il représente la

relation entre la vitesse de l'écoulement et celle de propagation des petites ondes (célérité d'onde) dans lequel :

V : est la vitesse moyenne de l'écoulement.

$V_c = \sqrt{gh}$: est la célérité des petites ondes, dans un canal rectangulaire de largeur infinie.

Quand la vitesse moyenne du courant dépasse la célérité, c'est-à-dire, les petites ondes ne peuvent pas se propager vers l'amont et $V > V_c = \sqrt{gh}$, le nombre de *Froude* $F_1 > 1$, et le régime est dit rapide ou torrentiel.

Si $V < V_c = \sqrt{gh}$, le $F_1 < 1$, les petites ondes se propagent vers l'amont, et le régime est dit lent ou fluvial.

Dans le cas où $V = V_c = \sqrt{gh}$, $F_1 = 1$, le régime est dit critique.

1.2.1. Classification du ressaut classique

Le nombre de *Froude* amont F_1 a une importance majeure quand il s'agit de distinguer les écoulements à surface libre. Pour des valeurs de $F_1 < 2$, l'apparence d'un ressaut hydraulique classique s'est modifiée en onde stationnaire pour $1 < F_1 < 1.4$, ou en onde brisée pour $1.4 < F_1 < 1.7$, le ressaut établie en telle configuration s'appelle ressaut ondulé (figure 1.1), selon la description de *Lauffer (1935) et Anderson (1978)*. Entre autre, le ressaut ondulé ne peut être considéré comme un dissipateur d'énergie.

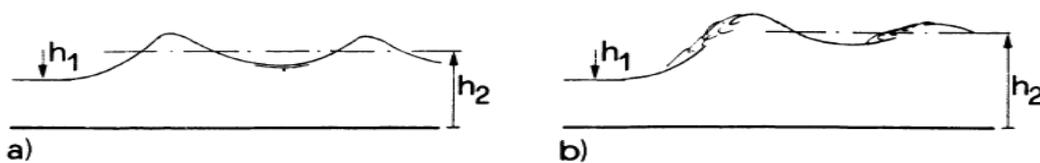


Figure 1.1 : Ressaut Hydraulique Ondulé, a) Onde stationnaire, b) Onde brisé

Bradley et Peterka (1957) ont catalogué et évalué les différentes formes de ressaut ; Ils ont proposé quatre (04) types de ressauts, en se basant sur le nombre de *Froude* amont F_1 :

Le pré-ressaut de $1.7 < F_1 < 2.5$: une série des tourbillons superficiels se développe pour $F_1 = 1.7$, elle augmente avec l'augmentation du F_1 , le pré-ressaut n'implique pas des problèmes pour les bassins de dissipation grâce à la surface de l'eau qui était un peu lisse et la distribution de la vitesse à l'aval est presque uniforme. Cependant, le rendement de ce type de ressaut est faible. (Figure 1.2)

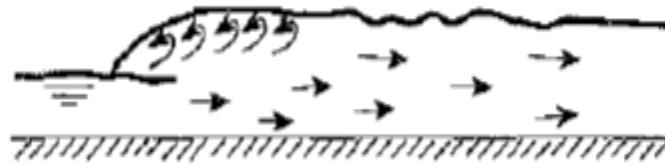


Figure 1.2 le pré-ressaut

Le ressaut de transition de $2.5 < F_1 < 4.5$: ce type de ressaut a un caractère pulsatif ; Le jet entrant est fortement oscillant à partir du fond vers la surface. Chaque oscillation produit une grande vague d'une période irrégulière, ce qui peut provoquer l'érosion des berges. Les ressauts de transition se produisent souvent dans les structures d'une basse charge. (Figure 1.3)



Figure 1.3 : Ressaut de transition

Le ressaut stable de $4.5 < F_1 < 9$: Ces types de ressauts ont de meilleures performances, car les ondes à l'aval sont limitées, la dissipation d'énergie est relativement élevée et le point où le courant à grande vitesse quitte le fond se situe presque à la section finale du rouleau. Un rendement entre 45% et 70% peut être obtenu. (Figure 1.4)



Figure 1.4 : Le Ressaut stable

Le ressaut clapoteux $F_1 \geq 9$:

A cette valeur de F_1 , le jet à grande vitesse ne peut pas rester sur le fond. Les limaces d'eau glissant à la face amont du ressaut, tombent par intermittence dans le jet à haute vitesse et

gènèrent des ondes supplémentaires à l'aval. La surface du ressaut est généralement très accidentée et contient une quantité considérable de pulvérisation. (Figure 1.5)

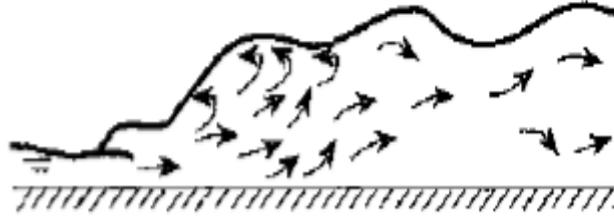


Figure 1.5 : Le ressaut agité ou clapoteux

Peterka (1958) a ajouté que :

- Toutes les quatre formes de ressauts peuvent être trouvées dans les bassins de tranquillisation.
- Un pré-ressaut n'a pas besoin d'accessoires, mais la longueur de bassin doit être égale à la longueur du ressaut L_j .
- Un ressaut de transition pose des problèmes des vagues à la section aval. Les blocs ou autres accessoires n'ont pas beaucoup d'influence dans le bassin. Les difficultés avec les vagues d'eau à l'aval peuvent être maîtrisées par des supprimeurs d'ondes.
- Les ressauts stables ne présentent aucune difficulté. Les chicanes et les seuils fournissent des moyens utiles pour accroître l'efficacité et pour faire diminuer la longueur du ressaut.
- Les ressauts agités ou clapoteux sont sensibles aux variations du niveau d'eau aval. Il est conseillé de déterminer une profondeur d'écoulement plus grande que la profondeur nécessaire pour que le ressaut reste sur le tablier.

1.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Le ressaut hydraulique classique est caractérisé par la profondeur amont h_1 , la vitesse amont moyenne $V_1 = \frac{Q}{bh_1}$, sachant que $F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gh_1}} > 1$.

Où, Q ; est le débit volume et b ; la largeur du canal rectangulaire, le pied du ressaut est situé à $X = X_1$. Plus en aval, le jet entrant se trouve fortement perturbé par le ressaut, dans le fond du canal, la direction de l'écoulement est vers l'amont, de plus en plus vers la surface libre, l'eau et l'air entraînés par le ressaut reflux et forment une zone de rouleau. Le rouleau est limité à la longueur qui porte son nom L_r , plus en aval, l'écoulement devient plan et l'air se

trouve libéré. La fin du ressaut est située dans la position $X = X_2$, telle que la longueur du ressaut est égale à $L_j = X_2 - X_1$. (Figure 1.6)

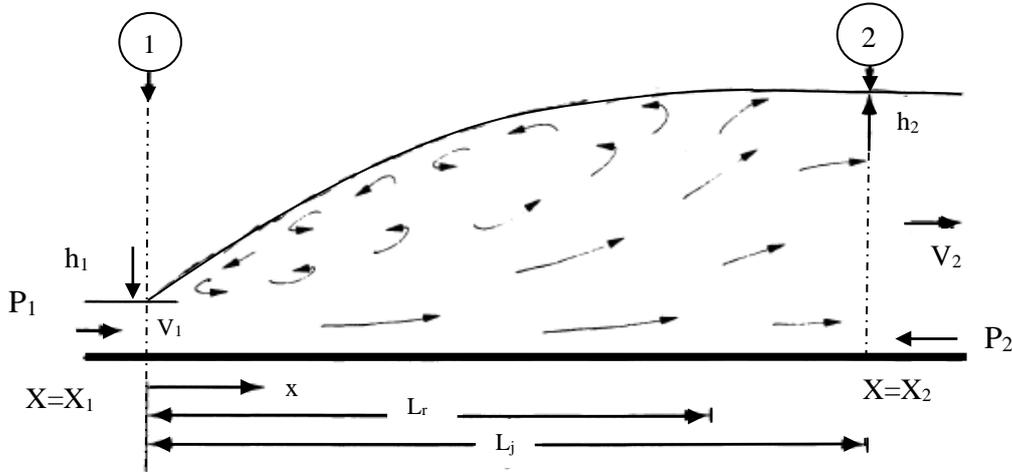


Figure 1.6 : Ressaut hydraulique classique – Notation

Le problème classique posé par le ressaut hydraulique est le calcul de l'une des profondeurs conjuguées en fonction de l'autre pour un débit et un canal donnés.

On ne peut pas appliquer le théorème de *Bernoulli* entre les sections A_1 et A_2 pour déterminer les profondeurs conjuguées du ressaut, étant donné que le terme ΔH , qui représente la perte de charge, n'est pas connu et que les formules de régime uniforme ne sont pas applicables.

D'après le résultat classique dû à *Bélanger (1828)* qui s'obtiendra en appliquant le théorème *d'Euler* qui ne fait intervenir que les forces extérieures et qui ne met pas en cause les pertes de charges dues à la turbulence et aux remous intérieurs. L'auteur a appliqué ce théorème à la masse liquide contenue entre les sections extrêmes du ressaut (A_1) et (A_2) et il a supposé que :

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

Compte tenu des hypothèses simplificatrices précisées ci-dessus, l'application du théorème *d'Euler* entre la section initiale et finale du ressaut conduit à :

$$\beta_2 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_2 - \beta_1 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_1 = P_1 - P_2 + G \cdot \sin\theta - f \tag{1.1}$$

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 : masse volumique du liquide en mouvement.

Q : débit volume.

V : vitesse d'écoulement.

g : accélération de la pesanteur.

G : poids de la tranche liquide située entre 1 et 2.

P_1 et P_2 : forces des pressions hydrostatiques.

θ : angle d'inclinaison du canal (pour un ressaut classique $\theta = 0^\circ$)

f : force de frottement (considérée comme négligeable).

En tenant compte de tous ces paramètres, la relation (1.1) s'écrit :

$$\frac{1}{2} \bar{\omega} \cdot b \cdot h_1^2 + \rho \cdot Q \cdot V_1 = \frac{1}{2} \bar{\omega} \cdot b \cdot h_2^2 + \rho \cdot Q \cdot V_2 \quad (1.2)$$

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{g \cdot b^2 \cdot h_1^3} \quad (1.3)$$

Et sachant que : $V_1 = \frac{Q}{A_1}$, et $A_1 = b \cdot h_1$

La relation (1.2) devient :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (1.4)$$

C'est l'équation de *Bélanger (1828)*, liant le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut au nombre de *Froude* F_1 . Pour des valeurs du nombre de *Froude* $F_1 > 2$, *Hager et Sinniger (1985)*, ont donné une relation plus simple que la relation (1.4) ;

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2} \quad (1.5)$$

L'équation. (1.5) montre que Y et F_1 sont liés linéairement. Une augmentation du débit Q dans un canal avec une largeur de fond b et une hauteur amont h_1 , nécessite une augmentation proportionnelle de niveau aval h_2 , afin de garder la position du ressaut.

L'effet de frottement sur le rapport des hauteurs conjuguées est étudié par *Hager et Bremen (1989)*. En tenant compte de l'étendue verticale de la zone principale de l'écoulement et de l'équation de *Blasius* pour les frottements sur les parois, les chercheurs sont arrivés à :

$$Y = Y_0 [1 - 3.25\omega \cdot e^{F_1^{1/7}} \cdot (\log R_1^*)^{-3}] \quad (1.6)$$

Où:

$$Y_0 = Y^* [1 - 0.70 \cdot (\log R_1^*)^{-2.5} e^{F_1/8}] \quad (1.7)$$

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

$R_1^* = \frac{Q}{vb}$: nombre de Reynolds modifié de l'écoulement incident avec :

ν ; viscosité cinématique.

Y_0 : rapport des hauteurs conjuguées quand $\omega = 0$.

Y^* : rapport des hauteurs conjuguées selon la relation (1.4).

Les équations (1.6) et (1.7) indiquent que le rapport des hauteurs conjuguées Y , dépend non seulement de F_1 mais également de caractère visqueux de l'écoulement incident et de la largeur relative du canal.

Les deux derniers effets peuvent devenir significatifs à la fois quand F_1 , ω sont grands, ou pour des petites valeurs de R_1^* . Cela peut se produire sur des modèles réduits, et les équations (1.6) et (1.7) décrivent un effet d'échelle inhérente au ressaut classique.

Quand les valeurs de $F_1 < 12$, les équations. (1.4) et (1.5) peuvent être utilisées lorsque $R_1^* > 10^5$.

1.2.3. Profil de surface libre du ressaut

Bien que le ressaut hydraulique soit un phénomène fortement turbulent, dans lequel une pulsation de l'écoulement, un entrainement de l'air, des tourbillons et des vagues sont générées. Il est décrit au moyen des quantités moyennes simples, ce concept est en accord avec la description de l'écoulement turbulent fait par *Reynolds*.

La quantité visuelle reflétant l'écoulement turbulent du ressaut hydraulique est la surface libre. La dynamique du ressaut est amplifiée par l'entrainement de l'air. La géométrie de profil de surface a été étudiée par *Bakhmeteff et Matzke (1936)*, *Schroder (1963)*. *Rajaratnam et Subramanya (1968)* ont reconsidéré quelques travaux antérieurs, surtout celui de *Rajaratnam (1962)*, pour des valeurs de nombre de *Froude* amont F_1 comprises entre 3,5 et 11,5, ils ont présenté une nouvelle expression de profil de surface $\eta(X)$ dans laquelle :

- $\eta = \left(\frac{4}{3}\right) \frac{(h-h_1)}{(h_2-h_1)} = \frac{4}{3} y$: coordonnée verticale.
- $X = \frac{x}{L_s}$: coordonnée longitudinal, dans laquelle la longueur caractéristique L_s est présentée :

$$\frac{L_s}{h_1} = 5,08F_1 - 7,82 \quad (1.8)$$

L'échelle de longueur présentée par *Sarma et Newnham (1973)* dans un intervalle de nombre de *Froude* amont $1.21 < F_1 < 3.79$ pour les coordonnées longitudinales et verticales est respectivement :

$$\frac{L_N}{h_1} = 6,73(F_1 - 1) \tag{1.9}$$

Et h_N , dans le rapport constant $\frac{(h_2-h_1)}{(h_N-h_1)} = 1.07$

Récemment, *Hager (1993)* a présenté un travail dans lequel il a pris comme coordonnée longitudinale $X = \frac{x}{L_r}$: L_r est la longueur du Rouleau, pour la coordonnée verticale : $y = \frac{(h-h_1)}{(h_2-h_1)}$. *Hager (1993)* a tracé une courbe de profil de surface, cette courbe est de type

hyperbolique (Figure 1.7). Elle est exprimée comme suit :

$$y = \tanh(1.5X) \tag{1.11}$$

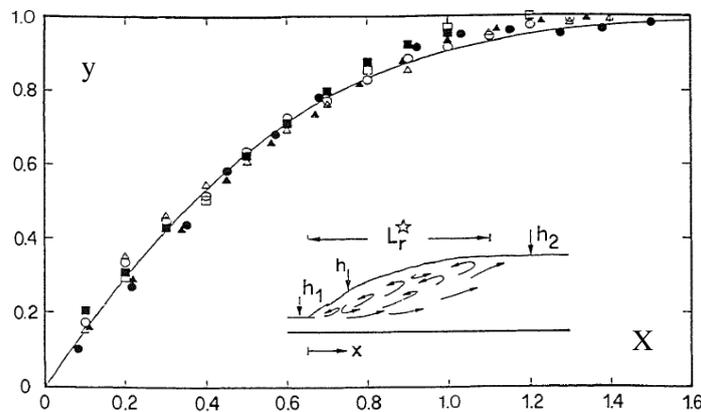


Figure 1.7 : Profil de la surface libre, $y(X)$ du ressaut hydraulique classique pour $F_1 = 4.3$ (O), 5.5 (Δ), 6.85 (\blacksquare) et 8.9 (\square), ressaut provoqué par déversoir en aval (\bullet), Eq 1,11 (—)

1.2.4. La longueur du rouleau

Plusieurs tentatives ont été conduites par différents chercheurs dans le but de définir les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique, mais ces tentatives présentent des controversés et une ambiguïté dans la façon de déterminer ces longueurs.

Safranez (1929) a injecté des colorants pour pouvoir définir la fin du rouleau ; *Einwachter (1932)*, *Bakhmeteff et Matzke (1936)* ont défini la longueur du ressaut comme la distance entre la section initiale et finale de ressaut dans laquelle la profondeur est maximale, la position de cette section est loin de la fin du rouleau.

Hager et al (1990) ont conduit une étude expérimentale, ils ont trouvé qu'il y a deux (02) types d'écoulement dans lesquels deux (02) types de Rouleau sont définies ; Développé et non-Développé, la figure (1.8) montre la différence entre les deux.

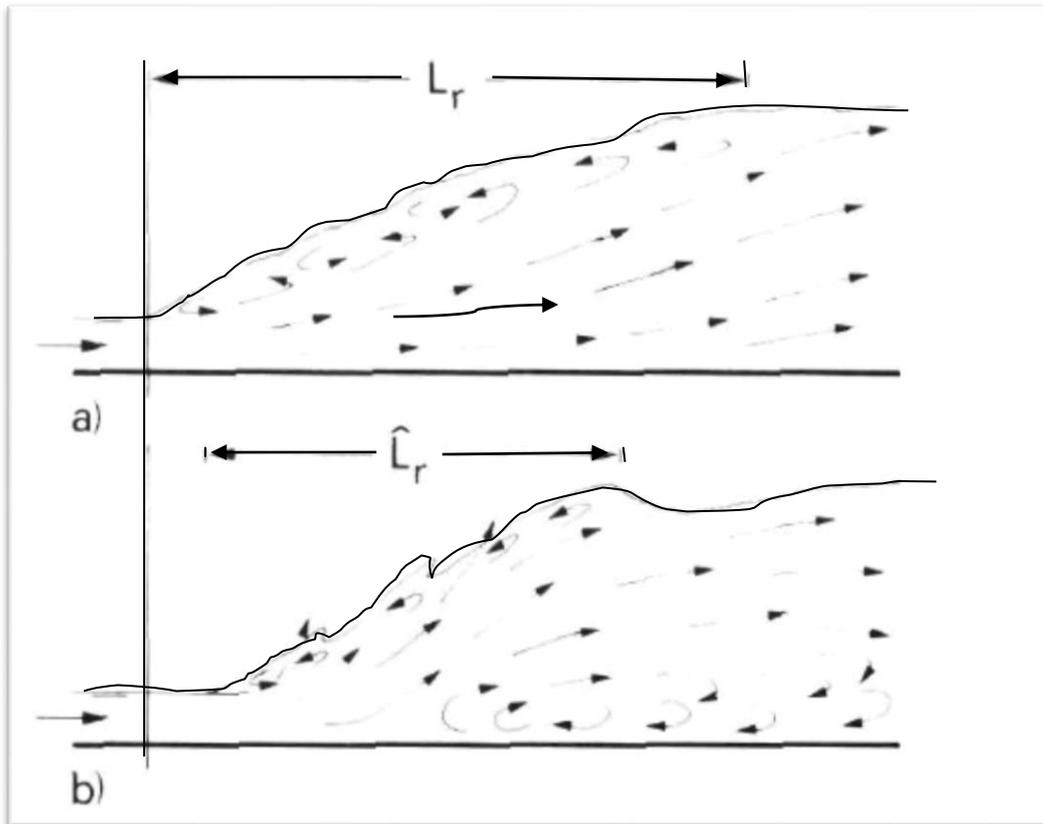


Figure 1.8 : Ressaut hydraulique avec écoulement à Rouleau a) Développé b) non-Développé.

Une description détaillée du phénomène a été présentée. La densité des bulles d'air est augmentée à l'extrémité aval du rouleau, les bulles d'air quittent le mélange air-eau et la surface devient presque horizontale, la vitesse dans cet endroit est presque nulle (point de stagnation), mais des vagues ont continué à perturber l'écoulement et à emporter ces bulles d'air à l'aval suivant l'axe de l'écoulement, contrairement aux côtés, dans lesquelles les bulles d'air sont écoulées au sens inverse de l'écoulement principal.

Ce phénomène est dû à la séparation de l'écoulement de la masse liquide au fond du canal. Cette séparation se produit à l'aval et se propage vers l'amont jusqu'à ce qu'elle se trouve au pied du ressaut qui avance un peu par rapport à sa position initiale ; La surface libre du ressaut est très inclinée, c'est le rouleau non-développé.

D'une façon brusque, le phénomène de séparation disparaît, et un rouleau développé est généré à nouveau.

Écoulement avec rouleau développé : l'ensemble du ressaut est entièrement en plan continu et quasi uniforme, la masse liquide restera collée au fond du canal et la section de la fin du rouleau est bien définie à l'endroit de point de stagnation. Des bulles d'air sont augmentées

d'une façon intensive à l'aval du rouleau et seulement des petites vagues sont générées. (fig.1.8.a)

Écoulement avec rouleau non-Développé : vu l'intensité de la séparation de la masse liquide au fond du canal, l'écoulement principal s'est dévié et le pied du ressaut avance vers l'aval, alors que la fin du rouleau se déplace vers l'amont, de ce fait, la longueur du rouleau est diminuée. Des vagues lourdes et denses sont générées à l'aval et résultent une surface perturbée. Cet écoulement est accompagné par une vitesse maximale qui apparaît prêt de la surface libre. (fig.1.8.b)

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

$$\lambda_r = -12 + 160.Tgh\left(\frac{F_1}{20}\right) \text{ Pour } \omega = \left(\frac{h_1}{b_1}\right) < 0.1 \quad (1.12)$$

$$\lambda_r = -12 + 100.Tgh\left(\frac{F_1}{12.5}\right) \text{ Pour } 0.1 < \omega < 0.7 \quad (1.13)$$

«Tgh» indique la tangente hyperbolique.

Il faut noter que pour des petites valeurs de Froude amont F_1 . Notamment si $F_1 < 8$ les auteurs ont proposé une relation plus simple que (1.12) et (1.13), celle-ci à une forme d'équation linéaire de pente égale à 8.

$$\lambda_r = \frac{L_r}{h_1} = 8.(F_1 - 1.5) ; 2.5 < F_1 < 8 \quad (1.14)$$

1.2.5. La longueur de ressaut

La seconde longueur caractéristique est la longueur du ressaut L_j , plusieurs définitions ont été présentées afin de localiser la section finale du ressaut.

Bakhmeteff et Matzke (1936) ont défini la fin du ressaut comme la section dans laquelle la profondeur de l'eau est maximale, ils ont corréler la longueur du ressaut et sa hauteur, ils ont présenté la formule analytique suivante :

$$L_j = 5H_j \quad (1.15)$$

$$\text{Formule de Smetana (1933)} \quad L_j = 6(h_2 - h_1) \quad (1.16)$$

Toutefois, il est possible d'estimer la longueur du ressaut si :

- la surface libre est pratiquement horizontale.

- la surface de turbulence du rouleau est faible.
- les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.
- l'écoulement graduellement varié apparaît à l'extrémité aval du rouleau.

Toutes ces définitions ont comme objectif de spécifier la limite aval de la discontinuité et de la turbulence, au-delà de lesquelles la protection du lit n'est plus nécessaire.

La question qui se pose ici est : si le lit doit, ou non, être protégé contre les forces d'érosion ? La réponse n'est possible qu'après la comparaison entre les forces tractrices et les forces de cisaillement le long du fond du canal nécessaires pour engendrer l'érosion du lit. Donc il est nécessaire de savoir d'une part, la distribution de la vitesse et de la pression, et d'autre part, les caractéristiques érosifs du matériau constituant le fond du canal.

Dans la pratique, une approche plus simple est habituellement utilisée. Normalement, la longueur du ressaut est prise comme la distance nécessaire pour la protection du fond du canal. Selon *Bradley et Peterka (1957 - 1958)*, la longueur du ressaut est généralement adoptée, (Figure 1.9).

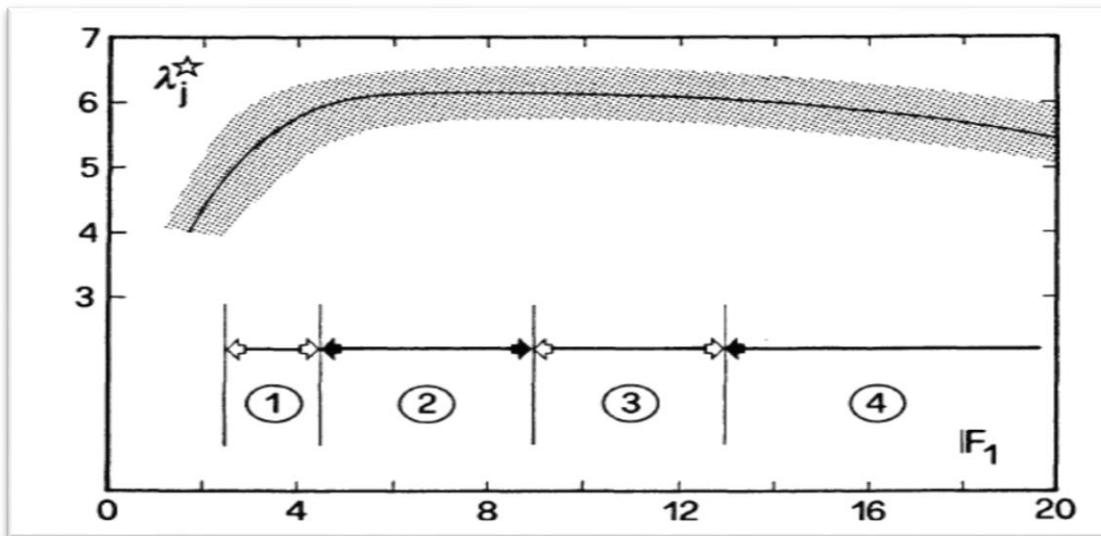


Figure 1.9 : Longueur du ressaut classique L_j/h_2 en fonction de F_1 (Peterka 1958). Domaines du ressaut : (1) ressaut de transition, (2) ressaut bon, (3) ressaut acceptable, (4) ressaut moins accepté.

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

$$\frac{L_j}{h_1} = 220. \operatorname{tgh} \left[\frac{(F_1-1)}{22} \right] \tag{1.17}$$

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

$$\frac{L_j}{h_2} = 6 \tag{1.18}$$

Selon *Hager et Sinniger (1985)*, pour des valeurs de nombre de *Froude* F_1 au-delà de 3, on peut également appliquer la formule empirique suivante.

$$\frac{L_j}{h_2} = \frac{35\sqrt{F_1}}{(8+F_1)} \tag{1.19}$$

Et qui conduit aux mêmes résultats.

I.2.6. Rendement du ressaut hydraulique

L'intérêt technique du ressaut hydraulique est particulièrement dû à la dissipation d'énergie mécanique qu'il permet de réaliser, par l'application du théorème de *Bernoulli (1738)* ; On peut déterminer la perte d'énergie, $\Delta H_{12} = H_1 - H_2$ produite par le ressaut, en admettant que :

$Z_1 = Z_2$ (canal horizontal, figure 1.10), on obtient :

$$\Delta E_{12} = \Delta H_{12} = \left(\alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \right) - \left(\alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \right) \tag{1.20}$$

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

$$H_1 = \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \tag{1.21}$$

Et la charge totale dans la section aval est :

$$H_2 = \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \tag{1.22}$$

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

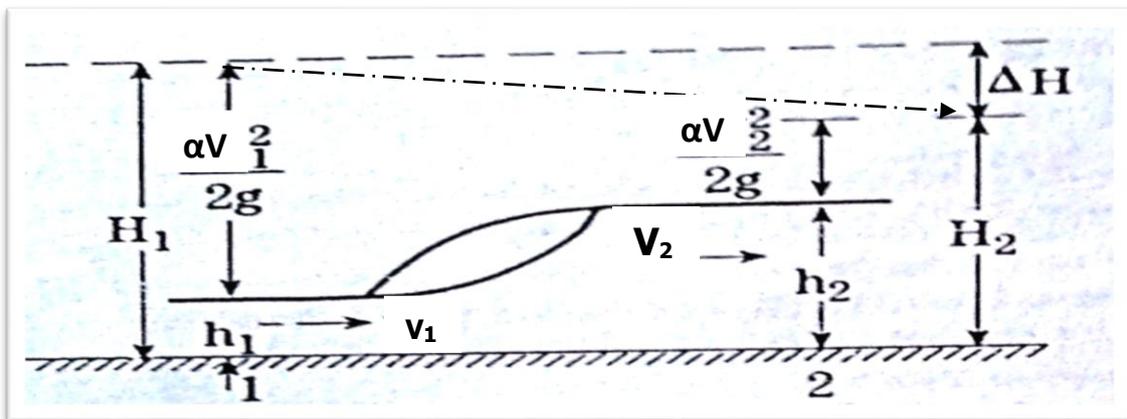


Figure 1.10 : (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (1.23)$$

$$\text{Où : } A_1 = b \cdot h_1$$

$$A_2 = b \cdot h_2$$

Donc, en introduisant la relation (1.23) dans (1.20) on obtient, tous calculs faits, l'expression classique de la perte de charge due au ressaut en canal rectangulaire de pente faible ou nulle.

$$\Delta H_{12} = (h_1 - h_2) + \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) \cdot \left(\frac{q^2}{2g} \right) \quad (1.24)$$

$q = \frac{Q}{b}$, est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'expression de la quantité de mouvement définie par la relation (1.2).

$$\frac{q^2}{2g} = \frac{(h_1 \cdot h_2^2 + h_1^2 \cdot h_2)}{4} \quad (1.25)$$

En remplaçant la relation (1.25) dans (1.24) on obtient :

$$\Delta H_{12} = \frac{(h_2 - h_1)^3}{(4h_2 \cdot h_1)} \quad (1.26)$$

Donc à partir de la relation (1.26), on peut conclure que la perte de charge est due au ressaut classique et ne dépend que des hauteurs conjuguées. La capacité de dissipation du ressaut est représentée par η :

$$\eta = \frac{\Delta H_{12}}{H_1} = \frac{(H_1 - H_2)}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (1.27)$$

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 (1.21) et (1.22) et en tenant compte de la relation (1.3) du nombre de *Froude* amont F_1 , on obtiendra :

$$H_1 = h_1 \cdot \left[1 + \frac{F_1^2}{2} \right] \quad (1.28)$$

$$H_2 = h_1 \cdot \left[Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right] \quad (1.29)$$

Où Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par la relation (1.4) de *Bélanger (1828)*.

En remplaçant (1.28) et (1.29) dans l'expression du rendement du ressaut (1.27) on obtiendra :

$$\eta = 1 - \left[\frac{\left(Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right)}{\left(1 + \frac{F_1^2}{2} \right)} \right] \quad (1.30)$$

Hager et Sinniger (1985) ont proposé une expression approchée qui nous permet de calculer tous simplement le rendement du ressaut et cela pour un nombre de Froude amont $F_1 > 2$

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right]^2 \quad (1.31)$$

Les relations (1.30) et (1.31) sont représentées graphiquement sur un système des coordonnées cartésiennes, illustrées par la figure (1.11)

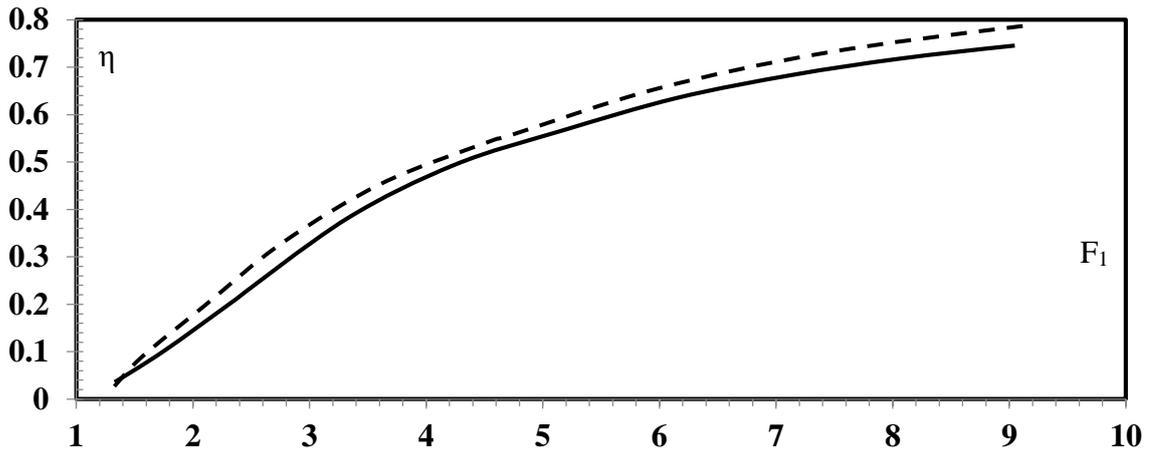


Figure 1.11 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 (—) Courbe tracée selon la relation (1.30), (----) courbe tracée Selon la relation (1.31)

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 amont $F_1 \geq 5.1$ et que les rendements calculés par l'application de la relation (1.31) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.30), d'autre part; l'écart maximum observé peut atteindre les 2 %.

I.3. Ressaut hydraulique contrôlé

I.3.1. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire

I.3.1.1. Approche de Forster et Skrinde (1950)

I.3.1.1.1. Seuil continu à paroi mince

La première tentative systématique d'étudier le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince est certainement celle Forster et Skrinde (1950), ils ont développé un diagramme, liant les trois paramètres adimensionnels suivants :

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

Le seuil constitué la limite aval du ressaut ($x=L_r$), il est dénoyé et fonctionne alors comme un déversoir. Trois valeurs de la position relative du seuil ont été considéré ($x/h_2=3 ; 5$ et 10), (figure 1.12).

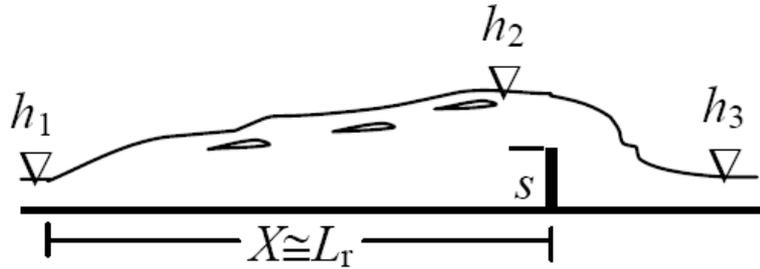


Figure 1.12 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

La profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval n'a ainsi aucune influence sur le débit franchissant le seuil. Cette condition est satisfaite lorsque :

$$h_3 < h_2 - 0,75 \cdot s \tag{1.32}$$

La figure 1.13 montre la variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les valeurs 3, 5 et 10 de la position relative x/h_2 du seuil.

Ce diagramme permis l'analyse de l'effet d'un seuil donné pour des conditions amont et aval connus.

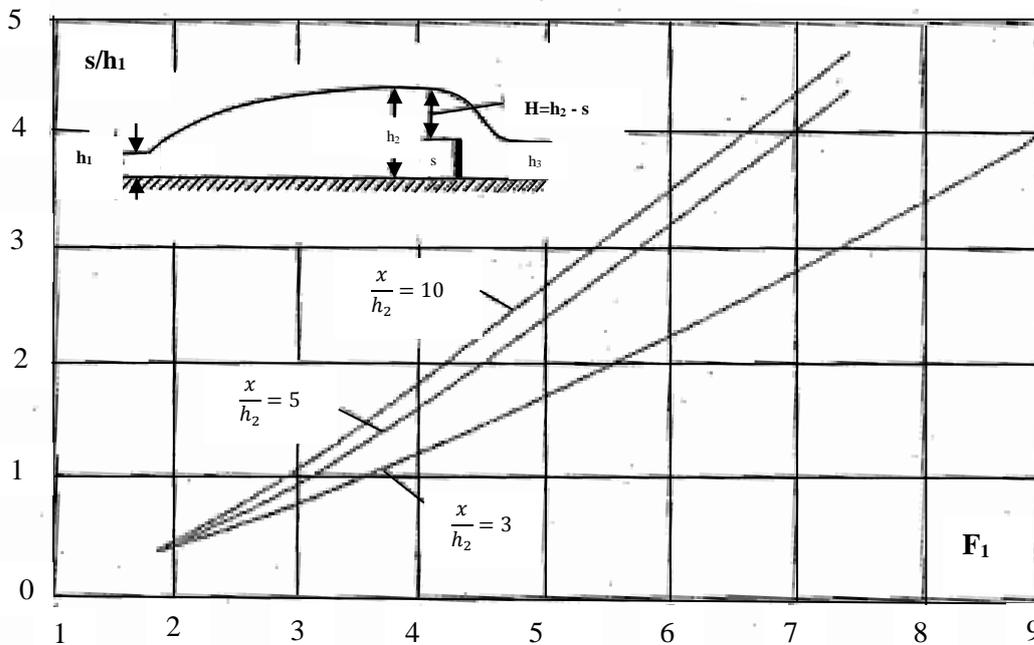


Figure 1.13 : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince pour quelques valeurs de x/h_2 , selon Forster et Skrinde (1950)

Dans le diagramme (figure 1.13), chaque point est représenté par la paire de coordonnées ($F_1, s/h_1$). Si le point se situe entre deux courbes, le ressaut se produit dans une position

relative (x/h_2) indiqué par une valeur interpolée. Les points qui se situent au-dessus de l'une des courbes représentent les conditions sous lesquelles le seuil est trop haut et le ressaut se déplace vers l'amont.

Les points qui se situent en dessous de l'une des courbes représentent les conditions sous lesquelles le seuil est trop bas, donc le ressaut se déplace vers l'aval.

Le dimensionnement des bassins d'amortissement contrôlé par seuil à paroi mince est basé sur le diagramme représenté sur la figure 1.13. Hors, cette méthode graphique nécessitent des interpolations et seules trois courbes sont proposées. Ces considérations ont motivé *Achour et al (2002)* a conduit une étude expérimentale dans le but de compléter les essais de *Forster et Skrinde (1950)*, et ainsi de définir une relations explicite $f(F_1, S, x/h_2) = 0$.

1.3.1.1.2. Etude de Achour, Sedira et Debabeche (2002)

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

Une très large gamme de valeurs de la hauteur relative s/h_1 a été obtenue $1 \leq s/h_1 \leq 6$, ainsi que une gamme pratique du nombre de *Froude* F_1 tel que $3 \leq F_1 \leq 9$.

Les valeurs expérimentales de la hauteur relative S du seuil à paroi mince en fonction du nombre de *Froude* F_1 sont représentées graphiquement sur la figure 1.14.

L'analyse des mesures expérimentales obtenues a surtout montré que la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil est liée au nombre de *Froude* F_1 par une relation de type puissance :

$$S = C_0(F_1 - 1)^\beta \tag{1.33}$$

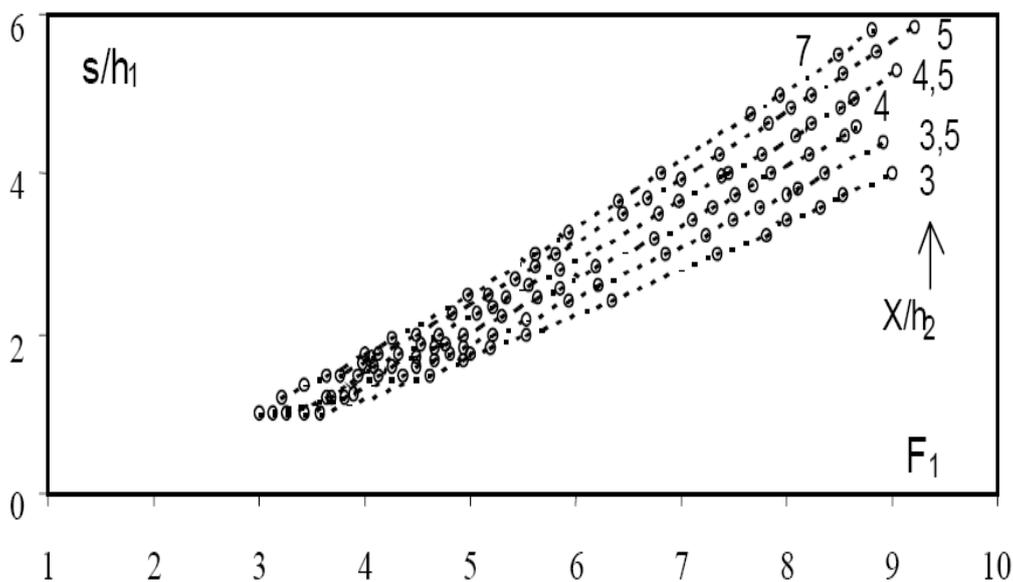


Figure 1.14 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de x/h_2 .

Une analyse complémentaire a permis d'écrire :

$$S = 0,0604 \left(\frac{x}{h_2}\right) + 0,1186(F_1 - 1)^{1,25} \quad \text{Pour } 3 \leq x/h_2 \leq 5. \quad (1.34)$$

$$S = 0,0086 \left(\frac{x}{h_2}\right) + 0,379(F_1 - 1)^{1,25} \quad \text{Pour } 5 \leq x/h_2 \leq 10. \quad (1.35)$$

La figure 1.14 montre que les courbes se rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que x/h_2 augmente. Il apparaît ainsi que dans la gamme relativement large $5 \leq x/h_2 \leq 7$, voire même $5 \leq x/h_2 \leq 10$, la variation que subit la hauteur relative S pour le même nombre de Froude F_1 n'est pas significative.

I.3.1.1.3. Seuil continu à paroi épaisse

Pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse illustré dans figure (1.15), l'écoulement dans la section 2 est en régime fluvial de profondeur h_2 . Comme le débit déverse librement par-dessus le seuil, l'écoulement est en régime critique de profondeur h_c , il devient de nouveau torrentiel à l'extrémité aval dont la profondeur finale h_m est minimale (section m).

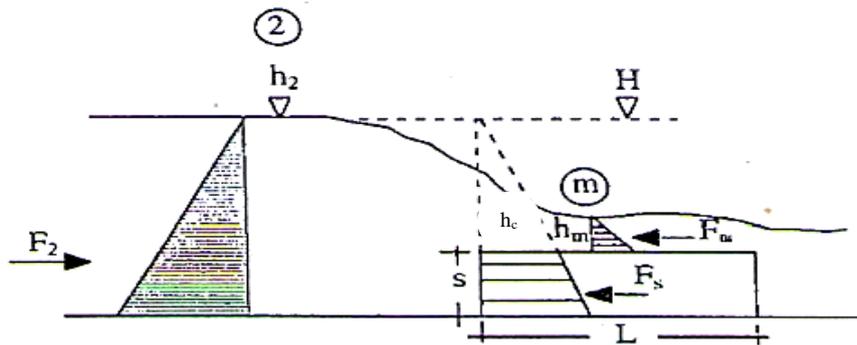


Figure 1.15 : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions

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 . Le paramètre x / h_2 n'a ainsi théoriquement aucune influence sur le contrôle du ressaut.

$$\frac{21,33.F_1^2}{\sqrt{1+8F_1^2-1}} = \frac{\left(\sqrt{1+8F_1^2-1}-2\cdot\frac{s}{h_1}\right)^3}{\sqrt{1+8F_1^2-1+2\cdot\frac{s}{h_1}}} \quad (1.36)$$

Cette équation donne la relation entre s/h_1 et F_1 , elle peut être représentée par la courbe indiquée dans la figure 1.16. Cette courbe peut servir de guide pour le design d'un bassin d'amortissement en utilisant un seuil à paroi épaisse comme un accessoire de contrôle du ressaut, à condition que :

$$h_3 < \frac{(2h_2 + s)}{3} \tag{1.37}$$

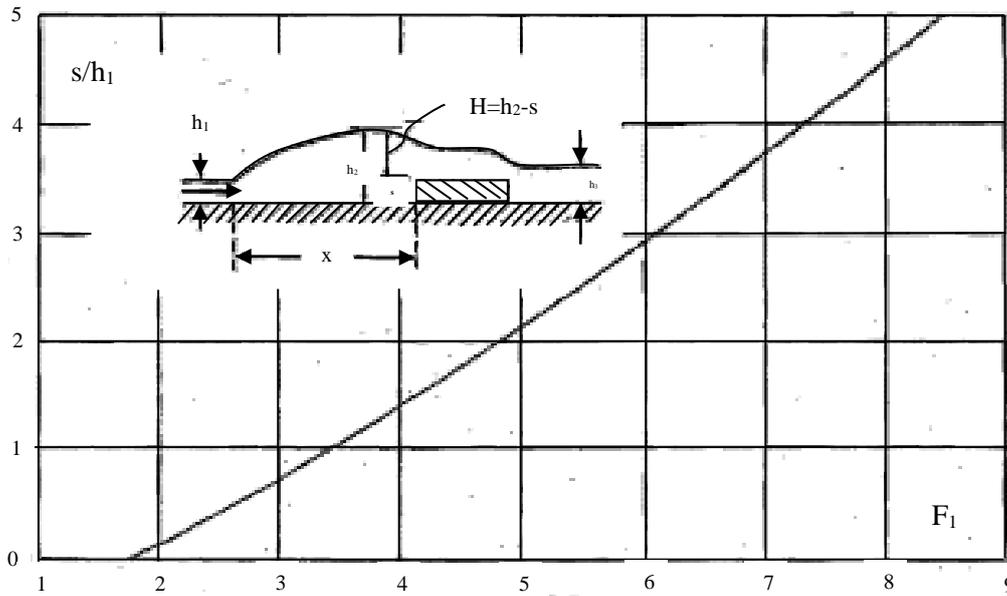


Figure 1.16 : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation (1.37)

1.3.1.1.4. La marche positive

La figure 1.17 représente un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive de hauteur « s » franchi par un écoulement de profondeur h_3 .

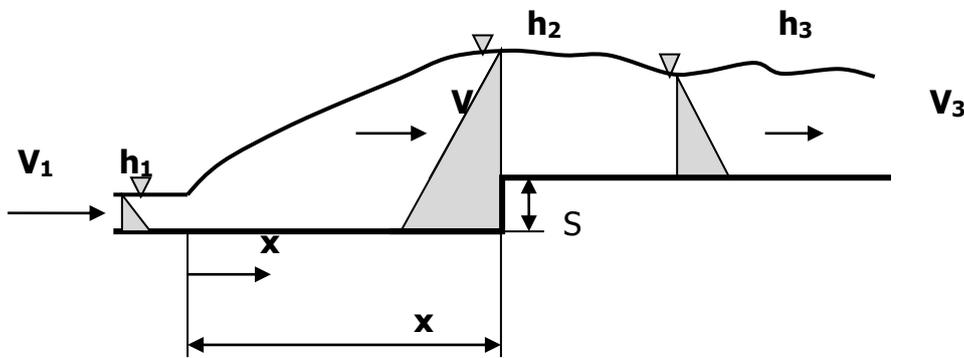


Figure 1.17 : Ressaut forcé par marche positive de hauteur "s", les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions

A la base des études expérimentales effectuées au laboratoire, Forster et Skrinde (1950), ont développé un diagramme (figure 1.18) montrant la relation entre le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative s/h_1 , et h_3/h_1 pour : $x = 5(s + h_3)$.

La consistance de la relation est vérifiée théoriquement, en utilisant le théorème de la quantité de mouvement, similaire à celle obtenue pour le seuil à paroi épaisse.

Ce diagramme a permis de déterminer la performance d'une marche donnée quand les paramètres V_1 , h_1 , h_2 , h_3 et s sont connues.

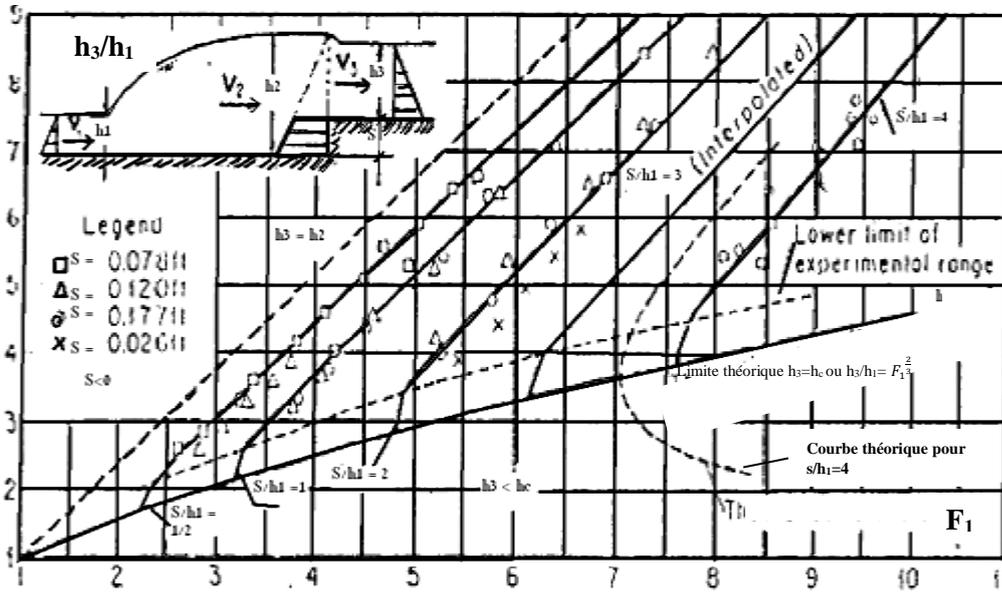


Figure 1.18 : Variation du nombre de Froude F_1 , en fonction de h_3/h_1 et de la hauteur relative s/h_1 de la marche positive, selon Forster et Skrinde (1950)

Dans le diagramme, si le point défini par $(F_1, h_3/h_1)$ se situe :

- 1- au-dessus de la ligne $h_3=h_2$, la marche sert à augmenter l'effet de la submersion.
- 2- Entre les lignes $h_3=h_2$ et $h_3=h_c$, la position du point indique l'effet de la marche sur l'écoulement.
- 3- Le point sur l'une des courbes s/h_1 , le ressaut se forme avec $x=5(s+h_3)$.
- 4- A gauche et au-dessus de l'une des courbes, la marche est trop haute, et le ressaut se déplace vers l'amont.
- 5- A droite de l'une des courbes, la marche est trop basse, et le ressaut se déplace vers l'aval.
- 6- En-dessous de la ligne $h_3=h_c$, l'écoulement à l'aval de la marche est torrentiel, le ressaut sera suivi par une section critique créée sur la crête de la marche, dans ce cas, la marche fonctionne comme un seuil à paroi mince et le diagramme représenté dans la figure 1.13 peut être utilisé.

I.4. 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'abord, nous avons constaté 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.

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.

Par la suite, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince et épais a été examiné par *Forster et Skrinde (1950)*. Pour 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.

Achour, Sedira et Debabeche (2002) ont conduit une étude expérimentale du ressaut contrôlé par seuil à parois mince dans le but de compléter celle de *Forster et Skrinde (1950)*, ils ont proposé des relations explicites permettant la détermination de la hauteur relative du seuil S en fonction de sa position relative x/h_2 et de nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident.

Concernant le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse, *Forster et Skrinde (1950)* ont pu présenter une courbe issue de l'application de la théorie de quantité de mouvement. Cette courbe illustre la variation de la hauteur relative du seuil S en fonction de nombre du *Froude* F_1 de l'écoulement incident.

Enfin, *Forster et Skrinde (1950)*, ont étudié aussi 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.

Chapitre II

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL

II. 1. Introduction :

Le ressaut hydraulique évaluant dans des canaux non-rectangulaire a reçu une véritable attention, notamment en canal trapézoïdal, la performance du ressaut dans ce type de canal présente un intérêt considérable pour des applications pratiques, étant donné que le profil trapézoïdal présente des avantages économiques pour des petites angles d'inclinaison des parois en comparant avec des parois verticaux dans un canal rectangulaire.

Ce chapitre sera divisé en deux axes, dans le premier nous allons présenter les travaux de *Hager et Wanoschek (1987-1989)* en canal trapézoïdal prismatique, le deuxième sera consacré à la contribution expérimentale la plus récente de *Kateb, Debabache et Benmalek (2013)* reflétant l'effet de la marche positive sur le contrôle du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal.

II. 2. Généralité :

Bien que la première contribution systématique dans l'étude du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal soit de *Posey et Hsing (1938)*, qui ont trouvé que le rapport des hauteurs conjuguées observé est convenable avec celui trouvé théoriquement en appliquant l'équation de la quantité de mouvement. Cependant, les caractéristiques de l'écoulement sont un peu différentes de ce qui a été rencontré dans le cas d'un canal rectangulaire, au lieu d'une forme droite de pied du ressaut par rapport à l'axe de canal, ils ont remarqué la formation de deux ailes dans chaque côté du canal trapézoïdal.

La longueur du ressaut mesurée le long de l'axe du canal trapézoïdal a été trouvée moins définie que dans un canal rectangulaire.

Il faut noter que la formule générale de nombre de *Froude* s'écrit :

$$F^2 = \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial h}$$

Pour les canaux trapézoïdaux symétriques, la section mouillée est $A = bh + mh^2$, comme on a

$\frac{\partial A}{\partial h} = b + 2mh$, le nombre de *Froude* devient :

$$F = \frac{Q}{bh + mh^2} \left[\frac{b + 2mh}{g(bh + mh^2)} \right]^{1/2}$$

Le canal est rectangulaire si $m = 0$, et triangulaire si $b = 0$.

Silvestre (1964) a conduit une étude dans laquelle l'expérimentation ne couvre que des valeurs du nombre de *Froude* amont $F_1 < 4$, toutefois, les résultats trouvés théoriquement n'ajuste pas bien avec l'observation, une seule série couvre des valeurs de nombre de *Froude* entre $4 < F_1 < 8$, puisque M est assez petite, la différence avec le profil rectangulaire est devenue négligeable.

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

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

Le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal est trouvé plus efficace que son homologue en canal rectangulaire

Plus récemment, *Kateb, Debabache et Benmalek (2013)* ont étudié expérimentalement l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal.

Une étude comparative entre les caractéristiques du ressaut contrôlé et le ressaut forcé type A par marche positive a conclu que pour le même nombre de *Froude* F_1 , la profondeur conjuguée aval et la position de la marche sont plus réduites dans le ressaut forcé type A que pour son homologue contrôlé par marche. Le rendement est trouvé quasi identique pour les deux configurations.

II.3. Ressaut hydraulique classique dans un canal trapézoïdal

II.3.1. Les travaux de Hager et Wanoschek (1987-1989)

Les travaux conduits par *Hager et Wanoschek (1987)* traitent d'ailleurs le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire, néanmoins, les chercheurs ont présenté la relation qui régit le ressaut dans le canal trapézoïdal en appliquant l'équation de la quantité de mouvement.

En 1989, les chercheurs ont étudié le ressaut hydraulique dans le canal trapézoïdal. Leur contribution cette fois porte principalement sur la structure interne de l'écoulement, ils ont montré à partir de l'observation tridimensionnelle que les phénomènes sont notablement différents de ceux rencontrés dans le ressaut classique en canal rectangulaire.

II.3.1.1. Descriptions des essais (1989)

L'expérimentation est conduite dans un canal trapézoïdal symétrique et prismatique, la largeur de base $b = 0.2\text{m}$ et l'angle d'inclinaison des parois est de 45° ($m=1$), la profondeur du canal atteint 0.7m ce qui donne une largeur superficielle $B=1.6\text{m}$, la longueur totale du canal de mesure $L = 8\text{m}$.

Les valeurs de la hauteur initiale à la sortie de couvercle $h_0 = 20 ; 40 ; 60$ et 80mm sont considérées, pour lesquelles le rapport de forme M soit : $0,1 ; 0,2 ; 0,3$ et $0,4$. Le débit généré est entre $7,5$ et 98 l/s, par conséquent, les valeurs limites supérieures de nombre de Froude amont F_1 sont : $15 ; 13 ; 9$ et $5,45$.

La hauteur conjuguée amont h_1 est obtenue par un calcul standard basé sur le débit Q , la hauteur initiale h_0 et la perte par frottement. La différence entre h_0 et h_1 est normalement assez petite, mais elle engendre une diminution en F_1 de 3% .

II.3.1.2. Caractéristique de l'écoulement (1989)

La figure (2.1) indique les caractéristiques principales du ressaut hydraulique évoluant dans le canal trapézoïdal, les chercheurs ont divisé la région du ressaut en sept parties élémentaires. L'écoulement amont à grande vitesse « **1** » est soulevé dans l'air et forme une zone d'éclaboussement « **2** » à cause de la présence d'une zone de séparation de l'écoulement au fond du canal « **3** » dite rouleau de fond.

Le courant principal ainsi s'écoule près de la surface et diverge lentement vers les parois latérales. Cela est dû à la concentration de l'écoulement amont torrentiel « **1** » dans la partie centrale de la section transversale, et la dépression résultante le long des parois latérales.

La première partie de l'écoulement latéral se retourne en amont et forme la zone de retour latérale « **4** » dans les deux côtés du canal, elle donne une forme spécifique au pied du ressaut.

La deuxième partie reste à la surface et continue à écouler vers l'aval « **5** ». La troisième partie plonge le long des parois latérales inclinées et alimente le rouleau du fond « **6** ». Plus en aval, ce courant n'entraîne plus le rouleau du fond mais il va continuer directement vers l'aval « **7** ».

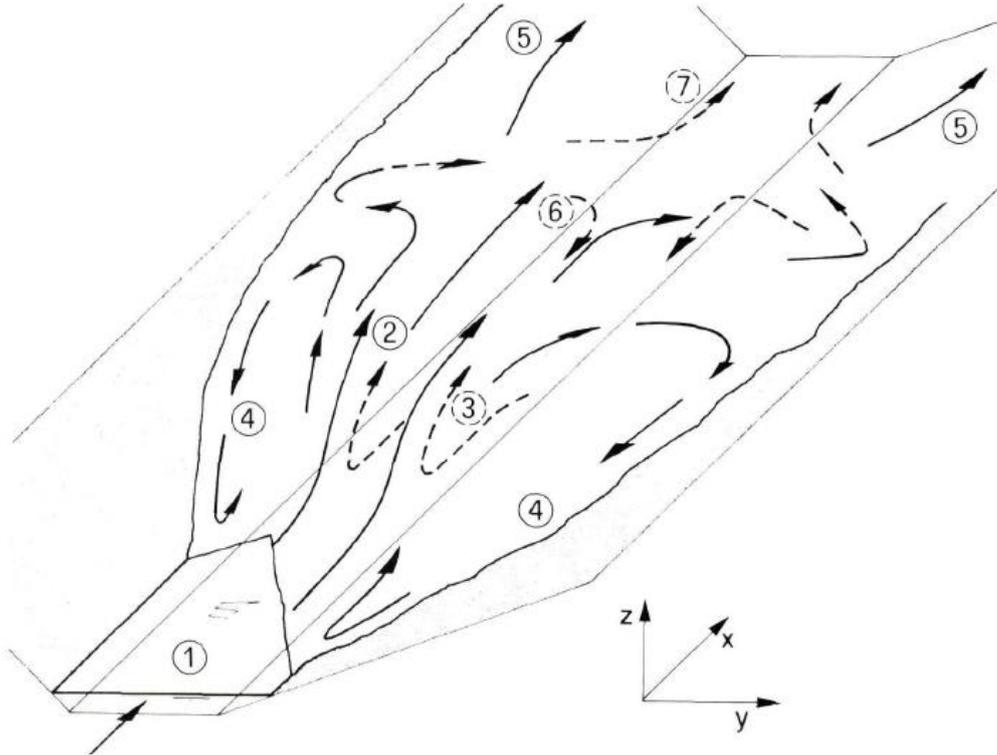


Figure. 2.1 : Vue schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut en canal trapézoïdal. (—>) courants de surface, (- - ->) courants de fond.

Le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal est ainsi caractérisé par un écoulement fortement spatial, la présence du rouleau de fond implique plusieurs différences par rapport au ressaut classique, notamment :

- La vitesse le long du fond du canal est diminuée significativement.
- Le courant principal est soulevé à la surface mais diverge vers les deux côtes latérales du canal.
- La vitesse maximale se produit le long des parois latérales du canal près de la surface libre.

II.3.1.3. Rapport des hauteurs conjuguées

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

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

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

Les centres de gravité des sections initiales et finales sont :

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

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

Les forces de pressions des sections initiales et finales sont :

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

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

L'application de cette équation donne :

$$\frac{bh_1^2}{2} + \frac{mh_1^2}{3} + \frac{Q^2}{gA_1} = \frac{bh_2^2}{2} + \frac{mh_2^2}{3} + \frac{Q^2}{gA_2} \quad (2.2)$$

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_1^2)^3} \quad (2.3)$$

En introduisant le paramètre Y , définissant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, l'équation devient : (Hager et Wanoschek 1987)

$$F_1^2 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (2.4)$$

Tels que :

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

Hager et Wanoschek (1987) ont étudié la relation (2.4), la figure (2.2) représente la variation de rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de nombre de *Froude* amont F_1 et de rapport de forme M .

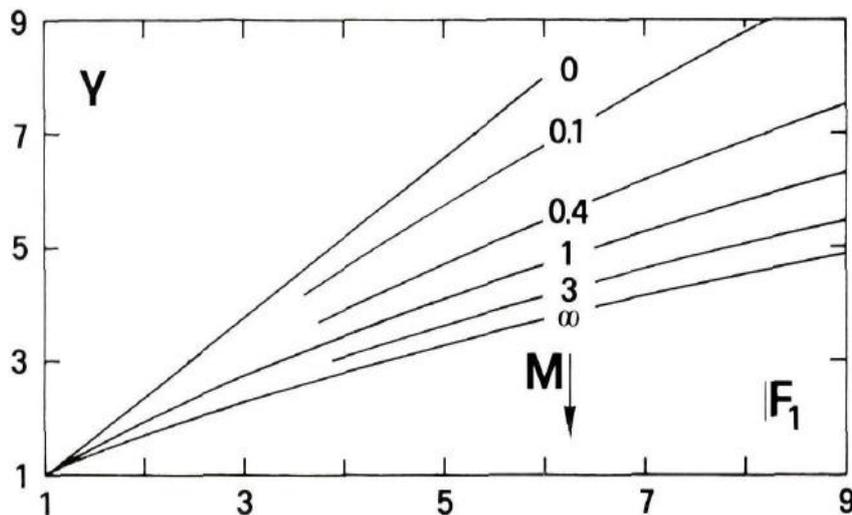


Figure.2.2 : Hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M=mh_1/b$

Pour F_1 fixe, Y diminue avec l'augmentation de M . Il est à noter que, pour le même débit, la même charge et la même quantité de mouvement dans deux canaux de forme différentes, F_1 n'est pas égal.

Les deux courbes limites respectives sont données par $M=0$ (canal rectangulaire) et $M \rightarrow \infty$ (canal triangulaire), pour lesquelles :

$$\left. \begin{aligned}
 Y = \frac{h_2}{h_1} &= \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right]. & M = 0 \\
 F_1^2 &= \frac{2Y^2(Y^2+Y+1)}{3(Y+1)}. & 1/M = 0
 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Des solutions approximatives pour $Y(F_1)$ ont été présentées :

$$\begin{aligned}
 Y &= \sqrt{2} F_1 - \frac{1}{2}. & M = 0 \\
 Y &= \left(\frac{3}{2} F_1^2 - 1 \right)^{1/3}. & 1/M = 0
 \end{aligned}$$

Noter que $Y \sim F_1$ pour le canal rectangulaire, mais $Y \sim F_1^{2/3}$ pour le canal triangulaire.

Les chercheurs ont réétudié le ressaut en canal trapézoïdal en 1989, cette fois ils ont conduit l'expérimentation aussi dans le profil trapézoïdal, toutefois, la figure (2.3) représente la comparaison des valeurs du rapport des hauteurs conjuguées en fonction de F_1 et de M issues de la relation (2.4) et les données expérimentales. Une concordance générale est notée, les valeurs expérimentales de Y sont toujours en dessous de celles issues de la relation théorique. Cela est attribué à la négligence des forces de frottements avec les parois et il est clairement reflété par l'augmentation de la déviation avec l'accroissement de F_1 .

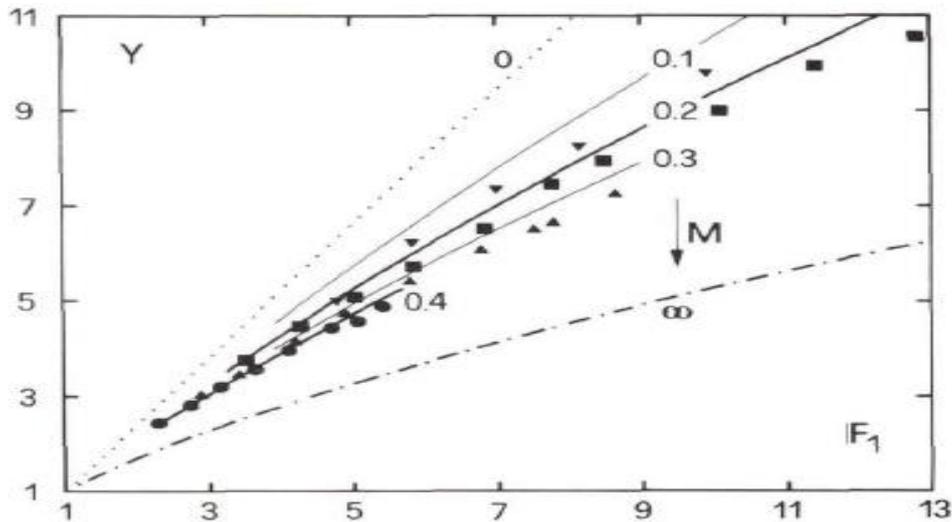


Figure .2.3 : Hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M=mh_1/b$, (—) : équation 2.4 ; (...) $M=0$; (▼) $M=0.1$; (■) $M=0.2$; (▲) $M=0.3$; (●) $M=0.4$; (- . - .) $M = \infty$

II.3.1.4. Les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique

II.3.1.4.1. Longueur du rouleau du fond

La caractéristique particulière du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal est l'apparition d'un rouleau de fond pour le nombre de Froude $F_1 > 4$ (figure 2.4). Les dimensions de ce type du rouleau pourront être données par les grandeurs suivantes :

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

La figure (2.5, a, b et c) indique la variation de $\lambda_u = \frac{L_u}{h_2}$, $\lambda_b = \frac{L_b}{h_2}$ et de $\frac{h_b}{h_2}$ en fonction de F_1 pour différentes valeurs de M .

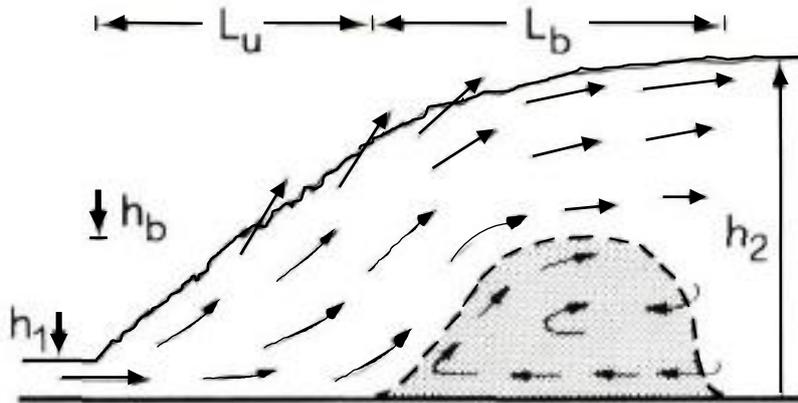


Figure. 2.4 : Croquis de définition

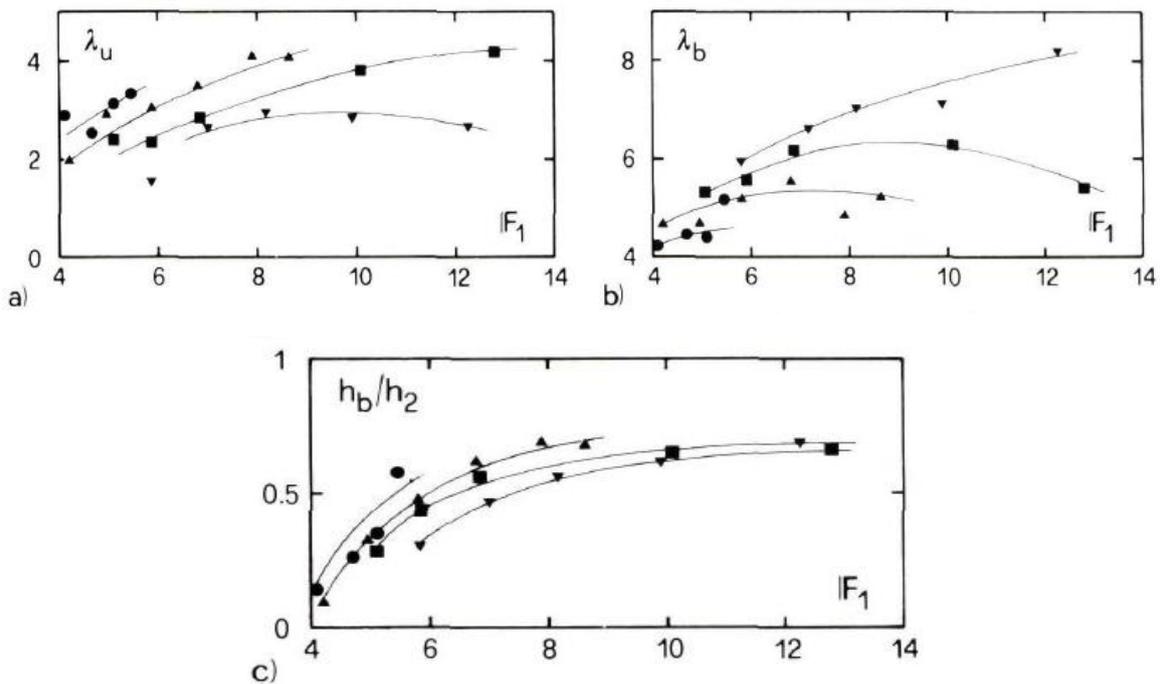


Figure .2.5 : Caractéristiques principales du rouleau de fond : a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximale adimensionnelle h_b/h_2 en fonction de F_1 et de M . (∇) $M=0.1$; (\blacksquare) $M=0.2$; (\blacktriangle) $M=0.3$; (\bullet) $M=0.4$.

Les graphes ont montré que :

- λ_u est confiné entre 2 et 4, rigoureusement elle est approximativement près du pied du ressaut.
- Pour F_1 donné, λ_u augmente avec l'accroissement de M .
- La valeur de λ_b est beaucoup plus grande que λ_u et elle peut atteindre la valeur de 8.

- λ_b diminue avec l'augmentation de M, contrairement à λ_u .
- La fin du rouleau du fond ($\lambda_u + \lambda_b$) est approximativement indépendante de M, et elle augmente avec l'augmentation de F_1 jusqu'à un maximum de 10.5.
- La hauteur maximale $\frac{h_b}{h_2}$ du rouleau du fond augmente avec F_1 jusqu'à une valeur limite de 0.6 à 0.7. Pour F_1 donné, $\frac{h_b}{h_2}$ augmente avec l'accroissement de M.

Ce qui étonnant, c'est que la présence du rouleau du fond n'a jamais été détectée comme une composante typique du ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal.

La Figure 2.5.c montre que la hauteur maximale du rouleau du fond peut atteindre 50% de h_2 pour $F_1 > 6$.

II.3.1.4.2. La longueur de l'écoulement latérale en retour L_s

Le rouleau de surface n'existe plus dans les ressauts générant en canal trapézoïdal, au lieu de cela, un écoulement inverse se produit dans la zone de retour latérale, pour des petites valeurs de nombre de Froude F_1 , l'écoulement en retour est concentré dans le côté opposé au courant principal, pour des grandes valeurs de F_1 , l'écoulement en retour se produit le long des deux côtés latéraux.

Si on suppose que L_s est la longueur de l'écoulement en retour, la figure (2.6) indique la variation de $\lambda_s = \frac{L_s}{h_2}$ en fonction de F_1 pour différentes valeurs de M. Le ressaut qui a des caractéristiques de surface ondulée est tracé avec des signes ouverts.

La transition entre le ressaut ondulé et ordinaire est continuée. Cependant, il existe une valeur limite du nombre de Froude F_{1L} avec laquelle les deux types de ressauts peuvent être séparés : $F_{1L}(M = 0.1) = 6$; $F_{1L}(M = 0.2) = 5$; $F_{1L}(M = 0.3) = 4.2$; $F_{1L}(M = 0.4) = 3.5$.

Donc, F_{1L} diminue avec l'augmentation de M.

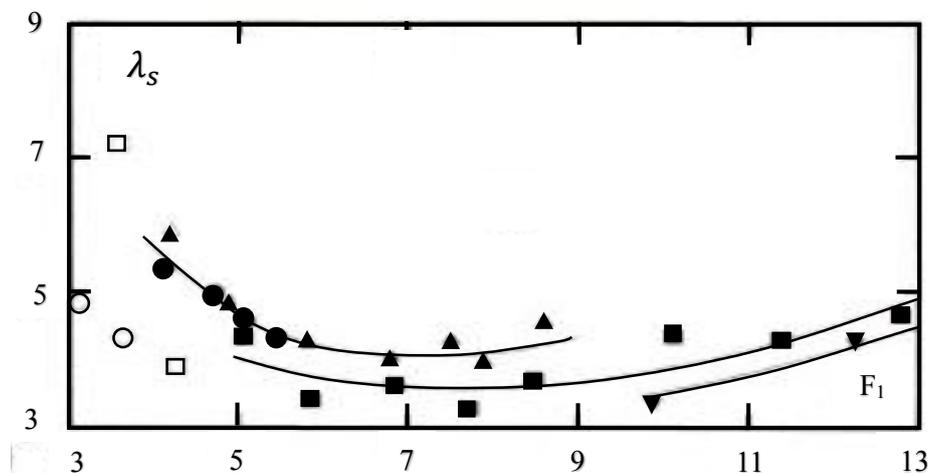


Figure. 2.6 : Longueur relative λ_s de courant de retour latérale. (▼) $M=0.1$; (■) $M=0.2$; (▲) $M=0.3$; (●) $M=0.4$.

II.3.1.4.3. La longueur de ressaut L_j

Bien que plusieurs définitions de cette longueur aient été présentées, les chercheurs ont pris la fin de ressaut la position dans laquelle les bulles d’air ont disparu, la fin du ressaut est visualisée par les yeux. La figure 2.7 indique la variation de $\lambda_j = \frac{L_j}{h_2}$ en fonction de F_1 et de M .

Il est clair que λ_j augmente avec l’augmentation de F_1 et de M . Pour des petites valeurs de F_1 , aucune mesure fiable ne serait prise, selon la Figure 2.7, λ_j est varié entre les valeurs de 5 et 7. Toutefois, pour la comparaison, la longueur du ressaut en canal rectangulaire est tracée dans la même figure.

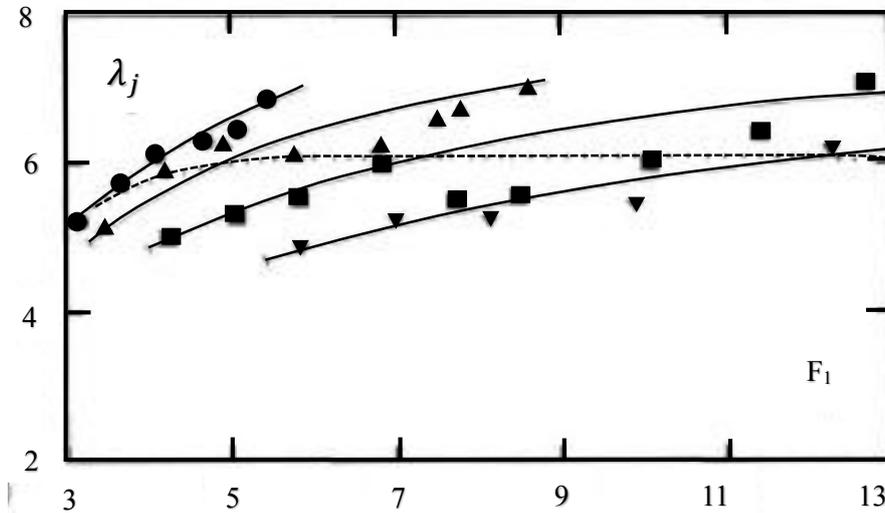


Figure. 2.7 : Longueur relative λ_j de ressaut en fonction de F_1 et de M . (▼) $M=0.1$; (■) $M=0.2$; (▲) $M=0.3$; (●) $M=0.4$. (.....) pour un ressaut en canal rectangulaire

Les figures (2.6 ; 2.7) indiquent que $\lambda_j > \lambda_s$. Toutefois, λ_j est toujours plus petite que $(\lambda_u + \lambda_b)$, la fin du rouleau du fond est toujours plus en aval que la fin du ressaut.

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

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

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_2} = 5 \left[1 + 4 \left(\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \tag{2.6}$$

Où : $W = b + 2mh$ avec W : largeur superficielle d’eau.

Une autre formule de la longueur du ressaut a été analysée par Silvester (1964). L_j est mis en relativité avec $(h_2 - h_1)$ pour différentes valeurs de $M < 0.25$, les résultats expérimentaux peuvent assez bien être exprimés :

$$\frac{L_j}{(h_2-h_1)} = 7(1 + 10M) \tag{2.7}$$

Avec : $M = \frac{m \cdot h_1}{b}$ où m est la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal, b la base du trapèze et h₁, h₂ sont respectivement la hauteur initiale et finale du ressaut ; Le paramètre adimensionnel M représente en fait, le rapport de forme du ressaut.

La longueur relative L_j / (h₂-h₁) augmente avec M, encore, pour des valeurs données de nombre de Froude F₁, (h₂-h₁) diminue avec l'augmentation de M.

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

$$\text{Log}_{10} \left(\frac{L_j}{\Delta H} \right) = 1,71\xi + 0,315m + 1,58 \tag{2.8}$$

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

II.3.1.5. Perte de charge relative du ressaut hydraulique

La perte de charge ΔH du ressaut est par définition la différence des charges initiale et finale : ΔH = H₁ - H₂ (figure. 2.8).

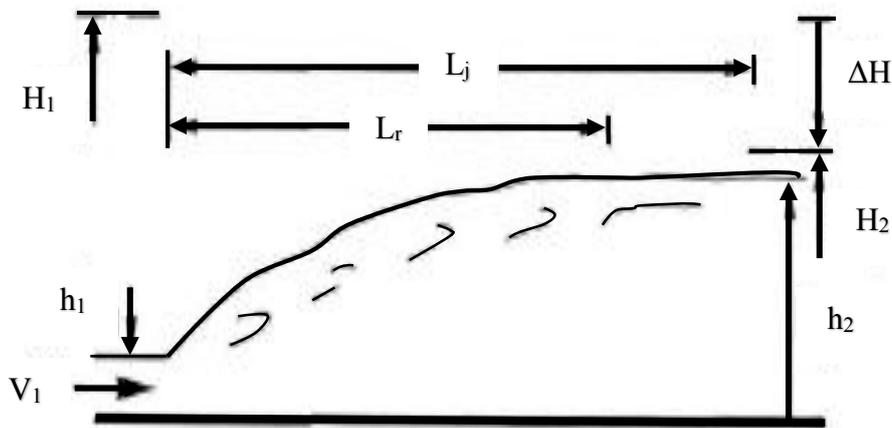


Figure. 2.8 : Schéma de définition du ressaut hydraulique

La perte de charge relative est par définition comme étant le rapport de ΔH à la charge initiale H₁ :

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{\Delta H}{H_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \\ H_1 &= h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \\ H_2 &= h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \end{aligned} \right\} \tag{2.9}$$

En tenant compte des relations donnant le rapport des hauteurs conjuguées, le rapport de forme et de nombre de Froude amont F_1 .

$$Y = \frac{h_2}{h_1}, M = \frac{mh_1}{b} \text{ et } F_1 \text{ tel que :}$$

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

On obtiendra :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \left[\frac{(1+M)^3}{(1+2M)(1+MY)^2} \right]}{1 + \frac{F_1^2}{2} \cdot \frac{(1+M)}{(1+2M)}} ; 0 < \eta < 1 \quad (2.9)$$

✓ *Cas particulier du canal rectangulaire*

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

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (2.10)$$

Hager et Sinniger (1985) ont proposé une bonne approximation de cette équation :

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2 ; F_1 > 2,5 \quad (2.11)$$

✓ *Cas du canal triangulaire*

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

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}} \quad (2.12)$$

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

$$\eta = \left[\left(1 - \frac{12}{F_1^4} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \quad (2.13)$$

La représentation graphique (figure. 2.9) de la relation générale (2.9), montre que pour le même nombre de *Froude* F_1 , le rendement du ressaut en canal triangulaire est plus élevé que celui en canal rectangulaire ou du trapézoïdal. Comparé au rendement du ressaut rectangulaire, le rendement du ressaut trapézoïdal est environ 10 % plus important.

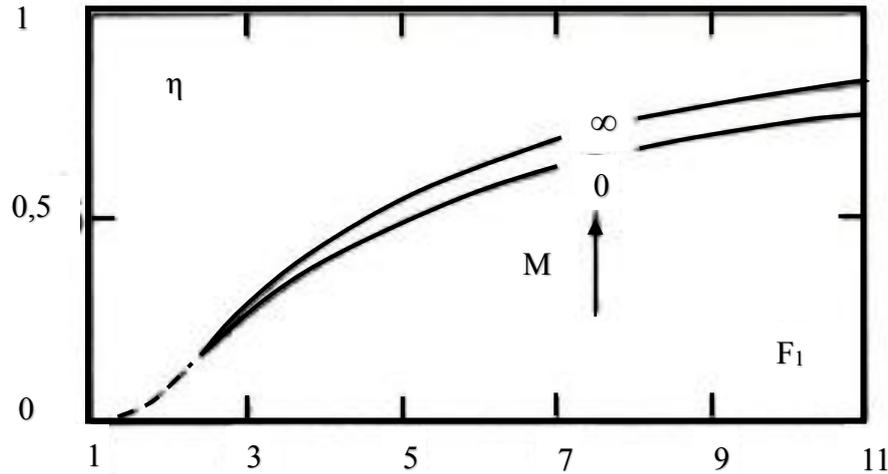


Figure. 2.9 : Dissipation relative d'énergie : $\eta = \frac{\Delta H}{H_1}$, fonction de F_1 et de M

II.4. Ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal contrôlé par marche positive

II.4.1. Travaux de Kateb, Debabache et Benmalek (2013)

Les chercheurs ont conduit une étude expérimentale reflétant l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal. Une étude comparative entre les caractéristiques du ressaut contrôlé et le ressaut forcé type A par marche positive est proposée. L'expérimentation a été menée sur cinq hauteurs initiales de l'écoulement incident : h_1 (mm) = 20 ; 30 ; 40 ; 50 et 60, une gamme de nombre de Froude F_1 entre 2 et 14, le rapport de forme M est varié entre $0.031 < M < 0.094$.

12 marches positives de hauteur s (cm) différente ont été mises en place avec une longueur de 1 m.

Cependant, la distinction entre les types du ressaut hydraulique dépend du rapport L_j/x ; lorsque ce rapport est inférieur ou égal à l'unité, le ressaut est dit contrôlé ; lorsque est supérieur à l'unité, le ressaut est dit forcé, le ressaut forcé type A est établi quand la position x de la marche coïncide avec la longueur du rouleau L_r .

II.4.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de nombre de Froude F_1 , $Y = f(F_1)$ est examiné pour le ressaut contrôlé et forcé de type A par marche positive et le ressaut contrôlé par seuil mince. Dans le but de révéler l'intérêt de la présence d'un obstacle, les chercheurs ont aussi implanté une courbe issue de la relation théorique (2.4).

Les résultats ont montré que pour une même valeur de F_1 , le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut forcé est inférieur à celui de son homologue contrôlé, et pour le même type du ressaut, la marche positive a un effet réducteur sur la hauteur conjuguée meilleur que celui du seuil mince. (Figure 2.10)

Les travaux expérimentaux ont permis aux chercheurs de montrer que la fonction $Y = f(F_1)$ est une droite d'équation :

- ✓ $Y = 1.21F_1$ Pour le ressaut contrôlé par seuil mince
- ✓ $Y = 1.13F_1$ Pour le ressaut contrôlé par marche positive.
- ✓ $Y = 1.01F_1$ Pour le ressaut forcé par marche positive.

Avec $0.031 \leq M \leq 0.094$ et $2 < F_1 < 8$

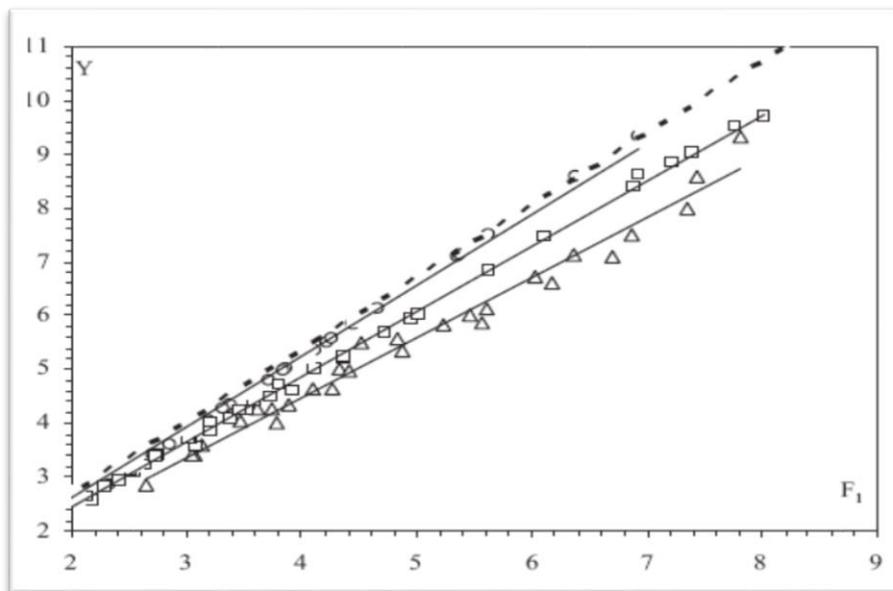


Figure. 2.10 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 ; (O) ressaut contrôlé par seuil mince ; (◻) ressaut contrôlé par marche positive ; (Δ) ressaut forcé de type A par marche positive ; (-----) courbe tracé selon la relation théorique

II.4.1.2. Hauteur relative du seuil et de la marche positive

La variation de la hauteur relative du seuil et de la marche positive est étudiée en fonction du nombre de Froude F_1 , la figure (2.11) montre que pour le même nombre de Froude F_1 , la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive du ressaut forcé est inférieure à celle du ressaut contrôlé.

Les résultats expérimentaux ont montré aussi que la variation de la hauteur relative S en fonction du nombre de Froude F_1 suit une loi de type puissance, les chercheurs ont pu écrire :

- ✓ $S/h_1 = S = 0.15F_1^{1.65}$ Pour le ressaut forcé par marche positive.
- ✓ $S/h_1 = S = 0.24F_1^{1.57}$ Pour le ressaut contrôlé par marche positive.
- ✓ $S/h_1 = S = 0.42F_1^{1.36}$ Pour le ressaut contrôlé par seuil mince.

Avec $0.031 \leq M \leq 0.094$ et $1.5 < F_1 < 8$

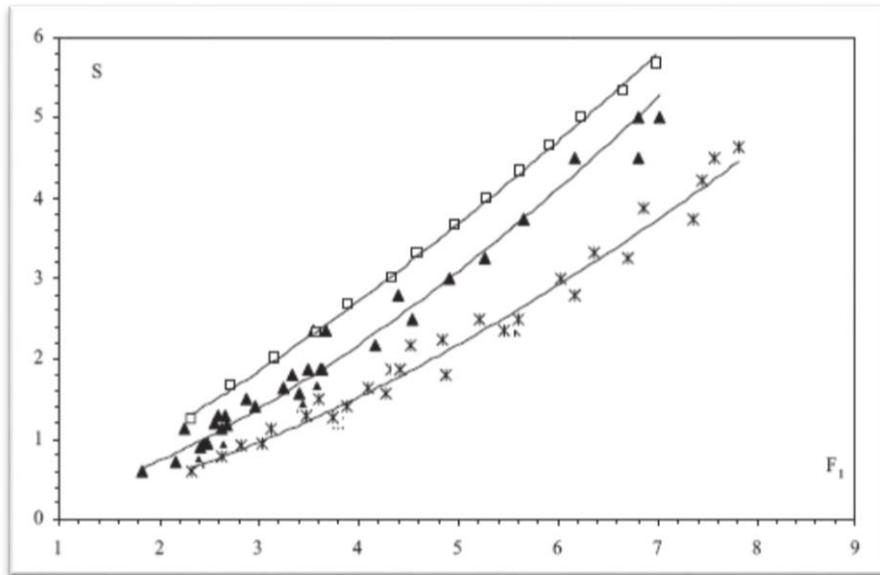


Figure. 2.11 : Variation du rapport S de la marche en fonction du nombre de Froude F_1 . (▲) Ressaut contrôlé par marche positive ; (◻) ressaut contrôlé par seuil mince ; (⊗) ressaut forcé de type A par marche positive

II.4.1.3. Position relative de la marche positive

La figure 2.12 montre que la position relative X de la marche positive du ressaut forcé est inférieure à celle contrôlée pour le même nombre du *Froude* F_1 , l’ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés non linéaire a permis de déduire des relations empiriques de type droite :

- ✓ $X = 12.86F_1 - 6.84$ Pour le ressaut contrôlé par marche positive.
- ✓ $X = 10.54F_1 - 5.06$ Pour le ressaut forcé par marche positive.
- ✓ $X = 12.91F_1 - 2.52$ Pour le ressaut contrôlé par seuil mince.

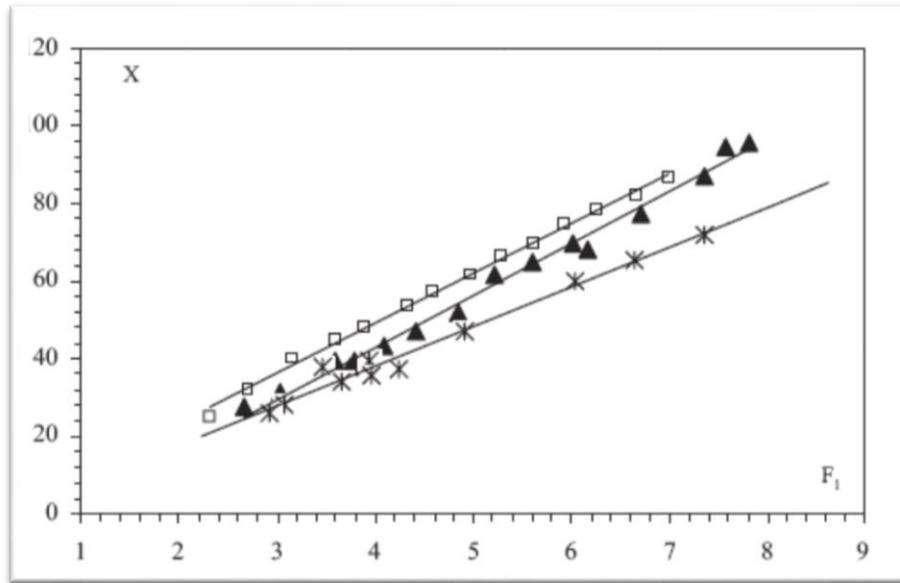


Figure. 2.12 : Variation de la position de la marche X en fonction du nombre de Froude F_1 . (▲) Ressaut contrôlé par marche ; (□) ressaut contrôlé par seuil mince ; (⋈) Ressaut forcé de type A par marche positive.

II.4.1.4. Le rendement du ressaut hydraulique

Les chercheurs ont démontré que le rendement du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal est calculé en utilisant la relation (2.9).

La figure (2.13) montre que la dissipation d'énergie du ressaut hydraulique forcé par marche positive est supérieure à celle de son homologue contrôlé pour des valeurs du nombre du Froude F_1 entre 2 et 8. Cependant, pour les nombres de Froude $F_1 > 8$ toutes les trois courbes tendent à se rejoindre.

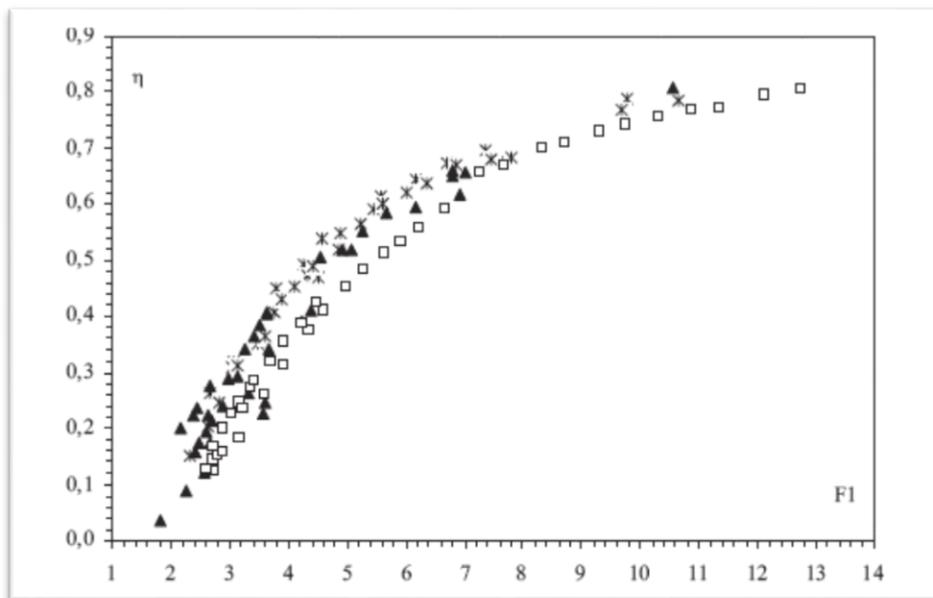


Figure .2.13 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . (▲) Ressaut contrôlé par marche ; (□) ressaut contrôlé par seuil mince ; (⋈) ressaut forcé de type A par marche positive.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé en premier lieu les travaux de *Hager et Wanoschek (1987-1989)*, sachant que les travaux effectués en 1987 sont dédiés au ressaut hydraulique en canal triangulaire, les chercheurs ont présenté l'approche théorique du ressaut évoluant en canal trapézoïdal et ils ont considéré les profils triangulaire et rectangulaire comme des cas extrêmes du profil trapézoïdal. Les résultats ont montré que les caractéristiques du ressaut (rapport des hauteurs conjuguées, longueur du ressaut et son rouleau, rendement) sont plus avantageux en canal triangulaire que dans un canal rectangulaire. En 1989 *Hager et Wanoschek* ont décrit en détail le ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal, ils ont découvert pour la première fois l'existence d'un rouleau du fond pour $F_1 > 4$. Cependant l'expérimentation a montré aussi qu'aucun rouleau de la surface n'existe.

Concernant la relation de la perte de charge relative, nous avons exposé les résultats de *Hager et Wanoschek (1987)* concernant le profil trapézoïdal, nous avons aussi présenté la relation approchée de *Hager et Sinniger (1985)*. La représentation graphique de la relation du rendement du ressaut, en fonction du nombre de *Froude* F_1 en canal trapézoïdal, a montré que c'est le canal triangulaire qui présente le plus grand intérêt du point de vue rendement.

En deuxième lieu, nous avons analysé et présenté les travaux expérimentaux de *Kateb, Debabache et Benmalek (2013)* qui portent sur l'effet d'un obstacle (la marche positive ou un seuil mince), sur les comportements du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal. L'étude a conclu que pour des valeurs données du nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident, la hauteur conjuguée aval, la position de la marche et la hauteur du seuil sont plus réduites pour le ressaut forcé par marche type A que pour leurs homologues contrôlées par marche positive et par seuil. La dissipation d'énergie est quasi identique pour les trois cas étudiés. En effet, des relations empiriques permettant le dimensionnement du ressaut hydraulique ont été proposées pour chaque type.

Chapitre III

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DES CANAUX A ELARGISSEMENT BRUSQUE

III.1 Introduction

Le ressaut hydraulique dans les canaux non-prismatiques se produit souvent à l'aval des barrages où l'évacuateur de crue au-dessus de la crête est constitué par des échancrures ou plutôt, des ouvertures. Si les échancrures sont ouvertes partiellement, l'écoulement torrentiel peut latéralement se développer dans le bassin de tranquillisation. Aussi, le canal d'approche au bassin de dissipation est toujours moins large que le canal d'aval, étant donné qu'une réduction significative de la vitesse se produit à travers le bassin de tranquillisation (figure 3.1).

La nécessité d'un bassin amortisseur avec élargissement est imposée parfois, lorsque dans certains cas, la profondeur d'eau aval est trop faible même à la présence d'un seuil, et les conditions économiques ou opératoires excluent le recours aux fouilles (*Herbrand 1973*).

Le présent chapitre est consacré aux travaux entretenus dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant dans les canaux à élargissement brusque, les travaux dans ce domaine ont été commencés il y a presque 50 ans, les préoccupations majeures des chercheurs sont les expressions de l'ensemble des paramètres du ressaut, y compris le rapport des hauteurs conjuguées, la position du pied et les longueurs caractéristiques du ressaut. L'application du théorème de la quantité de mouvement aux canaux avec géométrie élargie présente des problèmes majeurs. Tout d'abord, la contribution de la quantité de mouvement des parois latérales dépend du profil du ressaut et de la répartition de pression le long de ces parois.

Ce chapitre sera divisé en deux axes, le premier porte sur les travaux maintenus de 1960-1990, où les chercheurs se sont concentrés de distinguer les différentes configurations du ressaut qui peuvent se produire dans les canaux avec élargissement brusque, notamment, les travaux réalisés par *Noseda (1963)* et de *Rajaratnam et subramanya (1968)* sur le ressaut dit repoussé, ceux de *Herbrand (1973)* sur le ressaut spatial, et de *Bremen (1990)* sur le ressaut de transition

Dans le deuxième axe, nous aborderons les principaux travaux conduits de 1990-2015, qui ont été portés sur les caractéristiques du ressaut et notamment sur le problème de l'écoulement asymétrique, plusieurs études ont été présentées, on peut citer celles *Hager et Bremen (1993)* sur le ressaut de transition, de *Zare et Baddour (2011)* et de *Scorzoni et al (2015)*.



Figure 3.1 : Photographies du barrage Daecheong (Corée du sud), a) maquette du barrage, b) vue en aval du barrage

III.2. Notation

La notation adoptée dans la littérature est souvent soumise au choix des chercheurs. Dans ce qui suit, nous allons choisir la notation utilisée par Bremen (1990), tout en changeant quelques symboles (figure 3.2).

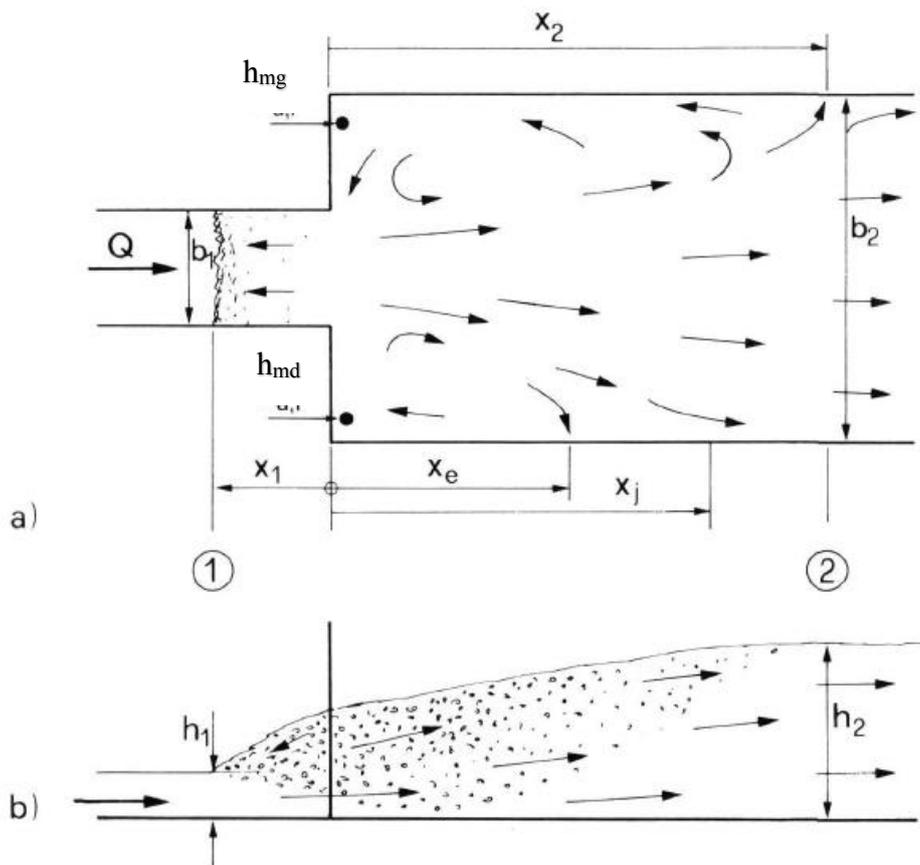


Figure 3.2 : Notation a) Vue en plan, b) Vue longitudinale. Index 1 : section initiale. Index 2 : section finale.

III.3. Classification du ressaut hydraulique dans un canal brusquement élargi

Les études expérimentales conduites dans plusieurs modèles comportant différentes géométries de l'expansion, a permis de mettre en évidence trois (3) types de ressaut. Il s'agit du ressaut repoussé, du ressaut spatial et enfin du ressaut de transition. *Bremen (1990)*.

Cette classification se base essentiellement sur les propriétés de symétrie du ressaut ainsi que sur la position de son pied vis-à-vis la section élargie.

Pour des conditions d'écoulement dénoyé, l'écoulement torrentiel dans un canal rectangulaire brusquement élargi reste invariable tout le long du canal, à l'aval de la section élargie, le jet torrentiel se trouve complètement étendu, à cause de la discontinuité de la largeur du canal, l'écoulement se sépare des parois de largeur aval B sous un angle (γ) et sur une longueur L, puis, l'écoulement se reflète et forme ce qu'on peut l'appeler les ondes croisées et obliques.

Dans le cas où les conditions amont ne changent pas, une surélévation du niveau d'eau aval provoque la formation du ressaut quelque part à l'aval de la section élargie. Vue la distribution non-uniforme de la vitesse, le pied du ressaut prend la forme de la lettre (V).

Dans ce qui suit, nous allons présenter en bref la classification proposée par *Bremen (1990)* concernant le ressaut en canal brusquement élargi.

III.3.1. Le ressaut repoussé

Selon la définition de *Rajaratnam et Subramanya (1968)*, le ressaut dont le pied se trouve juste à l'aval des points de réflexion des ondes croisées s'appelle le **ressaut repoussé**, une surélévation du niveau aval peut produire la disparition du ressaut hydraulique (Figure 3.3)

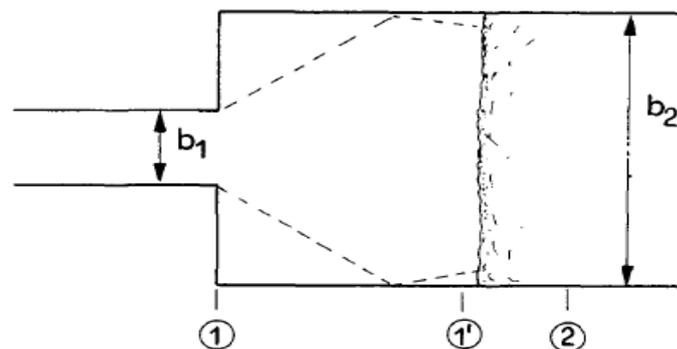


Figure 3.3 : Le Ressaut repoussé Selon Rajaratnam et Subramanya (1968), (---) ondes croisées (—) pied du ressaut

Le ressaut repoussé est très sensible à la variation de niveau d'eau aval, et ses caractéristiques sont presque similaires au ressaut classique comme le caractère symétrique et le rouleau de la surface.

III.3.2. Le ressaut spatial

Le niveau aval requis pour la formation du ressaut repoussé est le plus grand niveau dans lequel l'écoulement est symétrique et stable, une petite augmentation de ce niveau engendre la disparition du ressaut et la formation d'un écoulement asymétrique dans lequel le jet torrentiel se divise en deux parties, l'une à la direction de l'écoulement et l'autre au sens inverse. Au point de l'élargissement, l'une des zones de décollement se trouve remplie par l'eau en retour.

Une surélévation supplémentaire de la hauteur de déversoir terminal résulte l'augmentation de la profondeur dans les deux zones de décollement. Après un certain temps l'écoulement asymétrique se stabilise.

La figure 3.4 présente une illustration **du ressaut dit spatial** dont le pied se trouve approximativement à la section élargie, caractérisé par un écoulement asymétrique stable sans rouleau de surface, les zones de décollement ne participent pas à l'écoulement principal, généralement la forme du pied du ressaut a la forme de lettre (V), elle prend parfois la forme oblique.

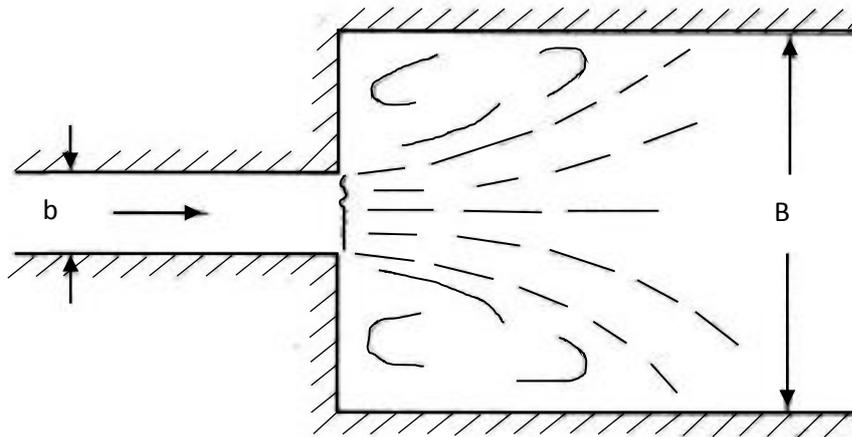


Figure 3.4 : Le ressaut spatial selon Herbrand (1973)

III.3.3. Le ressaut de transition

Si le niveau aval continue à s'élever, le pied du ressaut se déplace encore vers l'amont avec la réapparition de l'écoulement symétrique et la stabilité longitudinale, la forme du pied du ressaut devient droite, la longueur de l'écoulement inverse réduite simultanément et le caractère

asymétrique diminue, le rouleau du surface se développe à nouveau. Finalement si la submersion est suffisante, le ressaut se forme complètement à l'amont de l'élargissement et l'écoulement entrant dans la section aval se trouve entièrement fluvial.

Le ressaut formé dans ces conditions est dénommé ressaut de Transition dont le pied est situé dans le canal d'approche, une partie du ressaut se trouve dans le canal amont et l'autre dans le canal aval, le caractère symétrique et l'extension longitudinal du ressaut de transition dépend de la position du pied de ceci par rapport au point d'élargissement. (Figure 3.1).

III.4. Les travaux entretenus de 1960-1990

III.4.1. Les travaux de Nosedá (1963) sur le ressaut repoussé

La première étude systématique du ressaut repoussé est certainement celle de Nosedá (1963), il a conduit ces travaux dans un canal rectangulaire brusquement élargi avec un taux de $B=b_2/b_1=5$, le nombre du Froude est arrangé entre 1.97 et 6.42, la figure 3.5 présente la configuration expérimentale, les ondes croisées, la position et la forme du pied du ressaut sous des profondeurs avales variables.

L'écoulement à l'aval de l'élargissement est divisé en deux zones, la première (1) dont le débit $Q_c = Q_c(x)$ est situé à l'intérieur des ondes croisées, et la deuxième (2) avec un débit $Q_I=Q_I(x)$ entre ces deux ondes et les parois du canal. La coordonnée longitudinale a été mesurée à partir de la section élargie. L'équation de la continuité impose que $Q = Q_c + Q_I$, les largeurs des deux zones d'écoulement sont b_c et b_I respectivement, tel que $b_c + b_I = b_2$. Premièrement il a été trouvé que le taux Q_c/Q dépend exclusivement de b_c/b_2 :

$$\frac{Q_c}{Q} = \frac{b_c / b_2}{2.7 - 1.9 b_c / b_2} \tag{3.1}$$

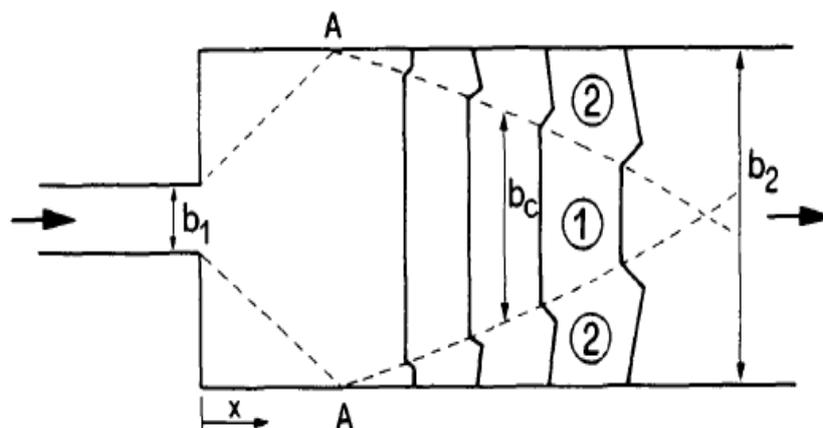


Figure 3.5 : Configuration expérimentale de Nosedá (1963). (---) les ondes croisées ; (—) schéma du pied du ressaut sous un niveau aval variable

Par la suite, les profondeurs d'eau à l'intérieur de la zone enfermée par ondes croisées h_{1c} et entre cette zone et les murs h_{1l} ont été mesurées juste à l'amont du pied du ressaut. Encore, par l'observation des largeurs correspondantes b_c et b_l pour chaque zone d'écoulement, les nombres de Froude F_{1c} et F_{1l} ont été calculés. Les nombres du Froude ainsi calculés ont été injectés dans l'équation de *Bélanger (1928)*, séparément pour chaque zone, les deuxièmes hauteurs conjuguées h_{2c} et h_{2l} sont donc évaluées. La solution de l'équation (3.1) pour les deux zones (1) et (2), et les positions des pieds du ressaut à l'aval de la position de référence de ce dernier montre que h_{2c} est toujours plus petite que h_{2l} . Cependant, quand le ressaut se déplace vers la position critique du ressaut repoussé (point A dans la figure 3.5) h_{2l} devient plus petite que h_{2c} .

Ensuite si le ressaut se déplace encore vers l'amont la différence $h_{2l} - h_{2c}$ augmente rapidement. Cette différence conduit à la disparition du ressaut repoussé.

La moyenne de la hauteur d'eau aval peut être déterminée :

$$h_2 = (h_{2c} b_c + h_{2l} (b_2 - b_c)) / b_2 \quad (3.2)$$

III.4.2. Les travaux de *Rajaratnam et Subramanya (1968)* sur le ressaut repoussé

Les chercheurs ont conduit une étude expérimentale dans un canal brusquement élargi de largeur aval $b_2 = 0,457m$. La largeur du canal d'approche est variable afin d'obtenir des taux d'élargissement $\beta = b_2/b_1$ rangés entre 1,2 et 6. La figure (3.3) montre l'installation expérimentale et illustre le comportement du ressaut.

Rajaratnam et Subramanya (1968) ont développé une relation des hauteurs conjuguées qui est basée sur l'application du théorème de la quantité de mouvement entre la section initiale et finale (1') et (2) (voir la figure 3.3) du ressaut hydraulique, en supposant que :

- 1- L'équation de *Bélanger (1928)* du ressaut classique est valable avec la négligence de l'effet des ondes croisées.
- 2- La vitesse moyenne est constante entre la section (1) et (1').

Donc :

$$F_1'^2 = \beta F_1^2 \quad \text{sachant que : } h_1' = \frac{h_1}{\beta} \quad (3.3)$$

Avec :

F_1 : nombre du Froude amont.

$\beta = b_2/b_1$: taux d'élargissement.

Introduisant la relation (3.3) dans l'équation de *Bélanger (1928)* du ressaut classique :

$$Y = \frac{0.5}{\beta} = [\sqrt{1 + 8\beta F_1^2} - 1] \tag{3.4}$$

Rajaratnam et Subramanya (1968) ont attribué la différence entre leurs mesures expérimentales et la relation (3.4) à l'effet de frottement et ils proposent une relation modifiée :

$$\frac{Y-0.75}{F_1-0.85} = \frac{1}{\beta} + 0.3 \tag{3.5}$$

Cette relation est basée sur l'application de l'équation de la quantité du mouvement entre les sections (1) et (2), (voir la figure 3.3), en tenant compte les effets de frottement.

La figure (3.6) représente la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de F_1 , les résultats expérimentaux de *Rajaratnam et Subramanya (1968)* pour différentes valeurs de β ont été comparées avec les valeurs issues des relations (3.4) et (3.5).

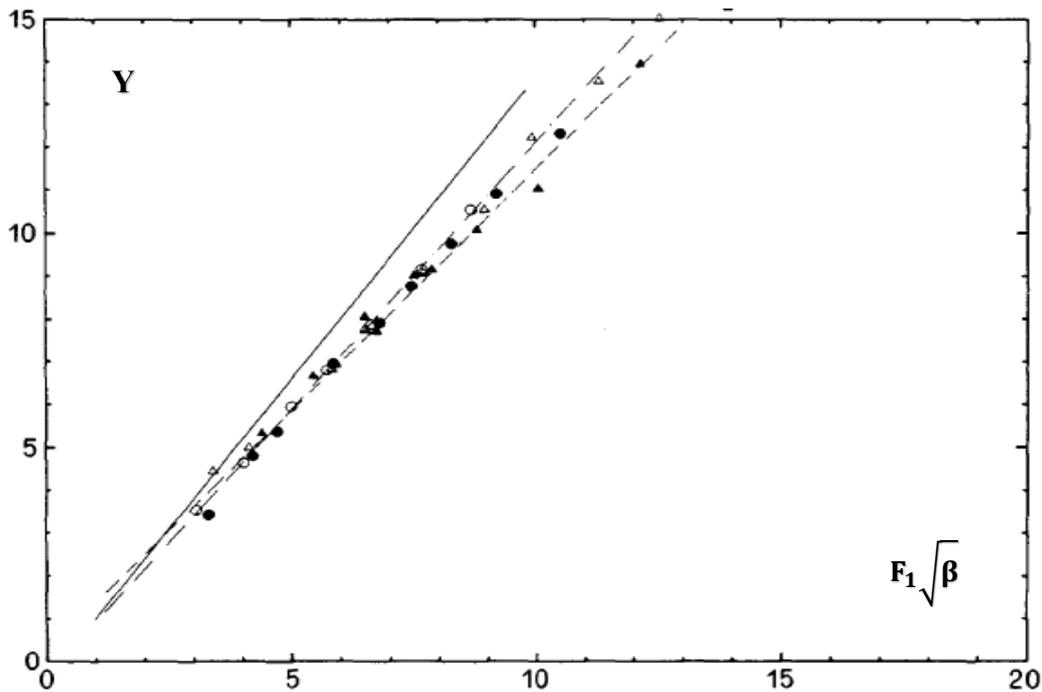


Figure 3.6 : Les résultats expérimentaux de *Rajaratnam et Subramanya (1968)*. (○) $\beta = 1.2$; (●) $\beta = 1.5$; (△) : $\beta = 2.0$ et (▲) $\beta = 3.0$; (—) Eq. (3.3), (---) Eq. (3.4) pour $\beta=2$; (-.-) pour $\beta = 1.2$

III.4.3. Les travaux de *Unny (1960)* sur le ressaut spatial

L'approche de *Unny (1960)* est basée sur la théorie de la turbulence, la figure (3.7) présente un schéma de la configuration testée, toutes les expériences ont été réalisés dans un canal de géométrie asymétrique brusquement élargi dans lequel le taux d'élargissement $\beta = 2$.

Les données expérimentales sont les hauteurs conjuguées h_1 et h_2 , ainsi que la position du pied du ressaut. Pour chaque série, environ cinq (5) positions ont été considérées. Toutefois, seulement la série où la position $0 > x_1 > 6\text{cm}$ est considéré dans le modèle théorique.

Unny (1960) suppose que la ligne de séparation entre l'écoulement principal et les vortex latéraux (line C-D) est verticale et prismatique à travers le long du ressaut, en commençant à partir du point C. Cette supposition conduit à un choix arbitraire du volume de contrôle, la position de la section 2 dans laquelle la deuxième hauteur conjuguée sera mesurée n'est pas bien définie.

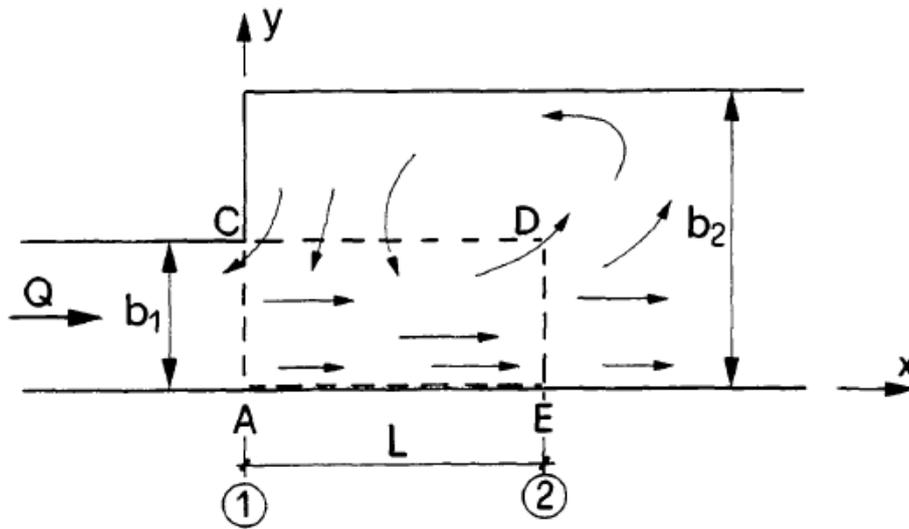


Figure 3.7 : Installation expérimentale selon Unny, (---) volume de contrôle et schéma de la typologie de l'écoulement dans un canal élargi et asymétrique. $b_1=0.285\text{m}$; $b_2=0.57\text{m}$

Unny (1960) a établi l'équation générale pour les hauteurs conjuguées :

$$F_1^2 = \frac{0.5Y(Y^2-1)+Y\Psi}{Y\alpha_1-(\alpha_2+\alpha'_2+\theta_\mu-\theta'_\mu)} \tag{3.6}$$

Cette relation compte la distribution non-uniforme et turbulente de la vitesse dans les frontières de volume de contrôle. Ψ compte l'effet de frottement, α_1 ; α_2 des coefficients de correction des moments pour la distribution non-uniforme de la vitesse dans les sections (1) et (2), et α'_2 la contribution correspond à la force de cisaillement dans la deuxième section (2). La contribution des moments le long de la ligne C-D est exprimée :

$$\theta_\mu = \frac{\int_0^L \int_0^{h_2} -uv.dzdx}{b_2 u_{m2}^2 h_2} ; \theta'_u = \frac{\int_0^L \int_0^{h_2} u'v'.dzdx}{b_2 u_{m2}^2 h_2}$$

Ici, u et v sont respectivement, les composants locaux de la vitesse dans la direction de x et de y le long de la surface $L \cdot h_2$ et u_{m2} est la vitesse moyenne dans la section (2), θ'_u compte la

contribution des moments turbulent résultant de la fluctuation des vitesses u' et v' , *Unny (1960)*, à la base de la contribution de *Rouse (1951, 1959)* et *Herleman (1959)* dans le ressaut classique a supposé que l'effet de : Ψ , α_1 , α_2 , et α_2' est petit et il les a négligés,

A la base de plusieurs hypothèses simplificatrices *Unny (1960)* a trouvé des relations explicites de θ_u et θ'_u , l'insertion de ces coefficients dans l'équation (3.6) donne :

$$Y = 0.5K_u = \left[\sqrt{1 + \frac{8F_1^2}{K_u^2}} - 1 \right] \tag{3.7}$$

Dont :

$$K_u = 1 + k (1 - 1/\beta)^c \omega_1 F_1^2$$

k et c sont des constants expérimentaux et $\omega_1 = h_1/b_1$ est le rapport d'aspect, le travail expérimental de *Unny (1960)* qui a été conduit dans un canal élargi à géométrie asymétrique avec un taux d'élargissement $\beta = 2$, ne définit pas ces deux constants, néanmoins, la valeur globale de K_u ($\beta = 2$) $k (1 - 1/\beta)^c = 2.2$ est spécifiée. Ses résultats ont été reproduits par *Rajaratnam (1967)* dans la figure 3.8.

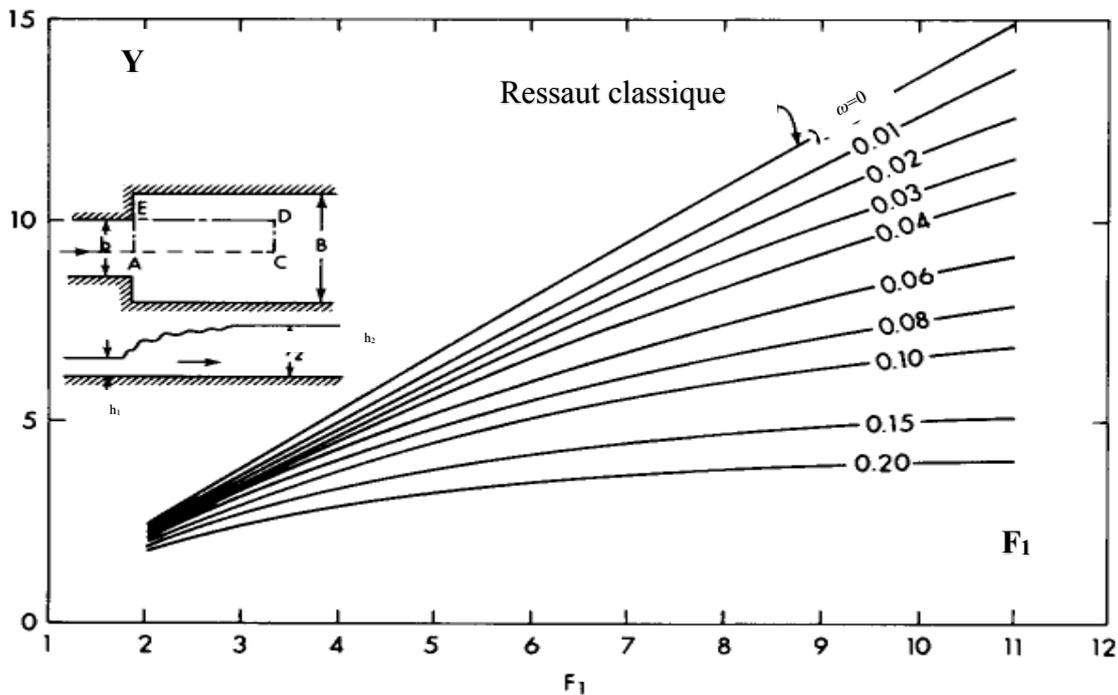


Figure 3.8 : Variation du coefficient des hauteurs conjuguée Y en fonction du nombre de Froude amont F_1 pour différents rapport d'aspect $\omega_1 = h_1/b_1$; de *Unny 1961* (selon *Rajaratnam (1967)*)

III.4.4. Les travaux de Herbrand (1973) sur le ressaut spatial

III.4.4.1. Le rapport des hauteurs conjuguées

En formulant l'équation générale de la quantité de mouvement, nous utilisons les valeurs moyennes dans la section, sans coefficients correcteurs qui tiennent compte des profils de vitesse non uniformes.

Ceci a été justifié, quand il s'agit d'un problème pratique, par de nombreux calculs relatifs au ressaut hydraulique plan. Les variations temporelles et spatiales de la vitesse, tout comme la pression non hydrostatique et l'entraînement d'air, ont peu d'influence sur le rapport des hauteurs conjuguées et ces diverses influences ont même tendance à s'annuler. Un raisonnement analogue permet de négliger le frottement pariétal. Avec les notations de la figure (3.9), on peut alors écrire l'équation de quantité de mouvement :

$$\rho \cdot Q \cdot V_1 + \frac{1}{2} \cdot w \cdot b_1 \cdot h_1^2 + \frac{1}{2} \cdot w \cdot (b_2 - b_1) \cdot h_e^2 = \rho \cdot Q \cdot V_2 + \frac{1}{2} \cdot w \cdot b_2 \cdot h_2^2 \tag{3.8}$$

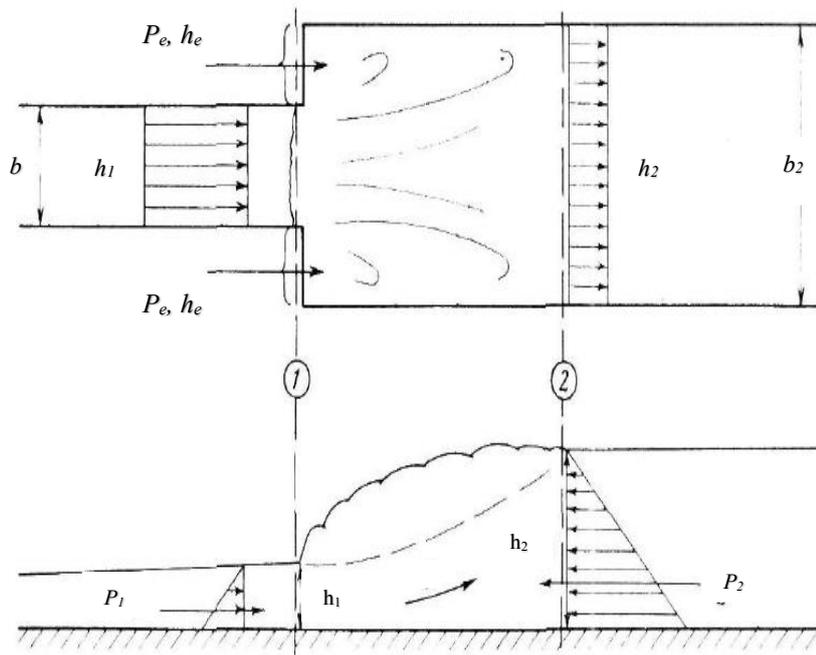


Figure 3.9 : Schéma illustrant l'application de l'équation de quantité de mouvement au ressaut spatial selon Herbrand (1973)

En tenant compte de l'équation de continuité : $Q = V_1 \cdot b_1 \cdot h_1 = V_2 \cdot b_2 \cdot h_2$, et en définissant les paramètres adimensionnels $Y = h_2/h_1$, $\beta = b_1/b_2$, $Y_e = h_e/h_1$, l'équation ci-dessus devient :

$$Y^3 - Y(\beta - \beta \cdot Y_e^2 + Y_e^2 + 2 \cdot \beta \cdot F_r^2) + 2 \cdot \beta^2 \cdot F_{r1}^2 = 0 \tag{3.9}$$

Selon *Herbrand (1973)*, même si le taux d'élargissement β et les grandeurs V_1 et h_1 , ont été données, il faut toujours faire une hypothèse en ce qui concerne h_e afin de pouvoir calculer le rapport des hauteurs conjuguées Y . cependant, en raison de la distribution non hydrostatique de la pression dans la zone de diffusion latérale et de l'entraînement d'air, il n'est pas possible de tirer des conclusions générales de l'importance de h_e . Il est donc indispensable d'introduire quelques hypothèses simplificatrices complémentaires si l'on veut aboutir à une équation ayant un intérêt pratique.

Si le ressaut est situé à l'endroit de l'élargissement, *Herbrand (1973)*, suppose que :

- 1- La quantité de mouvement $\rho \cdot Q \cdot V_1 = J_1$ et la pression résultante $\frac{1}{2} \cdot w \cdot b \cdot h_1^2 = P_1$ demeurent inchangées.
- 2- La force de pression $\frac{1}{2} \cdot w \cdot (B - b) \cdot h_e^2 = P_e$ qui s'exerce sur la région élargie est négligeable.

L'équation (3.9) peut alors s'écrire :

$$Y^3 - Y(\beta + 2 \cdot \beta \cdot F_{r1}^2) + 2 \cdot \beta^2 \cdot F_{r1}^2 = 0 \tag{3.10}$$

Si l'on tient compte du fait que, du côté aval, la quantité de mouvement est faible devant la poussée due à la pression statique et que la variation de la quantité de mouvement résultante de l'élargissement du bassin est plus faible encore, on est amené à la conclusion que la pression résultante doit être la même pour les bassins classiques et pour les bassins élargis, à savoir:

$$\frac{1}{2} \cdot w \cdot b_2 \cdot h_2^2 = \frac{1}{2} \cdot w \cdot b_1 \cdot h_1^2$$

Ce qui donne :

$$\frac{h_2 b_2}{h_1 b_1} = \frac{Y}{Y^*} = \sqrt{\beta} \tag{3.11}$$

L'expérience de *Herbrand (1973)* a été conduite dans un canal rectangulaire brusquement élargi dont la largeur amont $L = 0.15\text{m}$, la largeur aval est arrangé afin d'obtenir des taux d'élargissement $\beta = 1 ; 0,833 ; 0,714 ; 0,625 ; 0,50$ et $0,288$ ($b_{2\text{max}} = 0,52\text{ m}$).

La totalité (plus de 300) des mesures du rapport des hauteurs conjuguées pour $x_e = 0$ (sachant que x_e est la distance de débit du ressaut a la section élargie) ont été portées en fonction du taux d'élargissement $\beta = b_1/b_2$ (figure 3.10), ce qui permet une comparaison avec le ressaut classique. Les valeurs moyennes sont très bien représentées par :

$$Y = Y^* \cdot \beta^{3/8} \tag{3.12}$$

Dans laquelle :

- Y : est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut spatial.
- Y^* : est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique calculé par l'équation de Bélanger (1928).
- β : Rapport d'élargissement = b_1/b_2

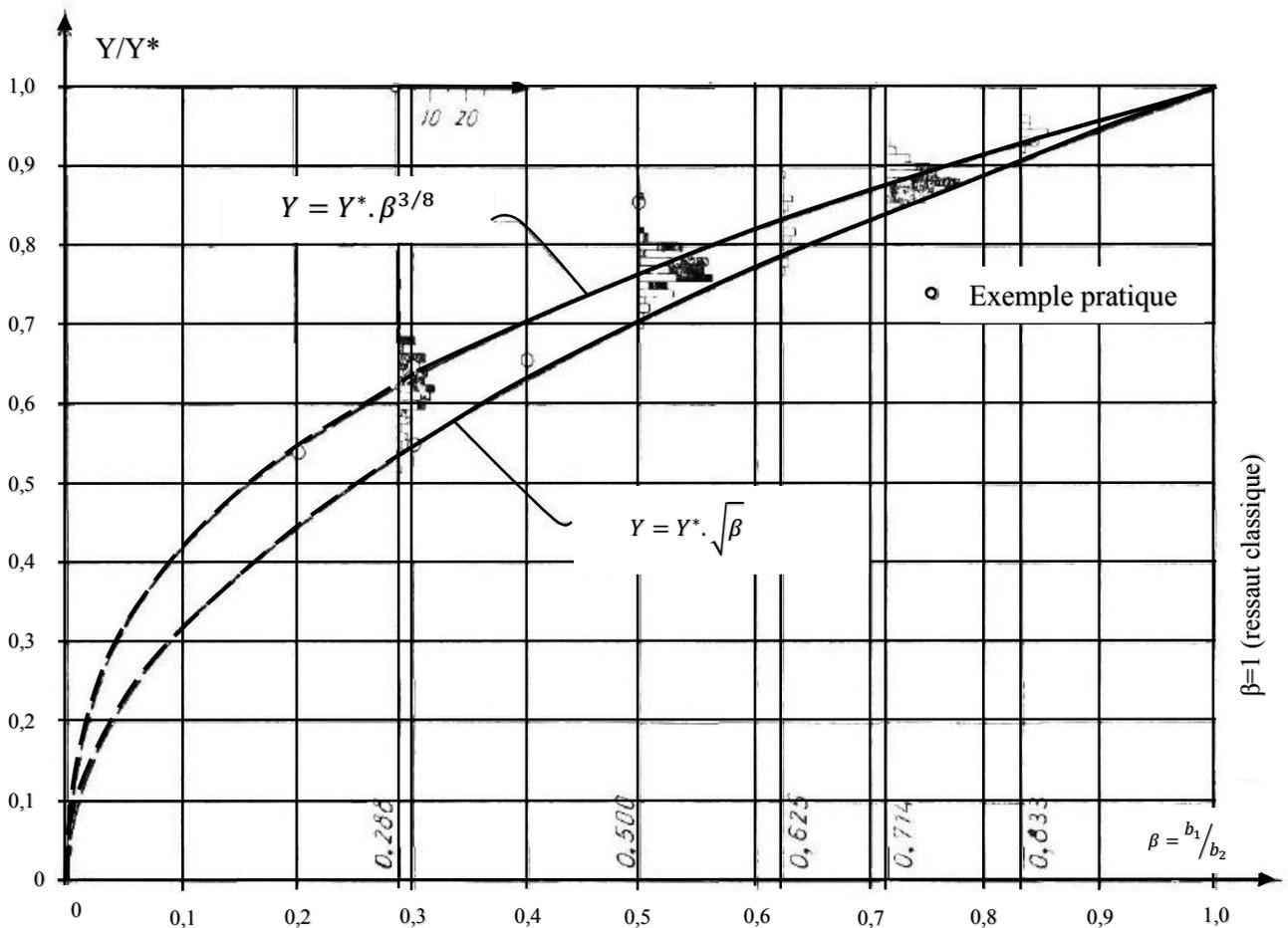


Figure 3.10 : Comparaison de toutes les valeurs mesurées avec des exemples calculés d'après les formules (3.11) et (3.12).

III.4.4.2. La longueur du ressaut

Bien que les essais de Herbrand (1973) ne portent pas sur la longueur du ressaut spatial, en accord avec la formule de Sharma (1963), l'auteur a recommandé la formule suivante pour un premier dimensionnement :

$$L_j = 0.8 L^* = 4(h_2^* - h_1) \tag{3.13}$$

Dans laquelle :

- L_j : est la longueur du ressaut spatial.
- L^* : est la longueur du ressaut classique
- h_2^* : est la deuxième hauteur conjuguée du ressaut classique
- h_1 : est la première hauteur conjuguée.

Dans le cas de faible taux d'élargissement ($\beta = 1$ à $\beta = 0.64$), *Herbrand (1973)* recommande :

$$L_j = L^* \sqrt{\beta} \quad (3.14)$$

La valeur de $\beta = 0.64$ correspond à l'intersection des deux équations.

III.4.5. Les travaux de Sharma (1964) sur le ressaut de transition

Sharma (1964) a considéré un modèle de géométrie asymétrique avec une paroi prolongée dans le canal élargi, la figure (3.11) montre l'installation expérimentale, la position typique du pied du ressaut, et les frontières du volume de contrôle. *Bremen (1990)* a noté que la section 2 n'a pas été définie. En outre, et parce qu'une partie du ressaut est apparu dans le canal amont et le reste dans le canal aval élargi, il a considéré la configuration étudiée par *Sharma (1964)* correspondre au ressaut de transition.

Sharma (1964) introduit un nouveau paramètre $X_{SH} = x_{SH}/L_{SH}$, ce paramètre est compté à partir de la position du pied du ressaut à la fin de paroi avancée (point F dans la figure 3.11). Il a allongé l'approche de *Unny (1960)* pour le rapport des hauteurs conjuguées comme suit :

$$C_1 Y^3 + C_2 Y^2 + C_3 Y + C_4 = 0 \quad (3.15)$$

Avec :

$$C_1 = 1 - X_{SH}$$

$$C_2 = 1 + K_{SH} \omega_1 (1 - X_{SH}) F_1^2$$

$$C_3 = X_{SH} - 2 (1 - X_{SH}) F_1^2$$

$$C_4 = -2 X_{SH} F_1^2$$

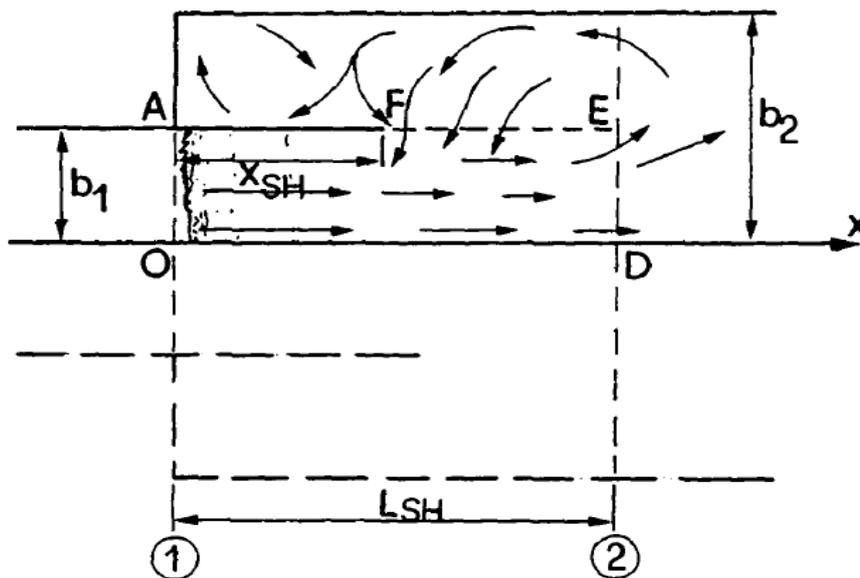


Figure 3.11 : L'installation expérimentale de Sharma (1964). (---) les frontières du volume de contrôle AODE. A-F : paroi avancée, $b_1 = 1m$; $b_2 = 2m$

L_{SH} est la longueur du ressaut de transition mesurée à partir du pied du ressaut, l'équation (3.15) est validée seulement pour $\beta=2$, avec lequel $K_{SH} = 1,886$ est trouvé par expérimentation. La deuxième hauteur conjuguée calculée par l'équation (3.15) pour $x_{SH} = 0$ est similaire à celle obtenue par Unny (1960).

III.5. Les travaux entretenus de 1990-2015

III.5.1. Les travaux de Hager et Bremen (1993)

III.5.1.1. Les hauteurs conjuguées du ressaut

Le rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ dépend du rapport d'élargissement $\beta = b_2/b_1$, du nombre de Froude amont F_1 et du nombre adimensionnel de pied du ressaut $X_i = x_1/L_r^*$, sachant que x_1 est la position du pied du ressaut par rapport à l'élargissement et L_r^* la longueur du rouleau classique obtenu par la relation du Bretz (1987) ci-dessous :

$$\lambda_r^* = \frac{L_r^*}{h_1} = 6.3 F_1 - 3.6 \tag{3.16}$$

L'effet du F_1 sur Y peut être pris en considération par Y^* de ressaut classique. Comme le maximum de Y est correspondant de Y^* , le paramètre significatif normalisé par la différence maximale Y^*-1 est :

$$\psi = \frac{Y^*-Y}{Y^*-1}, 0 < \psi < 1 \tag{3.17}$$

L'analyse des données pour une valeur particulière de β a montré qu'il existe une relation unique entre ψ et X_i . La figure (3.12) est référée à $\beta = 3$ et compare les données avec la relation (3.18) suivante :

$$\psi_B = f(B) * [1 - Tgh(1,9X_i)] \tag{3.18}$$

ψ_B : réfère à $\beta = 3$, $f(B)$ est en fonction de β seulement, le terme entre croché reflète l'effet de la position du pied du ressaut, la valeur de $\psi (X_i \gg 0) = 0,423$ tend vers les points obtenus par l'équation de *Herbrand (1973)*

$$Y = \sqrt{\frac{2}{B}} F_1 - \frac{1}{2B} \tag{3.19}$$

La relation de *Herbrand (1973)* peut être considérée comme une solution asymptotique pour $X_i \gg 0$. L'effet de la position du ressaut et le taux d'élargissement est donné par l'équation (3.18), donc, le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique de transition (ressaut type T) est obtenu :

$$\psi = \frac{Y^* - Y}{Y^* - 1} = \left[1 - \frac{1}{\sqrt{B}} \right] [1 - Tgh(1,9X_i)] \tag{3.20}$$

La figure (3.13) présente la variation du rapport des hauteurs conjuguée $\psi = (Y^* - Y) / (Y^* - 1)$ en fonction de la position du pied du ressaut $X_i = x_1 / L_r^*$, pour plusieurs rapports d'élargissement selon l'équation (3.20).

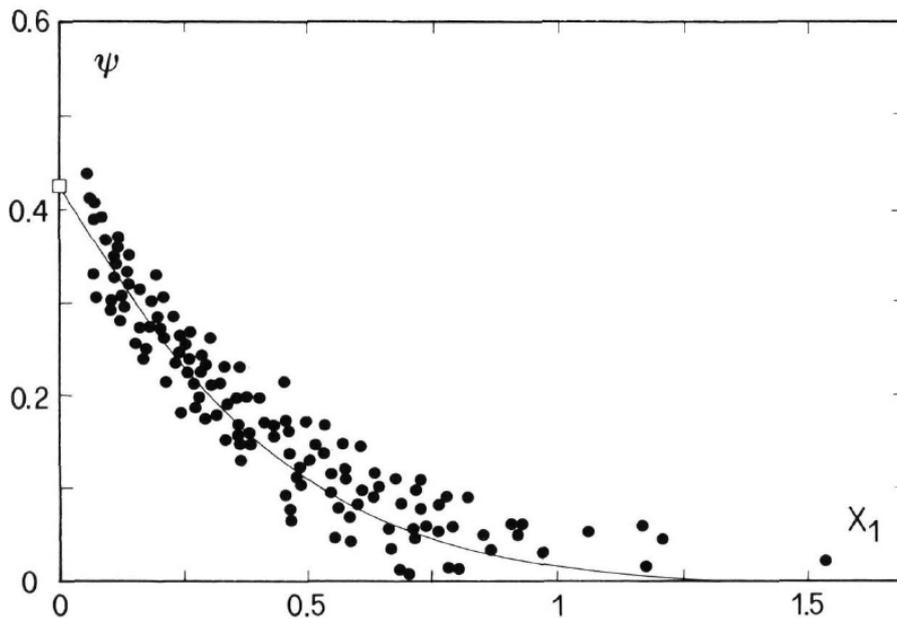


Figure 3.12 : Variation du paramètre $\psi (X_i)$. (•), pour $\beta = 3$; (—) équation (3.18) ; (□) équation (3.19)

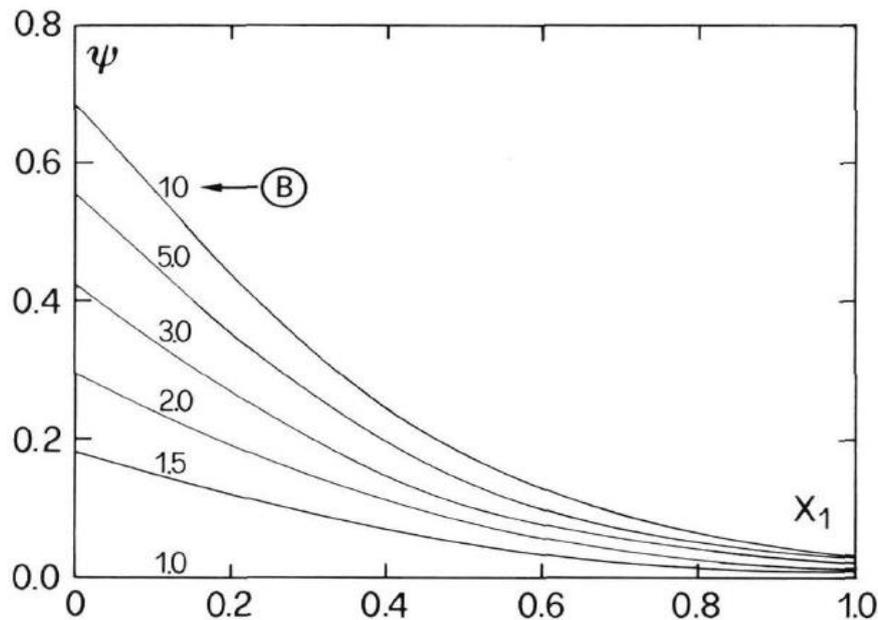


Figure 3.13 : Rapport des hauteurs conjuguées en fonction de la position du pied du ressaut pour divers rapports d'élargissement selon l'équation (3.20)

La quantité ψ dépend du rapport d'élargissement β et de la position relative du pied du ressaut X_i , ψ est égale à zéro pour le ressaut développé dans le canal d'approche prismatique, et elle est maximale pour des valeurs d'élargissement très large ($\beta \rightarrow \infty$) quand le pied du ressaut est approximativement localisé dans la section élargie.

Le domaine d'application de l'équation 3.20 est limité par les conditions :

- Rapport d'élargissement $1 \leq \beta \leq 10$.
- Le nombre de Froude amont $2,5 \leq F_1 \leq 12$.
- La position relative du pied du ressaut $0,05 \leq X_i \leq 1,5$.

III.5.1.2. Rendement du ressaut

Le rendement du ressaut hydraulique η est égal la perte de charge entre la section initiale et finale $\Delta H = H_1 - H_2$ divisée par la charge initiale H_1 , la figure (3.14) présente la variation du η pour deux (02) rapports d'élargissement β en fonction du F_1 pour plusieurs valeurs du X_i . La courbe discontinue représente le rendement du ressaut classique η^* obtenu par l'application de la relation (1.31). Il est à noter que l'augmentation du η par rapport à η^* est significative pour des larges valeurs de β et petites valeurs de X_i , le pourcentage d'augmentation dépend fortement en F_1 . Une expression approximative pour calculer le rendement η est obtenue :

$$\eta = \left[1 - \frac{Y}{F_1^2}\right]^2 \cong \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}(1 - \psi)\right]^2. \quad \text{Pour } F_1 > 2. \quad (3.21)$$

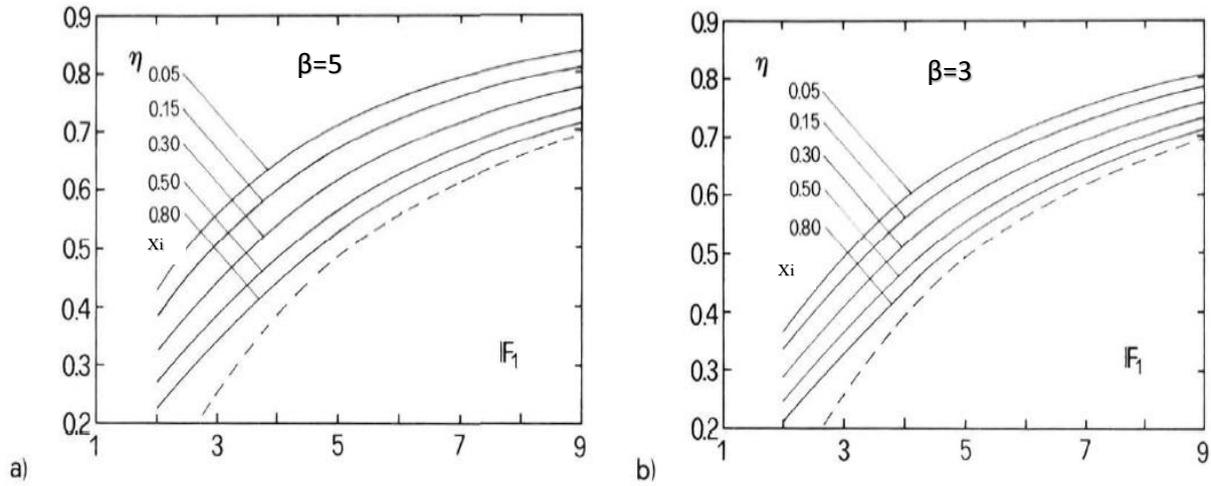


Figure 3.14 : Rendement η du ressaut du type T en fonction de F1 pour diverses positions du pied du ressaut Xi et a). β =5 ; b). β =3 ; (-----) η*(F1) du ressaut classique.

III.5.1.3. La longueur du ressaut

La longueur du ressaut Lj est difficile à mesurer, due principalement à l'asymétrie du ressaut, à la fluctuation du pied du ressaut, à la turbulence remarquée à la section finale du ressaut et l'action des ondes aval.

La longueur du ressaut type T (ressaut de transition) est normalisée avec la longueur du ressaut classique Lj* estimé par la relation exposée dans le premier chapitre (1.17), la figure (3.15) montre la variation de la longueur relative Lj/Lj* en fonction de la position relative du pied du ressaut Xi pour β=3, la courbe obtenue correspond à :

$$\frac{Lj}{Lj^*} = 1 + \psi = 1 + \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\beta}}\right] [1 - Tgh(1.9Xi)]. \quad (3.22)$$

La longueur relative Lj/Lj* tend asymptotiquement à l'unité si Xi > 1, la longueur du ressaut type T est toujours supérieure à celle du ressaut classique tout dépend du β et de Xi, la différence devient notable quand le pied du ressaut se trouve proche de la section élargie et avec des valeurs plus large de β, ce type du ressaut est plus efficace en terme de dissipation d'énergie mais il est fortement asymétrique.

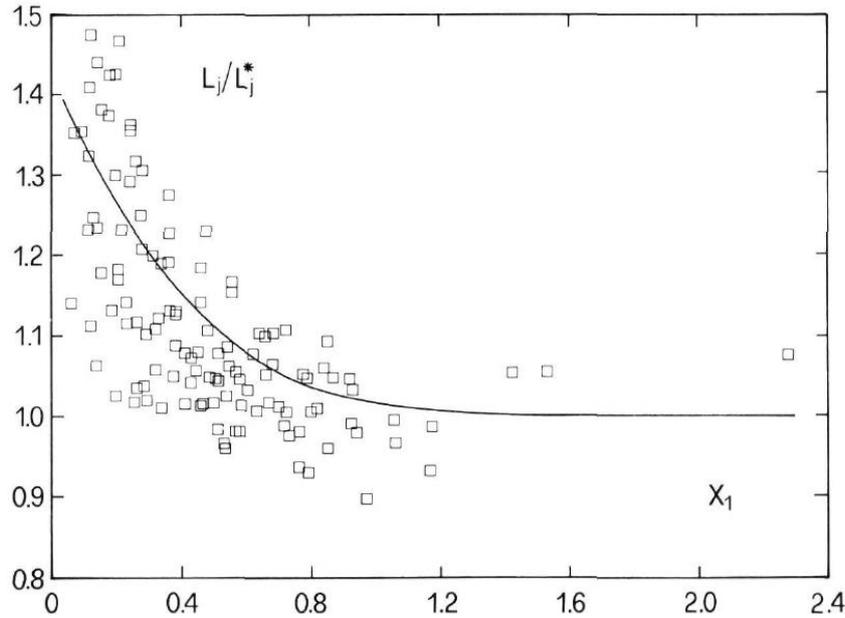


Figure 3.15 : La longueur relative L_j/L_j^* du ressaut de type T en fonction de la position relative du pied du ressaut pour $\beta = 3$; (—) équation (3.21)

III.5.1.4. La symétrie du ressaut

La symétrie du ressaut de transition dépend essentiellement de deux paramètres à savoir ; le taux d’élargissement β et la position relative du pied de ressaut X_i , les auteurs ont introduit un paramètre de l’asymétrie du ressaut :

$$\Delta Y_a = 2 \left[\frac{h_{aM} - h_{am}}{h_{aM} + h_{am}} \right] \tag{3.23}$$

Dans lequel « M » et « m » référés au maximum et minimum de deux profondeurs latérales h_a . Le rapport ΔY_a correspond physiquement à la différence sur la moyenne des profondeurs d’écoulement. La figure (3.16) montre la variation du ΔY_a en fonction de X_i pour $\beta=3$, dans les deux canaux de test LCH1 et LCH2.

Les deux courbes indiquent que le ressaut peut être symétrique si $X_i > 0,7$. Pour $X_i \rightarrow 0$, le paramètre de la symétrie est presque 50%, et reflète donc un écoulement fortement asymétrique.

Les auteurs ont pu définir les valeurs limites pour X_i comme suit :

$$\psi_{L1} = \frac{1}{8} \left(1 - \frac{2}{3} X_i \right)$$

$$\psi_{L1} = 0,28$$

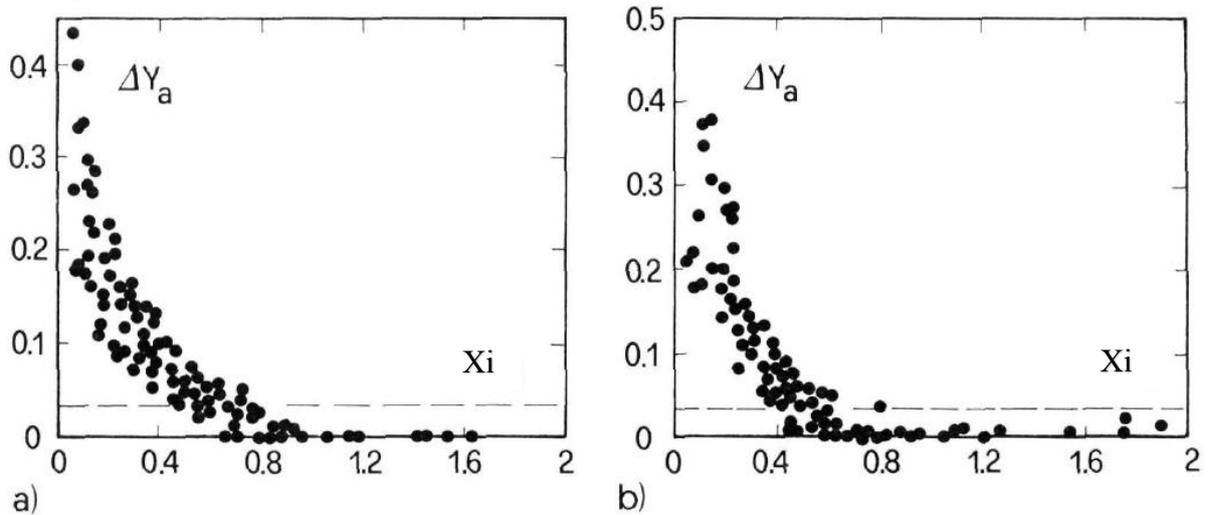


Figure 3.16 : Asymétrie du ressaut du type T, ΔY_a en fonction de X_i pour $\beta = 3$. a) canal LCH1 ; b) canal LCH2 (---) limite pour le ressaut symétrique

Si $\psi < \psi_{L1}$ le ressaut de transition est symétrique, Si $\psi > \psi_{L2}$ le ressaut est fortement asymétrique. Pour $\psi_{L1} < \psi < \psi_{L2}$ le ressaut est oscillatoire. Il est à noter que le ressaut de transition est symétrique pour $\beta < 1,4$ quoi que ce soit X_i , le ressaut avec un taux d'élargissement $\beta > 2$ peut devenir fortement asymétrique, notamment quand le X_i se situe à la section élargie.

III.5.2. Les travaux de Zare et Doering (2011)

Les chercheurs ont étudié le ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire brusquement élargi avec une géométrie symétrique et asymétrique, un programme intensif d'expérimentation comporte plusieurs hauteurs et positions du seuil est conduit, une attention particulière est portée sur le ressaut spatial.

III.5.2.1. Les hauteurs conjuguées du ressaut

La figure (3.17) présente la relation liant le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de nombre de Froude amont F_1 et de paramètre $\delta = S/LS$, avec ou sans seuil, pour un élargissement de géométrie symétrique ($\Delta=0$), sachant que :

- ✓ $S = s/h_0$: représente la hauteur relative du seuil.
- ✓ $LS = L_s/h_0$: la position relative du seuil par rapport à l'élargissement.
- ✓ h_0 : la hauteur de l'eau sous la vanne d'entrée.
- ✓ $\delta = S/LS$: paramètre corrélé la hauteur du seuil avec sa position, et Δ : rapport d'asymétrie.

Quand δ diminué, la hauteur du seuil augmente et sa position diminuée, le seuil est moins efficace, quand δ augmente, la hauteur du seuil augmente et sa position diminuée, le seuil est

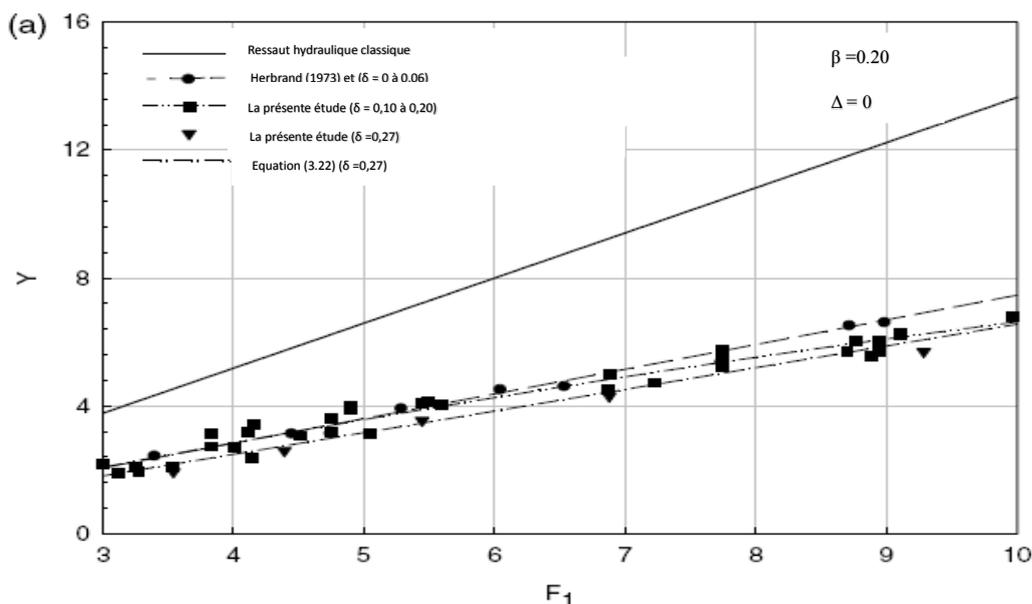
plus efficace. Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique est représenté à titre de comparaison par l'équation de *Bélanger (1928)*.

L'augmentation du paramètre δ engendre la diminution du Y , cette diminution est accentuée pour des larges valeurs du rapport d'élargissement $\beta = b_1/b_2$. Les auteurs ont trouvé que :

- Pour $\beta=0,2$ et $\delta = 0$ à $0,06$, les résultats expérimentaux sont bien décrits par la relation (3.12) de *Herbrand (1973)*, la figure (3.17.a).
- Pour $\beta=0,5$ et $\delta = 0$ à $0,06$, les résultats ont décrits par l'équation (3.7) de *Unny (1963)*, la figure (3.17.b.),
- Pour les valeurs de $\delta =0,1$ à $0,2$, le rapport des hauteurs conjuguées peut être prédit en utilisant les courbes présentées dans la figure (3.17.a et b).
- Pour la valeur maximale de $\delta=0,27$, qui engendre la plus grande diminution en Y , l'équation (3.24) ci-dessous peut être utilisée pour calculer Y , cette relation est validé pour une gamme de nombre de Froude amont entre 2,5 et 10,5 et pour les deux (02) rapports d'élargissement β .

$$\frac{Y}{Y^*} = \beta^2 - 0,55\beta + 0,55 \tag{3.24}$$

La même relation est obtenue pour l'élargissement à géométrie asymétrique avec ou sans seuil, l'ajustement des points expérimentaux est présenté dans la figure (3.18) pour deux (02) rapports d'élargissement $\beta = 0,2$ et $0,5$, l'effet du seuil dans la réduction du rapport des hauteurs conjuguées est négligeable pour des petites valeurs du rapport d'élargissement comme il est montré dans la figure (3.18.a.), mais cet effet est compté pour des valeurs de β assez modérées, figure (3.18.b).



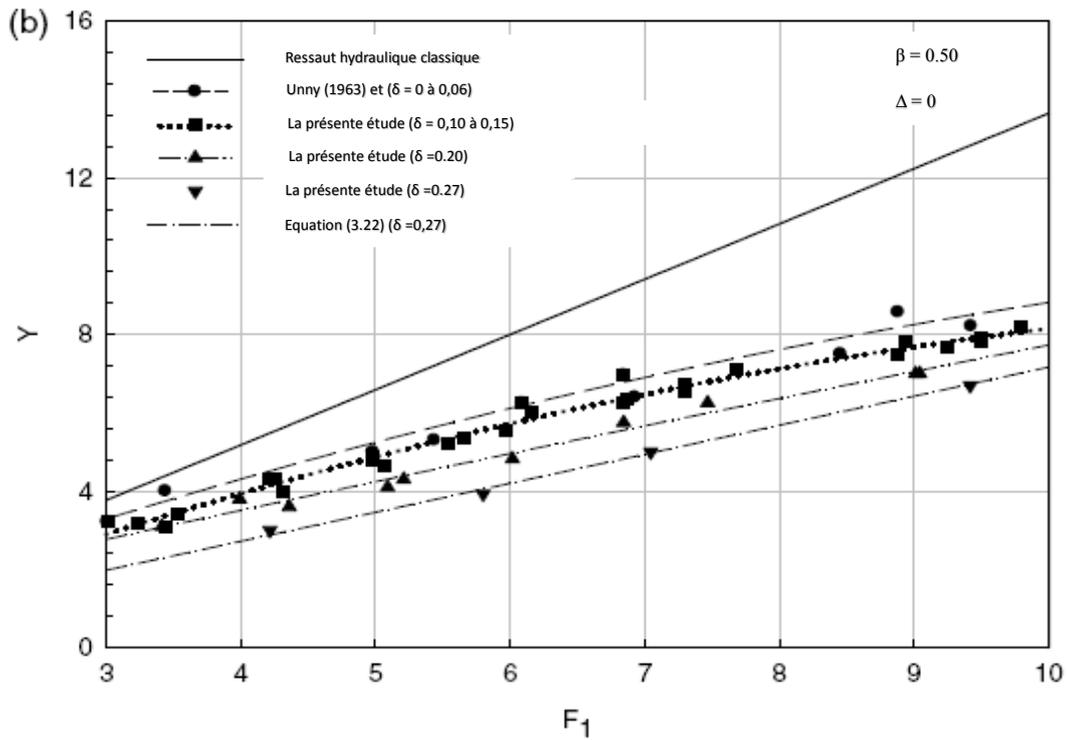
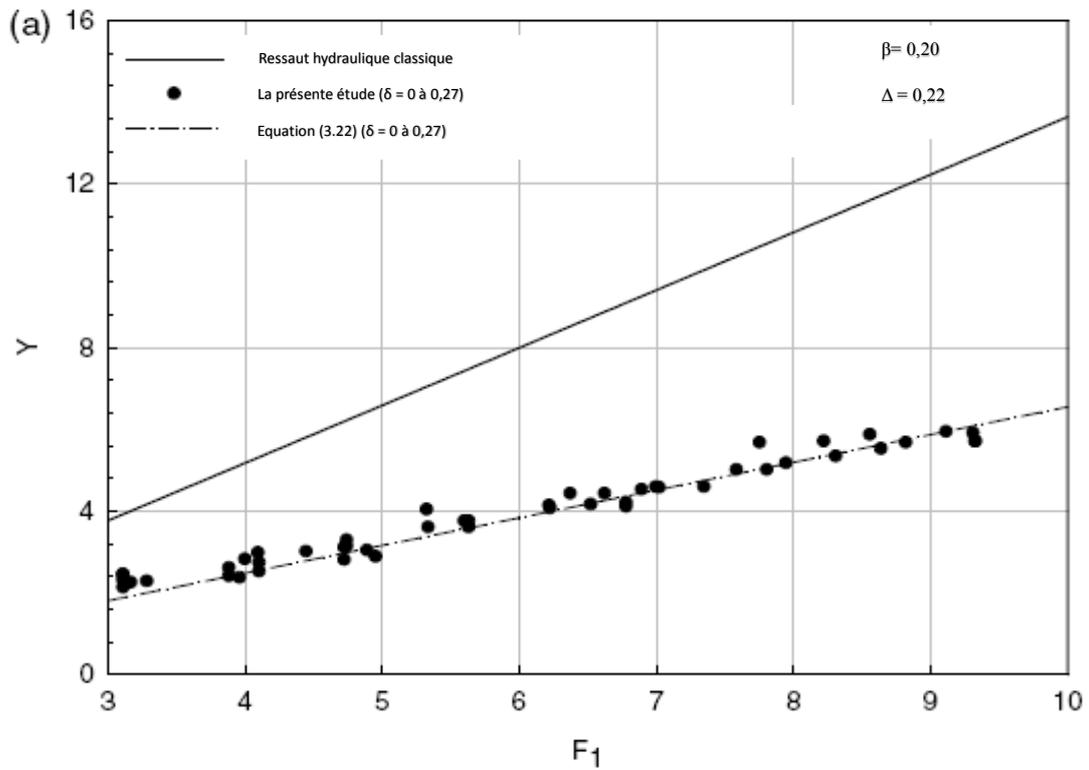


Figure 3.17 : Le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude amont F_1 avec géométrie symétrique, $\Delta = 0$, pour plusieurs valeurs du paramètre δ , a) $\beta = 0,2$; b) $\beta = 0,5$.



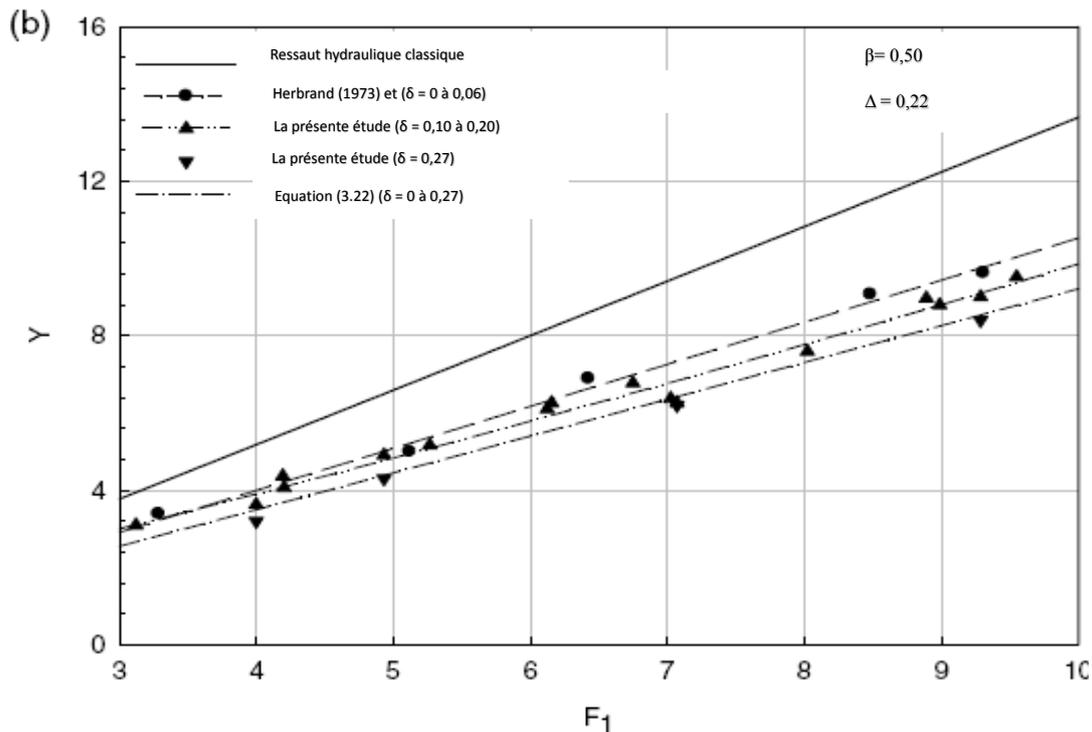


Figure 3.18 : Le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude amont F_1 avec géométrie asymétrique $\Delta = 0,22$, pour plusieurs valeurs du paramètre δ , a) $\beta = 0,2$; b) $\beta = 0,5$.

Le taux de réduction en Y avec la présence d'un seuil dans le canal à géométrie asymétrique (figure 3.18) est inférieur que celui dans le canal à géométrie symétrique (figure 3.17).

Pour $\beta = 0,5$ et $\delta = 0$ à $0,06$, l'équation de *Herbrand (1973)* est utilisée. Pour $\beta = 0,5$ et $\delta = 0,10$ à $0,20$, le rapport des hauteurs conjuguées peut être prédit par la courbe de régression des points expérimentaux dans la figure (3.18.b). Pour $\beta = 0,2$ et $\delta = 0$ à $0,27$, et pour $\beta = 0,5$ et la valeur maximale de $\delta = 0,27$, le rapport des hauteurs conjuguées est obtenue en appliquant la relation empirique ci- dessous :

$$\frac{Y}{Y^*} = 0,65\beta + 0,35 \tag{3.25}$$

III.5.2.2. Le rendement du ressaut

Les auteurs ont utilisé la relation empirique (3.19) de *Hager et Bremen (1993)*, et les résultats expérimentaux de leur étude, la dissipation d'énergie peut être calculée pour l'élargissement symétrique (figure. 3.19) et l'élargissement asymétrique (figure. 3.20). Le travail de *Hager et Bremen (1993-1994)* pour le ressaut classique et la condition du ressaut spatial ($X_i = 0,05$) a été représentée dans les figures à titre comparatif. Pour les figures (3.19 ; 3.20), le rendement du ressaut augmente avec la diminution de β et l'augmentation du δ . L'effet du seuil est diminué quand le nombre du Froude F_1 augmente, son utilisation engendre l'augmentation du rendement

pour l'élargissement symétrique. L'effet de l'asymétrie $\Delta=0,22$ est négligeable pour les bassins sans seuil. Pour la figure (3.19), quand $\beta = 0,2$ ou $0,5$ et pour $\delta = 0$ à $0,20$, le rendement du ressaut peut être déduit de la courbe de régression des points expérimentaux. Pour $\beta = 0,2$ ou $0,5$ et la valeur maximal de $\delta = 0,27$, l'équation ci-dessous peut être utilisée :

$$\frac{\Delta E}{\Delta E^*} = 1 + \frac{1-\beta^{1,25}}{0,125F_1^{1,6}} \tag{3.26}$$

Sachant que ΔE^* : le rendement du ressaut classique.

Dans la figure (3.20), quand le $\beta = 0.2$ et pour $\delta = 0$ à 0.27 ou si $\beta = 0.5$ et $\delta = 0.20$ à 0.27 , le rendement peut être calculé par la relation (3.27), alors que pour $\beta = 0.5$ et la valeur de δ est arrangée entre 0 à 0.15 , le rendement du ressaut peut être évalué à partir de la courbe de régression des points expérimentaux présenté dans la figure.

$$\frac{\Delta E}{\Delta E^*} = 1 + \frac{1-\beta^{1,25}}{0,15F_1^{1,6}} \tag{3.27}$$

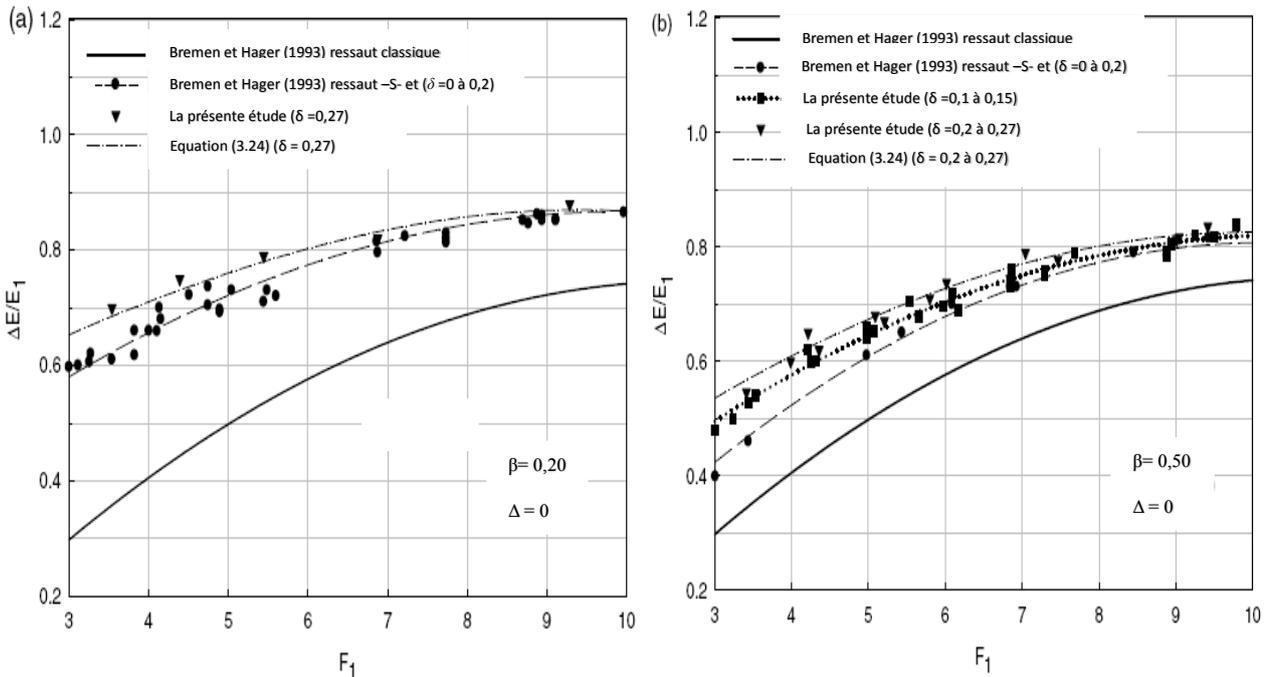


Figure 3.19 : Le rendement η en fonction du nombre de Froude amont F_1 avec géométrie symétrique, pour plusieurs valeurs du paramètre δ , a) $\beta=0,2$; b) $\beta=0,5$

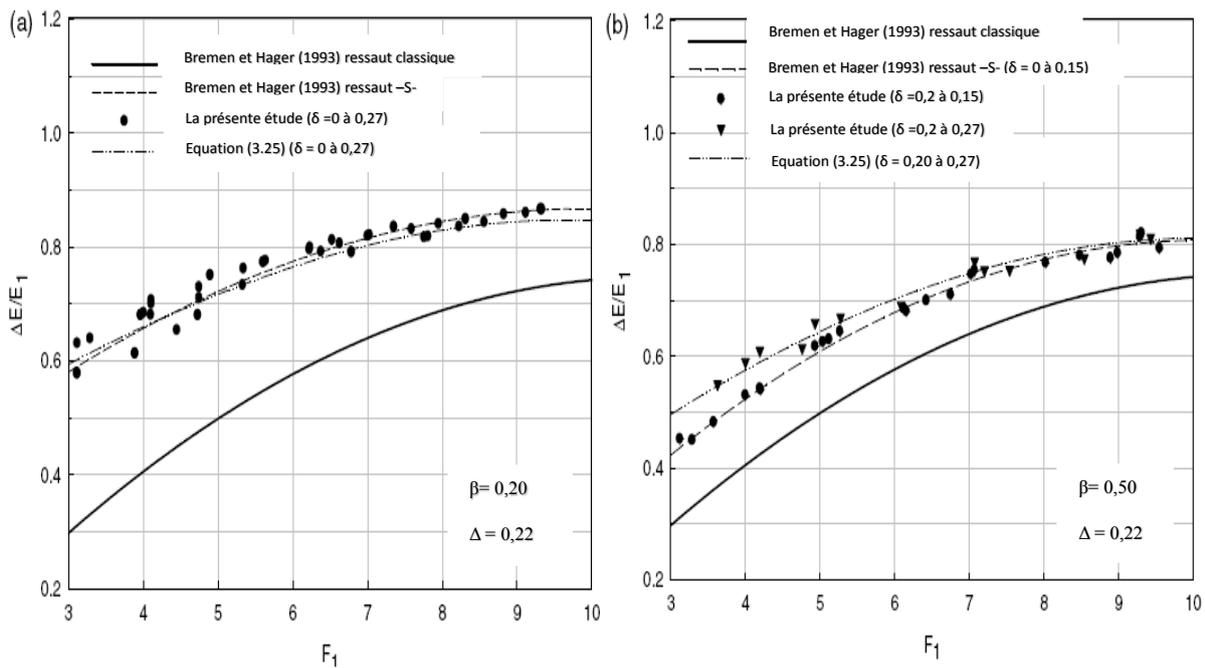


Figure 3.20 : Le rendement η en fonction du nombre de Froude amont F_1 avec géométrie asymétrique, pour plusieurs valeurs du paramètre δ , a) $\beta = 0,2$; b) $\beta = 0,5$

III.5.2.3. La longueur du bassin de dissipation

Selon *Bremen et Hager (1993)*, la section finale du ressaut correspond à la section dans laquelle les poches d'air n'apparaissent plus, cette disparition indique la fin de l'effet de la turbulence dans le bassin, les chercheurs ont choisi ce critère parce qu'il est large et plus conservateur.

La figure (3.21) présente la variation de la longueur du ressaut spatial L_B par rapport à celle classique L_B^* pour deux (02) rapports d'élargissement β en fonction des paramètres δ qui représente l'effet du seuil et Δ qui représente le degré d'asymétrie de la géométrie du canal.

La figure inclut aussi la longueur du ressaut étudié par *Bremen et Hager (1993)* du ressaut de transition quand le $X_i = 0,05$ (considéré ici comme un ressaut spatial), et la formule de la longueur du bassin de *Sharma (1964)* représentée par *Herbrand (1973)*.

Les longueurs caractéristiques du ressaut classique (L_r^* , L_j^*), et la longueur du ressaut spatial (L_j) sont introduites par les équations (1.12), (1.17) et (3.22) respectivement, la longueur du bassin de Sharma présentée par *Herbrand (1973)* a été reproduit par les équations (3.13) et (3.14).

La figure (3.21) montre que la longueur du bassin avec un élargissement de géométrie asymétrique est plus grande que celle avec élargissement symétrique. Quand l'élargissement augmente, la longueur du bassin symétrique augmente, alors que celle du bassin asymétrique

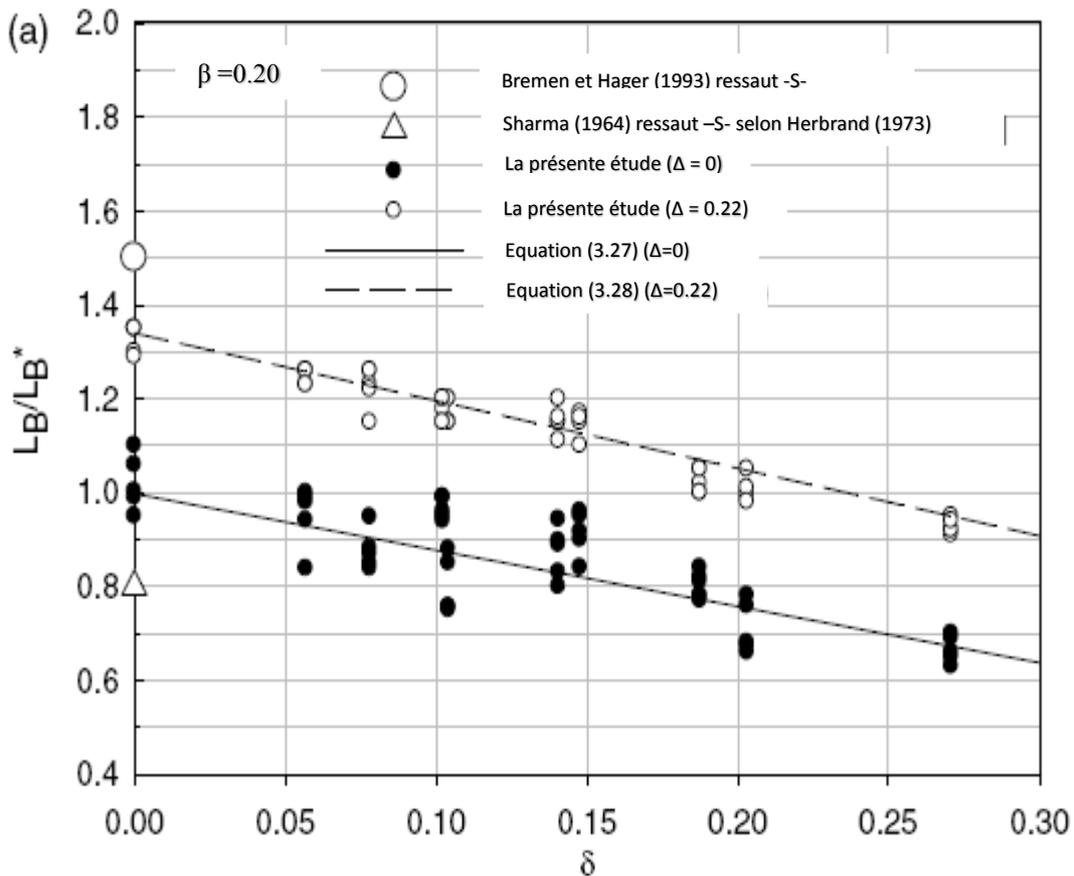
diminue. L'effet du seuil est de réduire la longueur du bassin d'un ressaut spatial pour tous les cas.

Des équations empiriques peuvent être déduites afin de calculer la longueur du bassin d'un ressaut spatial pour $\beta=0,2$ ou $0,5$ et une gamme de δ allant de 0 à $0,27$, pour le bassin symétrique $\Delta = 0$ (équation 3.28), et asymétrique $\Delta = 0,22$ (équation 3.29) :

$$\frac{L_B}{L_B^*} = [\beta^{0,5} \text{Exp}(1 + \beta^{0,75})] + [1 - \beta](0,1 + \beta)(0,4 - 0,5\delta) \tag{3.28}$$

$$\frac{L_B}{L_B^*} = [\beta^{0,3} \text{Exp}(1 + \beta^{0,75})] + [1 - \beta](0,1 + \beta)(0,4 - 0,5\delta) \tag{3.29}$$

Les deux équations sont très utiles dans le calcul de la longueur du bassin d'un ressaut spatial pour n'importe quelle hauteur et position du seuil et pour les bassins symétrique ou asymétrique dans les conditions préliminaires ou opératoires.



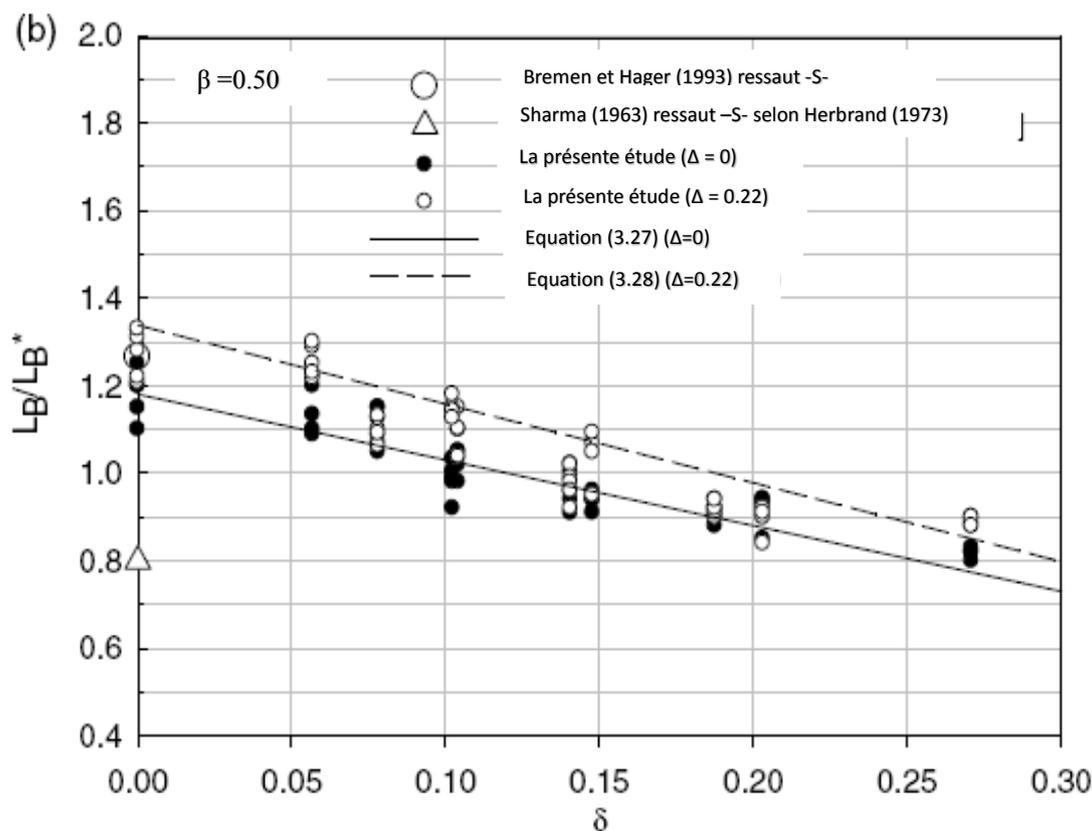


Figure 3.21 : La longueur relative du ressaut en fonction du paramètre δ pour deux configurations géométriques (symétrique et asymétrique) et pour deux rapports d'élargissement a) $\beta = 0.2$; b) $\beta = 0.5$.

III.5.3. La contribution de Scorzini et al (2015)

Ce travail expérimental porte sur l'optimisation d'un bassin de dissipation d'énergie sous un élargissement brusque, l'objectif est d'éliminer le phénomène de l'écoulement asymétrique et de rendre le ressaut plus stable, ce phénomène est caractérisé par une grande vitesse concentrée sur l'un des côtés, accompagnée par un écoulement en retour dans l'autre côté. Les auteurs ont installé un système constitué de quatre poutres transversales et espacées, de deux (02) hauteurs différentes arrangés en deux (02) systèmes d'orientations de pente par rapport au fond du canal horizontal et deux (02) positions par rapport à la section élargie.

III.5.3.1. Installation et modalités expérimentales

La figure (3.22) représente l'installation expérimentale, les chercheurs ont organisé leurs travail comme suit :

Une phase préliminaire divisée en deux expériences, la première a comme objectif l'identification des conditions de référence aval qui sont utiles pour tester les performances du bassin, à l'aide d'une vanne installé à la fin du canal (section de contrôle), les chercheurs ont

identifié le niveau aval nécessaire pour former le ressaut de transition (ressaut type –T-) et le ressaut spatial (ressaut type –S-).

Le ressaut de type –T- est développé quand le niveau aval $h=h_T=4,7\text{cm}$ dans la section de contrôle. Il est à noter que dans un tel ressaut, le pied est localisé quelques centimètres avant la section élargie, alors que le ressaut spatial –S- est généré quand le niveau aval $h = h_S=3.8\text{cm}$ et avec une position de pied du ressaut très proche de la section élargie. Il est à noter aussi que le débit est maintenu constant à 4 l/s, par conséquent, le nombre du Froude amont F_1 est 7,43.

La deuxième expérience consiste à installer une série des poutres transversales de forme similaire à la lettre (I) au sein du bassin de dissipation d'énergie comme indiqué dans la figure (3.22), plus ou moins espacé, avec deux hauteurs $h_{\text{poutre}} = 2$ et 3cm, distant de $P = 20$ et 40cm de la section élargie, avec deux orientations vers le haut et vers le bas, deux angles pour chaque hauteur des poutres, ($\vartheta = 15$ et 22° pour $h_{\text{poutre}} = 2\text{cm}$ et $\vartheta = 11$ et 19° pour $h_{\text{poutre}} = 3\text{cm}$). Cette expérience a comme but d'analyser l'influence de différentes configurations dans la performance du bassin en termes d'uniformité de l'écoulement et de distribution de la vitesse.

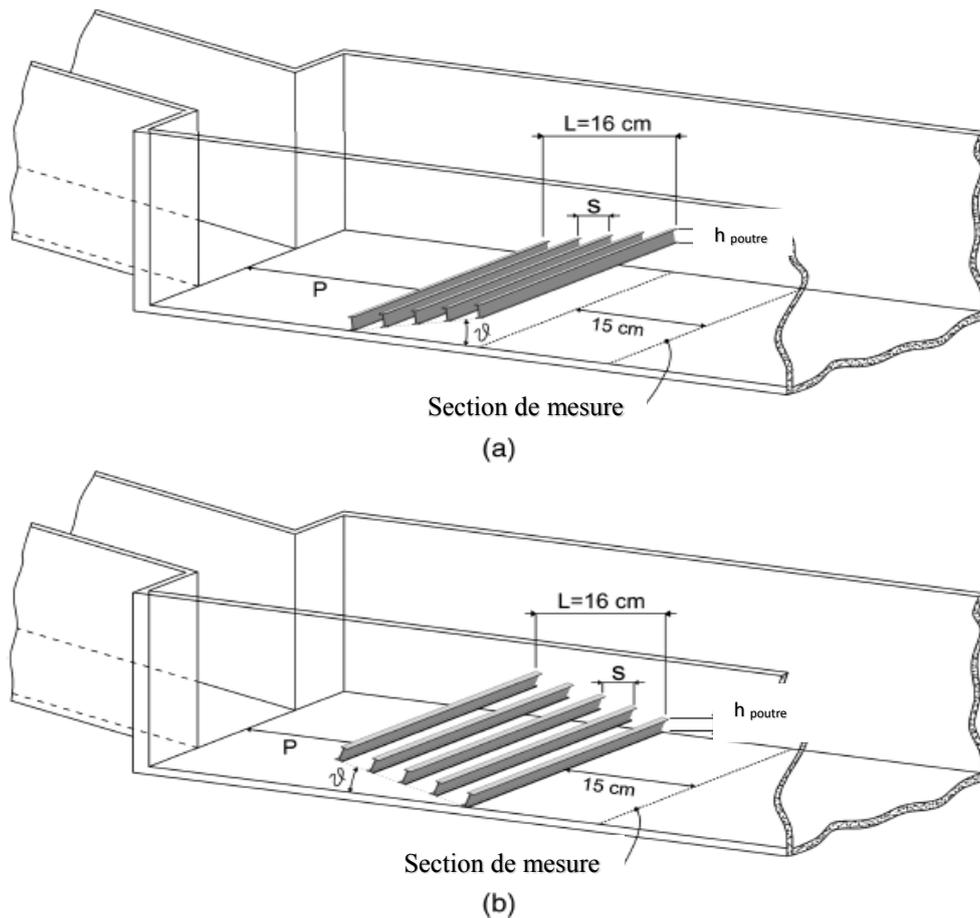


Figure 3.22 : Schéma du canal avec des configurations typique : a) dissipateur avec une pente vers le haut ; b) dissipateur avec pente vers le bas.

La deuxième phase consiste à étudier le comportement de la meilleure moyenne en termes de performance sous des niveaux aval dans la section de contrôle plus bas que celui nécessaire pour la formation du ressaut spatial.

La vitesse est mesurée près du fond du canal (0.5cm du fond) dans quatre sections transversales localisées respectivement à 40, 80, 165, 295 cm après la section élargie. Dans chacune des sections transversales, cinq (05) points de mesure ont été établit.

III.5.3.2. Résultats de travail

La performance de différentes configurations a été évaluée à la base d'un paramètre similaire au coefficient de correction de la quantité du mouvement (coefficient de Boussinesq) β_L et de la vitesse longitudinale moyenne v_m , ces deux paramètres fournissent des informations sur l'uniformité de l'écoulement et la distribution de la vitesse longitudinale moyenne mesurée à proximité du radier du canal.

Le paramètre β_L est calculé à la base de la ligne intégrale des mesures de vitesse à une hauteur de 0.5cm du radier du canal plutôt que la ligne intégrale à la surface.

$$\beta_L = \frac{\int_0^{b_2} v(x) \cdot |v(x)| dx}{b_2 \cdot v_m^2} \quad (3.30)$$

Dans laquelle :

b_2 : la largeur du canal.

v_m : la vitesse longitudinale moyenne.

β_L : paramètre de l'uniformité de l'écoulement.

$v(x)$: profil de vitesse dans la section de mesure transversale

L'efficacité du bassin de dissipation a été évaluée en termes d'homogénéisation et de réduction de la vitesse locale par la comparaison des valeurs de β_L et $\beta_L \cdot v_m^2$ dans les conditions de référence avec celles obtenu quand on utilise le moyen (les poutres transversales).

Après une série des mesures et d'observation, les chercheurs ont trouvé que la meilleure efficacité est obtenue avec le nombre des poutres transversales $N = 4$, donc, l'espacement entre celles-ci est maximum. L'analyse est continue en changeant les conditions aval dans la section de contrôle, alors quatre configurations ont été choisies :

- a) $P=40\text{cm}$, $h_{\text{poutre}} = 3\text{cm}$; $\vartheta = 19^\circ$; configuration avec pente vers le haut.
- b) $P=40\text{cm}$; $h_{\text{poutre}} = 2\text{cm}$; $\vartheta = 15^\circ$; configuration avec pente vers le bas.
- c) $P=20\text{cm}$, $h_{\text{poutre}} = 3\text{cm}$; $\vartheta = 19^\circ$; configuration avec pente vers le haut.
- d) $P=20\text{cm}$, $h_{\text{poutre}} = 2\text{cm}$; $\vartheta = 15^\circ$; configuration avec pente vers le bas.

La figure (3.23) montre la construction du profil de la vitesse transversale dans la station de mesure localisée 15cm a l'aval de système, pour six (06) hauteurs dans la section de contrôle à la fin du canal, dans laquelle h_T et h_S indique les conditions de référence et h_I indique les quatre valeurs des hauteurs plus petits que h_S . $I = 3.5, 3.2, 2.9$ et 2.6cm .

La courbe d'efficacité a été obtenue de ces données par le calcul de $\beta_L^* v_m^2$ exprimé en termes du rapport h/h_T . (Figure 3.24).

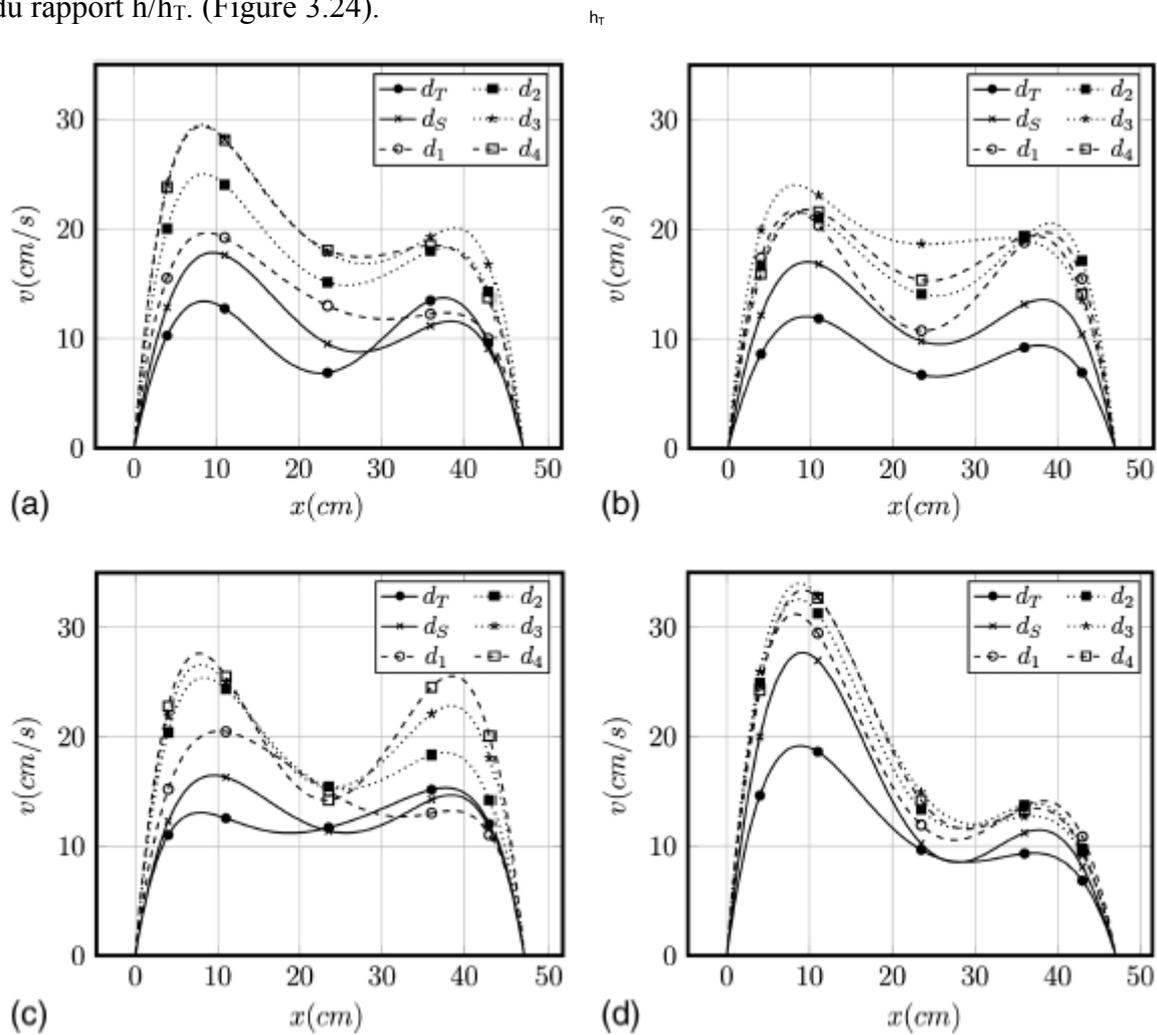


Figure 3.23 : Profil de la Vitesse longitudinale à travers la section de mesure pour six (06) hauteurs d'eau aval pour les quatre configurations choisies

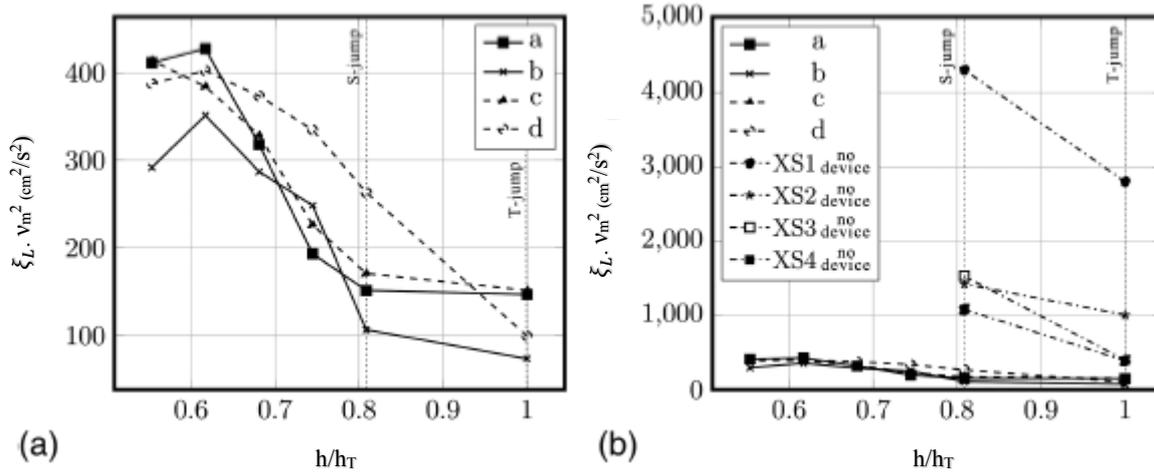


Figure 3.24 : Les courbes d'efficacité pour les quatre configurations choisies, montre la variation de $\beta_L \cdot v_m^2$ en fonction de h/h_T ; a) comparaison des quatre configurations ; b) comparaison les quatre configurations avec les configurations de référence sans le système

La figure (3.24.a) montre que dans les configurations a, b et c, la valeur de $\beta_L \cdot v_m^2$ est approximativement constante pour les deux conditions de référence de ressaut type -T- et type -S-, tandis que cette valeur est augmenté considérablement pour des niveaux aval plus petits.

La principale différence est remarquée dans la configuration d, présentant un accroissement significatif dans la valeur de $\beta_L \cdot v_m^2$ (par un facteur de 2.8 presque) de ressaut de transition de transition jusqu'au ressaut spatial. En particulier, la configuration b est moins sensible aux conditions aval, avec une meilleure performance en h_T , h_S et aussi pour les valeurs basses de niveaux aval, les courbes représentant les configurations a et c sont très similaires, ce qui montre que l'orientation de système en haut est moins sensible à la position du système par rapport à l'élargissement, contrairement aux courbes b et d qui soulignent une importance d'une position correcte pour l'orientation de système en bas.

L'efficacité de ces configurations est apparue dans la figure (3.24.b), en comparant les résultats avec les configurations initiale de référence dans lesquelles le système des poutres n'est pas installé. Les observations ont montré que l'utilisation de tel système a entraîné une amélioration nette dans les conditions d'écoulement même à des niveaux aval plus petits. En fait, la valeur maximale de $\beta_L \cdot v_m^2$ (presque $400\text{cm}^2/\text{s}^2$) mesurée 15cm à l'aval de système étaient beaucoup plus basses que les valeurs observées dans les conditions de référence du ressaut type -S- à l'endroit XS3 = 165cm et XS4 = 295cm (presque 1500 et $1000\text{cm}^2/\text{s}^2$ respectivement).

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire brusquement élargi.

D'abord, nous avons présenté les différentes formes du ressaut, selon la classification de *Bremen (1990)*, qui dépendent de la position du pied du ressaut par rapport à l'élargissement.

En premier lieu, nous avons remarqué que les travaux entretenus de 1960 jusqu'à 1990 ont porté sur les caractéristiques principales du ressaut hydraulique, telles que les hauteurs conjuguées, les longueurs caractéristiques et la dissipation d'énergie. Dans tous ces travaux, les chercheurs ont remarqué la présence d'un écoulement asymétrique étrange dans le ressaut spatial, néanmoins, aucune étude systématique n'a été développée pour rendre à l'écoulement son caractère symétrique, quant aux méthodes analytiques utilisées, la plupart des contributions ont été basées sur l'équation de quantité du mouvement. *Bremen (1990)* a vérifié l'applicabilité de cette dernière. Toutefois, le problème des ressauts évoluant dans les canaux à élargissement réside dans la prise en compte des hauteurs d'eau dans les deux côtés du canal élargi h_d et h_g , et de la pression résultante P_d et P_g .

Ensuite, nous avons abordé les travaux les plus intéressants entretenus de 1990 jusqu'au 2015, *Bremen et Hager (1993)* ont étudié le ressaut dans transition dans un canal rectangulaire brusquement élargi, une attention particulière est portée sur l'effet de la position du pied de ressaut par rapport à la section élargie (X_i). Ils ont proposé des relations empiriques pour le calcul du rapport des hauteurs conjuguées, du rendement et de la longueur caractéristique du ressaut L_j . Les chercheurs ont étudié aussi la symétrie du ressaut de transition par l'introduction du paramètre ΔY_m qui dépend de taux d'élargissement β et de la position du pied du ressaut par rapport à la section élargie X_i , les deux paramètres ont été combinés en un seul ψ , ils ont conclu que le ressaut peut être symétrique pour des valeurs de taux d'élargissement $\beta < 1,4$ quoique ce soit la valeur de X_i , pour des valeurs de $\beta > 2$, le ressaut peut devenir fortement asymétrique.

La contribution de *Zare et Doering (2011)* sur le ressaut spatial forcé par seuil dans un canal rectangulaire brusquement élargi à géométrie symétrique et asymétrique a conclu que cette dernière diminue le rapport des hauteurs conjuguées plus qu'une géométrie symétrique pour des petites valeurs de β , cette conclusion est inversement pour des grandes valeurs de β , l'augmentation de δ engendre la diminution de Y pour les deux géométries. La dissipation d'énergie augmente avec l'augmentation δ et la diminution β . La longueur de bassin asymétrique est plus grande que celle en bassin symétrique.

Enfin, nous avons présenté l'étude la plus récente de *Scorzini et al (2015)*, l'objectif de cette étude est l'élimination du phénomène de l'écoulement asymétrique dans les bassins d'amortissement brusquement élargie par la mise en place d'un système de poutres transversales.

Conclusion de la première

partie

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Dans cette présente partie, les principales investigations comptées sur le ressaut hydraulique ont été reportées à travers trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré au ressaut hydraulique en canal rectangulaire, nous avons pu diviser celui-ci en deux axes :

Le premier axe reflète les travaux les plus intéressants dans le ressaut hydraulique en canal rectangulaire prismatique de pente nul ou presque nul. En premier lieu, nous avons présenté la classification de *Bradley et Peterka (1957)* basée sur le nombre de *Froude* de l'écoulement incident F_1 . En outre, on a montré que l'application du théorème de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut conduit à l'équation connue de *Bélanger (1928)* qui exprime le rapport des hauteurs conjuguées en fonction de nombre de *Froude* l'écoulement incident F_1 . En deuxième lieu, nous avons abordé l'étude de *Hager et Bremen (1989)* qui fait ressortir que le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut ne dépend pas seulement du nombre de *Froude* F_1 mais aussi au nombre de *Reynolds* et des caractéristiques géométriques de écoulement (rapport profondeur/ largeur). En troisième lieu, nous avons abordé l'étude de *Hager (1992)* concernant le profil de surface, puis, celle de *Hager et al (1990)* sur les longueurs caractéristiques de ressaut, notamment la longueur de rouleau développé et non développé. Enfin, le rendement de ressaut classique est expose, en comparant la formule trouver avec celle de *Hager et Sinniger (1989)*.

Le deuxième axe de ce chapitre est consacré au ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince et épaisse, d'abord, l'étude de *Forster et Skrinde (1950)* sur le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince est abordée. Ensuite, on a examiné l'étude de *Achour, Sedira et Debabeche (2002)*, qui ont abouti à proposer des relations empiriques permettant le calcul de la hauteur relative S du seuil en fonction de la position relative x/h_2 de celui-ci et de nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident.

Enfin, concernant le contrôle du ressaut par marche, l'étude de *Forster et Skrinde (1950)* a été examiné, une analyse a permis aux auteurs de mettre en place les conditions d'écoulement associées aux niveaux aval variable.

Le deuxième chapitre de notre étude est consacré au ressaut hydraulique évoluant dans un cana trapézoïdal, celui-ci aussi est divisé en deux axes :

Dans le premier axe, nous avons mis l'accent sur les travaux de *Hager et Wanoschek (1987-1989)*, qui ont étudié le comportement du ressaut, l'étude porte aussi sur le rapport des hauteurs conjuguées Y qui varié en fonction de nombre de *Froude* amont F_1 et de rapport de forme M . dans cette étude les auteurs ont découvert pour la première fois, l'existence d'un rouleau du fond dont les caractéristiques ont été défini. Les cas de canal rectangulaire et triangulaire ont été aussi étudiés comme des cas extrêmes de la forme trapézoïdal, le rendement du ressaut évoluant en canal triangulaire est le meilleur par rapport à ce qui a trouvé dans ses homologues. Le ressaut contrôlé est étudié dans le deuxième axe de notre chapitre, l'étude expérimentale la plus récente de *Kateb, Debabache et Benmalek (2013)* a été examiné, les chercheurs ont conclu que le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut forcé est inférieur à celui de son homologue contrôlé, et pour le même type du ressaut, la marche positive a un effet réducteur sur la hauteur conjuguée meilleur que celui du seuil mince. Dans cette étude les auteurs ont abordé aussi la hauteur et la position relative de la marche positive, ils ont trouvé que le rendement du ressaut forcé par marche positive est supérieur à celui de son homologue contrôlé pour des valeurs du nombre du *Froude* entre 2 et 8.

Dans le troisième et le dernier chapitre de notre étude bibliographique, nous avons abordé le ressaut évoluant dans les canaux à élargissement brusque, nous avons pu diviser ce chapitre en deux axes :

Dans le premier, nous avons abordé la classification du ressaut présenté par *Bremen (1990)*. Ensuite, nous avons abordé les travaux les plus intéressants entretenus de 1960 à 1990 dans chaque type, notamment :

Les travaux de *Nosedá (1963)* et de *Rajaratnam et Subramanya (1968)* sur le ressaut repoussé ; dans les deux (02) contributions, les chercheurs ont essayé de calculer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, *Nosedá (1963)* a divisé l'écoulement à l'aval de la section élargie en deux zones, son approche consiste à calculer le nombre de *Froude* pour chaque zone, puis les injectés dans l'équation de *Bélanger (1928)*. Quant à *Rajaratnam et Subramanya (1968)*, ils ont pu trouver une relation entre le nombre de *Froude* F_1' juste avant le pied du ressaut d'une part avec le nombre de *Froude* amont F_1 à la section élargie et le taux d'élargissement β d'autre part, cette relation est introduite par la suite dans l'équation de *Bélanger (1928)* pour calculer le rapport des hauteurs conjuguées.

Les travaux de *Unny (1960)* et de *Herbrand (1973)* sur le ressaut spatial ; dans la première contribution *Unny (1960)* a conduit une étude expérimentale et théorique a la lumière de la théorie de turbulence, il a pu quantifier les coefficients de correction de la quantité de mouvement. A propos de la contribution de *Herbrand (1973)*, son modèle expérimental est de

géométrie symétrique, en appuyant sur des hypothèses simplificatrices, il a éliminé la contribution des forces de pression latérale, par la suite il a proposé une relation théorique du rapport des hauteurs conjuguée très simple, dans laquelle l'effet de nombre de *Froude* F_1 est introduit par l'équation de *Bélanger (1928)* qui est multiplié par le taux d'élargissement.

Les travaux de *Sharma (1964)* sur le ressaut de transition, il a conduit leur expérience dans un modèle à géométrie asymétrique, ces résultats sont similaires à ceux obtenus par *Unny (1960)*.

Enfin, nous avons consacré la fin de ce chapitre aux travaux entretenus de 1990 à 2015, nous avons pu présenter en détail l'étude conduite par *Bremen et Hager (1993)* qui porte sur le ressaut de transition dans un canal rectangulaire brusquement élargi, l'étude vise à définir l'ensemble des caractéristiques de tel ressaut, l'effet de la position relative du pied du ressaut et de taux d'élargissement a été combiné en un seul paramètre. Par la suite des relations semi-empiriques ont été proposées pour le calcul du rapport des hauteurs conjuguées, les longueurs caractéristique du ressaut et son rendement. Les auteurs ont abordé le problème de l'asymétrie de l'écoulement et ils ont proposé un paramètre vise à quantifier le degré de l'asymétrie. En outre le travail expérimental de *Zare et Doering (2011)* a été analysé, les auteurs ont étudié le ressaut forcé par seuil sous un élargissement brusque, ils ont défini la meilleure hauteur et position du seuil qui donne au bassin d'amortissement la meilleure efficacité. Plus récemment *Scorzini et al (2015)*, ont étudié l'effet d'un système des poutres en travers installés au milieu de bassin d'amortissement sur le comportement du ressaut.

A travers notre étude bibliographique, nous avons constaté que le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire brusquement élargi a connu une très large contribution, aucune de ces contributions n'a étudié le ressaut en canal trapézoïdal brusquement élargi en rectangulaire, plus loin dans notre travail, ce type de ressaut sera étudié par la voie expérimentale, des relations empiriques servant à dimensionner le bassin d'amortissement seront proposées.

Deuxième partie

ÉTUDE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE

L'étude expérimentale entamée a comme but de comprendre le comportement du phénomène du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal brusquement élargi en rectangulaire.

Le ressaut hydraulique dans des canaux à élargissement brusque a connu une contribution assez forte durant des décennies passées. Surtout à cause de son efficacité dans la dissipation d'énergie relativement au ressaut dit classique.

Les travaux les plus récents dans le domaine du ressaut spatial sont ceux de *Unny (1960)*, *Macha (1963)* et *Herbrand (1973)* ; de *Noseda (1963)*, *Rajaratnam et Subramanya (1968)* dans le ressaut repoussé. Concernant le ressaut de transition, nous avons cité les travaux de *Sharma (1964)*, *Bremen (1990)*, *Hager et Bremen (1993)*. Ces auteurs ont étudié le ressaut hydraulique en canal rectangulaire brusquement élargi, alors que le cas du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal brusquement élargi n'a pas fait l'objet d'étude pour ces chercheurs. Cette considération nous à encourager à faire le pas pour aborder cette étude, en se basant toujours sur les travaux et les résultats obtenus par nos prédécesseurs.

La deuxième partie de notre étude, consiste à analyser expérimentalement les caractéristiques du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal à angle d'inclinaison des talus de 73° brusquement élargi en rectangulaire, à savoir.

L'objet principal de notre contribution est de déterminer expérimentalement des relations fonctionnelles liant les différents paramètres du ressaut hydraulique.

Cette partie sera divisée en deux grands chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à la description du modèle expérimental utilisé pour entamer l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal à angle d'inclinaison des talus de 73° brusquement élargi en rectangulaire.
- Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude expérimentale des caractéristiques du ressaut hydraulique où il sera question d'analyser les résultats obtenus et de déterminer des relations fonctionnelles en termes adimensionnels liant les différents paramètres obtenus.

Chapitre I

**DESCRIPTION DU MODELE
EXPERIMENTAL**

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, il sera présenté le modèle expérimental utilisé et les appareils de mesure ainsi que le protocole expérimental suivi.

I.2. Description du modèle

I.2.1. Description du canal

Le model expérimental présenté dans la figure 1.1 est constitué d'un bassin d'alimentation et d'un canal de mesure (figure 1.2) de section trapézoïdal brusquement élargie en rectangulaire de pente nulle. La première partie trapézoïdale symétrique, dont les parois en plexiglas inclinées de $\alpha = 73^\circ$, est d'une longueur $L_{trp}=4m$ et de largeur de base $b_1= 0,2m$. La deuxième partie rectangulaire en verre d'une longueur $L_{rec}= 7m$ et de largeur $b_2= 0,6m$. L'alimentation de ce canal est assurée à partir du bassin d'alimentation, en utilisant une pompe débitant jusqu'à 40l/s. Cette dernière refoule dans une conduite circulaire en PVC de diamètre $D = 115mm$ (figure1.3), reliée à une boîte en charge dans laquelle est insérée une ouverture en tôle de forme convergente débouchant dans le canal de mesure (figure1.5 et 16), le rôle de l'ensemble de ces accessoires est de générer un écoulement incident à grande vitesse. Une vanne de régulation de débit est installée juste devant la pompe.

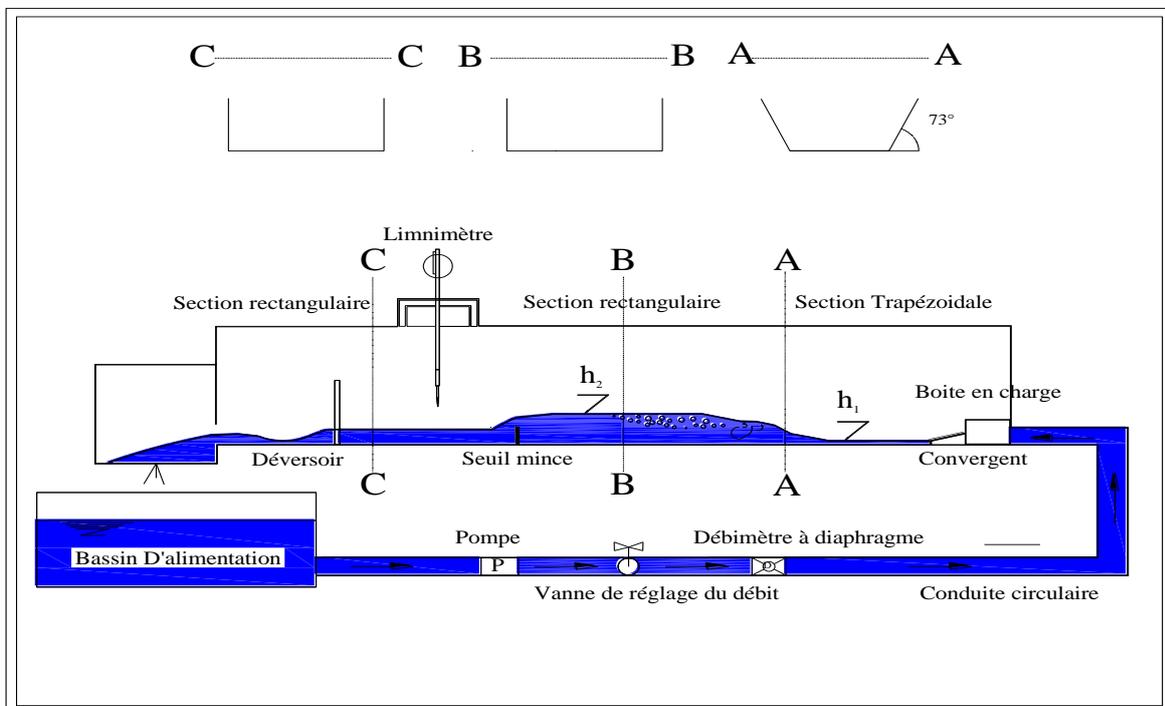


Figure 1.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal, ayant servi à l'expérimentation.



Figure 1.2 : Photographie du modèle expérimental



Figure 1.3 : Pompe centrifuge et vanne de régulation du débit



Figure 1.4 : Photographie du déversoir sans hauteur de pelle avec contraction latérale

La partie rectangulaire est menée d'un dispositif permettant l'installation des seuils à parois mince d'épaisseur de 2 mm et de largeur égale à celle du canal en aval soit $b_2 = 0,6$ m, ce dispositif est installé 3m après le point de l'élargissement (figure 1.7). L'extrémité aval de la même partie du canal est équipée d'un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale (figure 1.4), permettant la mesure de la hauteur d'eau déversante (h_{dev}).



Figure 1.5 : Photographie d'une boîte en charge



Figure 1.6 : Photographie d'une série de convergent.

Ce canal est bien adapté aux méthodes de mesures que nous avons souhaité employer au cours de notre étude. En effet, pour provoquer la formation du ressaut, 14 seuils en mince parois de forme rectangulaire conçus en plaques métalliques ont été préparés et utilisés. La hauteur de ces seuils est variable :

$$S \text{ (cm)} = 6 ; 7 ; 8 ; 9 ; 10 ; 11 ; 12 ; 13 ; 14 ; 15 ; 16 ; 17 ; 18 ; 19.$$



Figure 1.7 : Photographie des seuils utilisés dans l'expérimentation

I.3. Appareillage de mesure :

I.3.1. Mesure des hauteurs (Limnimètre)

Les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été évaluées par un limnimètre, L'instrument est formé d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnimétrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau (figure 1.8).

La lecture sur le limnimètre s'effectue en deux étapes : on procède d'abord à la lecture de la graduation sur la règle, située immédiatement en haut de zéro du vernier, puis on effectue la lecture du nombre de cinquantième en face de la division qui coïncide ou qui est la plus rapprochée d'une division de la règle. L'erreur de mesure de cet instrument est $\pm 1.5\text{cm}$.

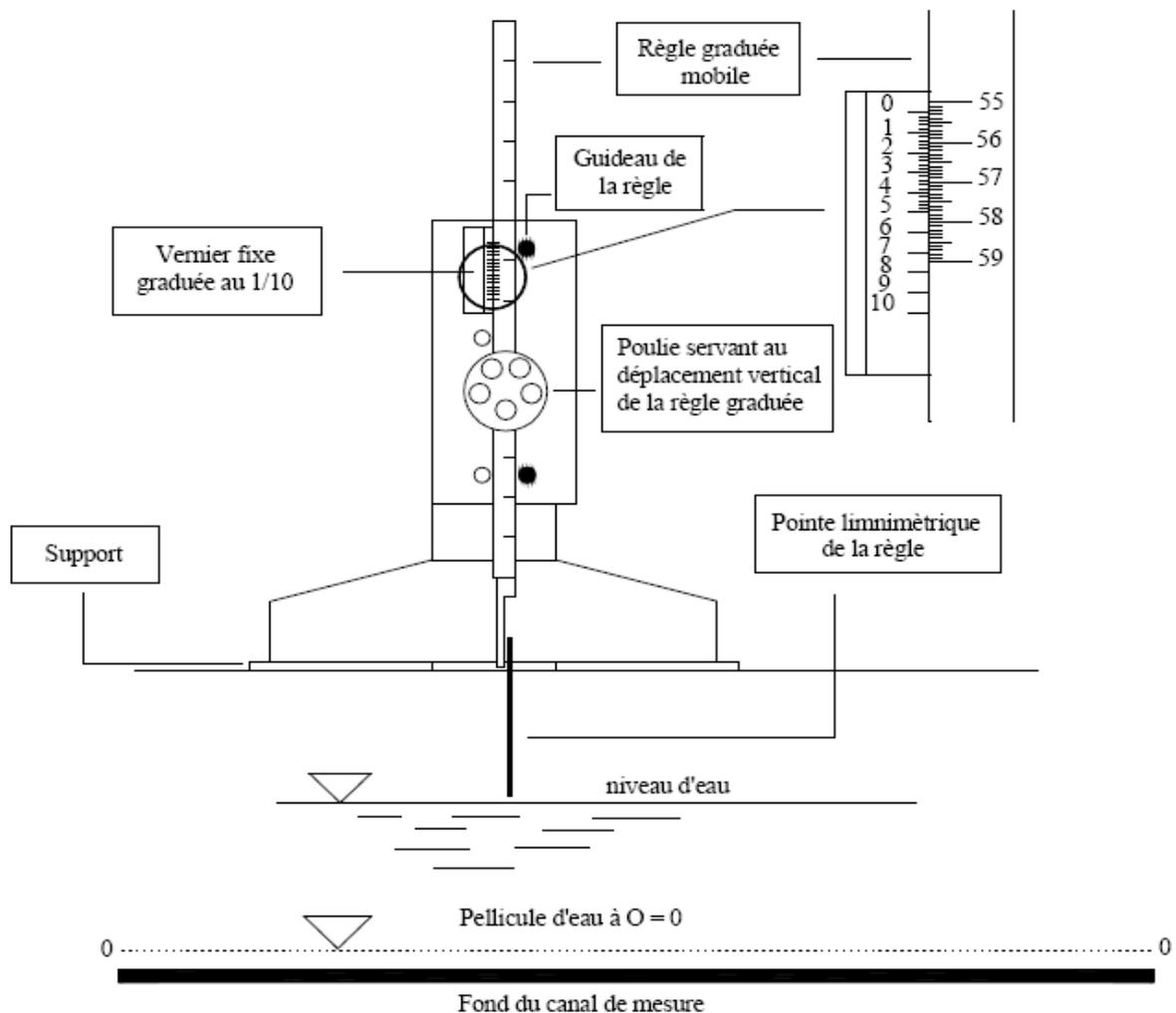


Figure 1.8 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique

1.3.2. Mesure de débit (déversoir)

La mesure de débit volume est faite en injectant la hauteur de la lame d'eau h_{dev} , traversant le déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale qui est relié à la fin de la seconde partie du canal. Ce dernier est réalisé et testé par *Hachemi Rachedi*. (2006). En effet, le débit volume est obtenu par l'application de l'équation (5.1) du déversoir :

$$Q = 0.3794b\sqrt{2g\beta}(1 + 0.16496\beta^{2.0716})^{3/2}h_{dev}^{3/2}$$

Avec : $\beta = b/B$

Q : Le débit en (m³/s)

B : La largeur du canal en (m) (B=0.6m)

g : L'accélération de la pesanteur (m³/s) ;

β : Rapport de forme ($\beta = 0.44$) ;

b : Largeur de l'échancrure en (m) ; (b=0.22m)

h : La hauteur de la lame d'eau en (m)

La condition d'application de cette relation est : $\beta < 0.45$

1.3.3. Mesure des longueurs (ruban gradué)

Les mesures de la position du pied de ressaut par rapport à l'élargissement X_1 , des longueurs caractéristiques du ressaut (L_j , L_r) et les coordonnées longitudinales de profil de surface sont faites tout simplement par la lecture directe sur un ruban gradué collé sur le canal selon le sens d'écoulement.

1.4. Description des essais

Les essais effectués au laboratoire ont porté sur le ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal brusquement élargi en rectangulaire. L'expérimentation est conduite sous cinq ouvertures qui ont données naissance à une large gamme de nombres de Froude de l'écoulement incident F_1 $2,09 \leq Fr \leq 10,5$.

Afin de contrôler l'évolution des paramètres du ressaut hydraulique dès son apparition complète dans le canal trapézoïdal jusqu'à la disparition de celui-ci, et compte tenu des conditions extrêmes (le plus grand seuil et l'ouverture maximal de la vanne), la première

position du pied du ressaut X_1 est prise à 190cm avant le point d'élargissement, sachant que ce dernier est considéré comme une référence longitudinal.

Le pas de X_1 est de 10cm, de ce fait 19 positions du pied du ressaut ont été obtenues, en considération du couple Q et S.

Quatorze seuils de hauteur varient entre 6 et 19cm ont été préparés et testés, les valeurs de débit volume sont variées entre 14 et 29 l/s.

Une fois le seuil est fixé, la vanne sera ouverte de telle façon que le pied du ressaut soit placé à la première position, soit ($X_1 = 190\text{cm}$), les différentes hauteurs ($h_1, h_2, h_g, h_d, h_{dev}$) sont mesurées, les longueurs caractéristiques du ressaut et son rouleau (L_j, L_r) sont observées.

Par la suite, l'ouverture de la vanne sera augmentée afin de pousser le ressaut à la deuxième position dans le sens de l'écoulement, les paramètres signalés précédemment seront mesurées, cette manœuvre sera répétée jusqu'à ce que la dernière position sera atteinte, un nouveau seuil est placé, et l'opération recommence pour les autres seuils.

Les paramètres mesurés auparavant servent à composer les produits adimensionnels suivant : $Y = (h_2/h_1), F_1, S = s/h_1, L_j/h_1, L_r/h_1, Y_g = h_g/h_1, Y_d = h_d/h_1, X_i = X_1/L_j \text{ ref.}$

La longueur de référence du ressaut $L_{j\text{ref}}$ est obtenue pour chaque seuil sous les cinq ouvertures, c'est la longueur avec laquelle le rapport d'occupation $X_i = 1$.

I.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description du modèle expérimental, de l'appareillage de mesure utilisé et de la description des essais.

Premièrement, le modèle expérimental et son fonctionnement est décrit en détail et illustré par des schémas et des photographies.

Deuxièmement, les appareils de mesure ont été décrits. Le mode d'emploi de ces instruments est clarifié en s'appuyant sur des schémas et des photographies.

Finalement, il a été abordé la procédure expérimentale et les techniques utilisées dans la prise des mesures de différents paramètres du ressaut.

Chapitre II

ETUDE EXPERIMENTALE

II.1. Introduction

A ce stade de travail, l'étude consiste à la description et l'analyse des différentes possibilités de l'existence des relations entre différentes grandeurs mesurées du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal brusquement élargi en rectangulaire.

La formation du ressaut contrôlé est conditionnée par la mise en place de seuils à l'aval de l'écoulement. Les différentes configurations de ressaut peuvent être envisagées en ajustant la vanne de réglage du débit et par conséquent le nombre de *Froude* amont F_1 . Cette manœuvre provoque le déplacement du ressaut vers l'aval.

La présentation graphique nous permettra en outre de voir l'évolution des caractéristiques du ressaut, et par conséquent, l'obtention des résultats.

Ce chapitre nécessite deux grands axes : le premier sera consacré à la description de l'écoulement et le second se préoccupera de l'analyse des résultats expérimentaux.

II.2. Description de l'écoulement

La figure (2.1) montre que le canal peut être divisé en trois parties, la première partie est le canal trapézoïdal prismatique qu'on peut aussi l'appeler le canal d'aménage, la deuxième partie est le point d'élargissement qui indique la transition entre la géométrie prismatique et non-prismatique, ce point sera utilisé comme position de référence pour différentes longueurs mesurées, et la troisième partie est le canal élargi rectangulaire. En raison de la géométrie non prismatique du canal, plus les paramètres initiaux du ressaut comme la hauteur amont h_1 , et le nombre de *Froude* F_1 , la position du pied du ressaut joue un rôle très significatif.

Les observations de l'expérimentation montrent que le ressaut hydraulique étudié suit trois configurations principales :

La figure (2.1) représente les principales caractéristiques du ressaut hydraulique formé complètement dans le canal trapézoïdal, la forme du pied du ressaut est perpendiculaire au sens de l'écoulement ; d'une façon générale le ressaut est stable et symétrique. La longueur du ressaut est un peu facile à distinguer et elle est prise à la section où la majorité des bulles d'air est disparue. (Figure 2.2. a et b).

L'augmentation du débit pousse le pied du ressaut vers l'aval (figure 2.3) et provoque une légère modification dans les hauteurs des deux zones de décollement droite et gauche. La forme du pied du ressaut est perturbée par les courants d'eau dans les deux côtés des parois du canal et

elle prend parfois l'allure de la lettre « V ». Le ressaut est encore stable avec une légère tendance à l'écoulement asymétrique, traduit par un écoulement en retour. (Figure 2.4. a et b). Une augmentation supplémentaire du débit provoque le déplacement du pied de ressaut vers l'aval, l'écoulement devient asymétrique (figure 2.5), le pied du ressaut se trouve oblique (figure 2.7) et l'écoulement se décompose en deux régions, l'une au sens de l'écoulement (région une (1) dans la figure 2.6.a.b) et l'autre au sens inverse (région deux (2) dans la même figure). La zone de décollement droite est presque vide, néanmoins celle de gauche se trouve remplie par l'eau en retour. Une simple observation nous a montré que la longueur de ce type de ressaut est plus grande que celles remarquées dans les configurations précédentes. (figure 2.8).

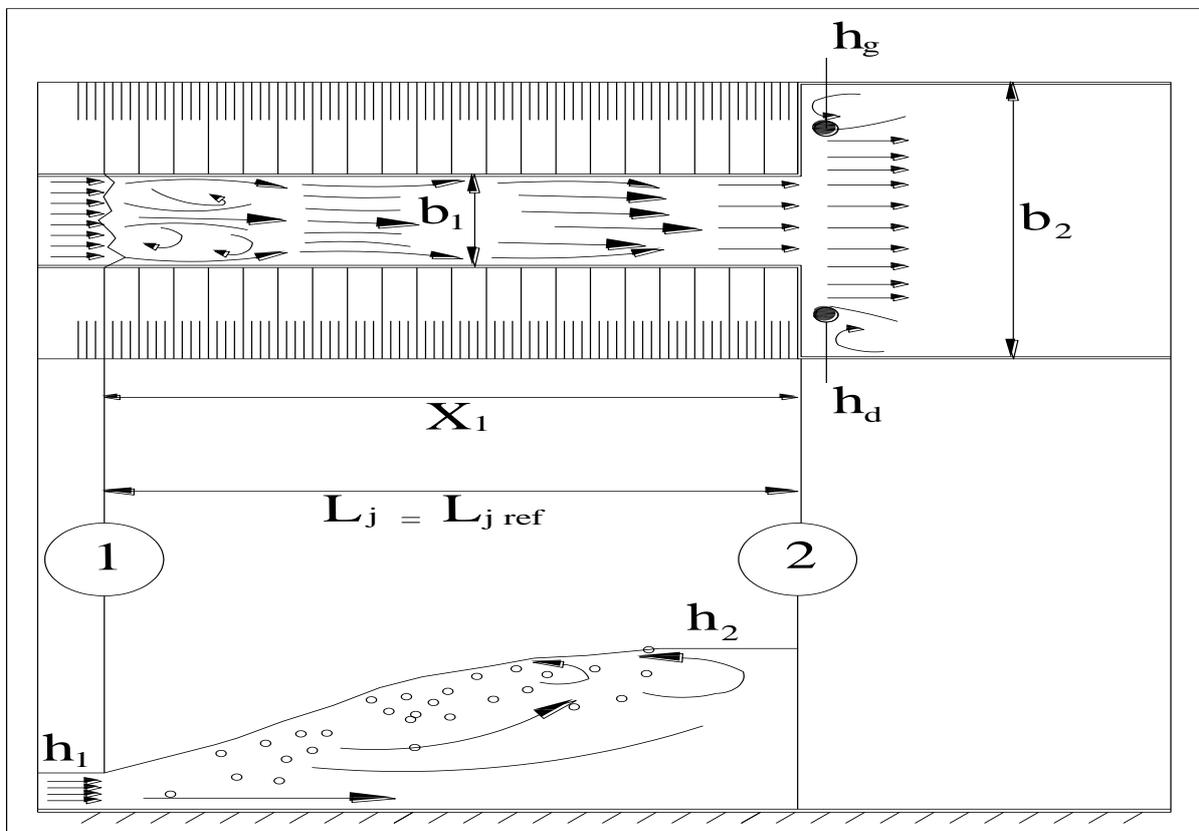


Figure 2.1 : Les principales caractéristiques mesurées du ressaut formé complètement dans le canal trapézoïdal.



Figure 2.2 : Photographies du ressaut formé complètement dans le canal trapézoïdal ; a) selon le sens de l'écoulement ; b) au sens inverse à l'écoulement

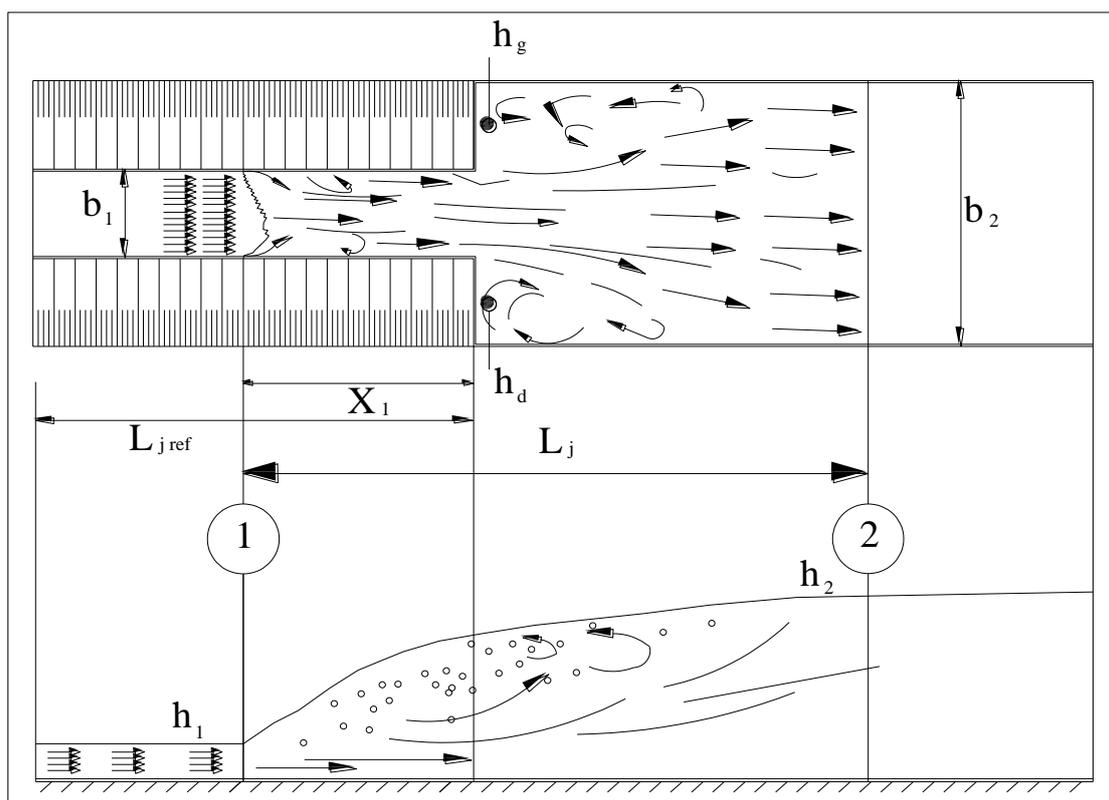


Figure 2.3 : Les principales caractéristiques mesurées du ressaut formé partiellement dans le canal trapézoïdal (ressaut de transition).

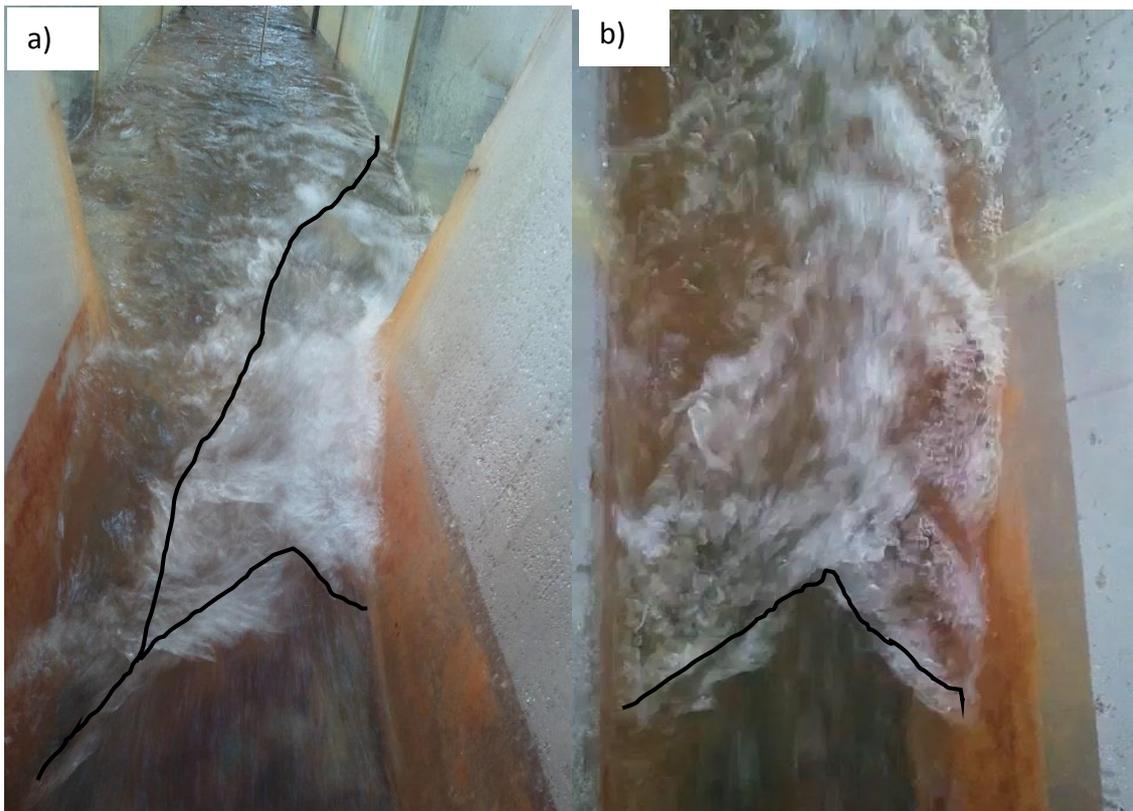


Figure 2.4 : Photographies du ressaut formé partiellement dans le canal trapézoïdal (ressaut de transition) ; a) illustration à la tendance à l'écoulement asymétrique ; b) forme du pied du ressaut

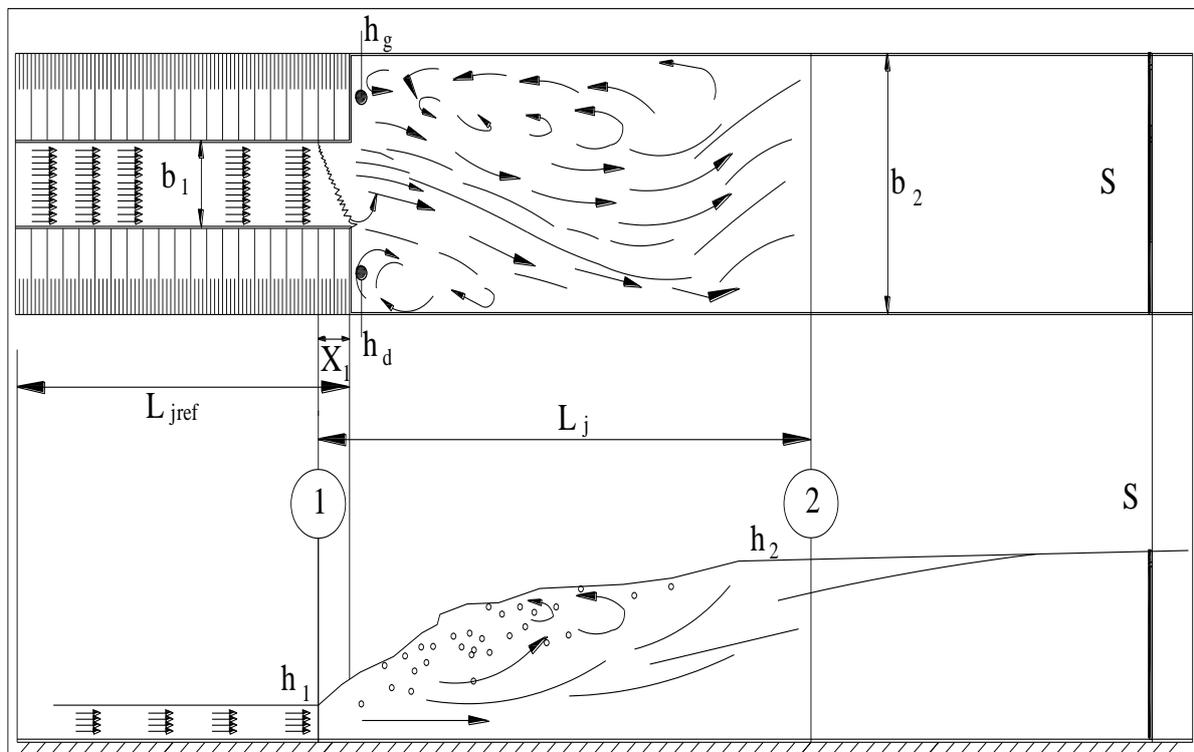


Figure 2.5 : Les principales caractéristiques mesurées du ressaut dont le pied est situé à la section élargie (ressaut spatial).

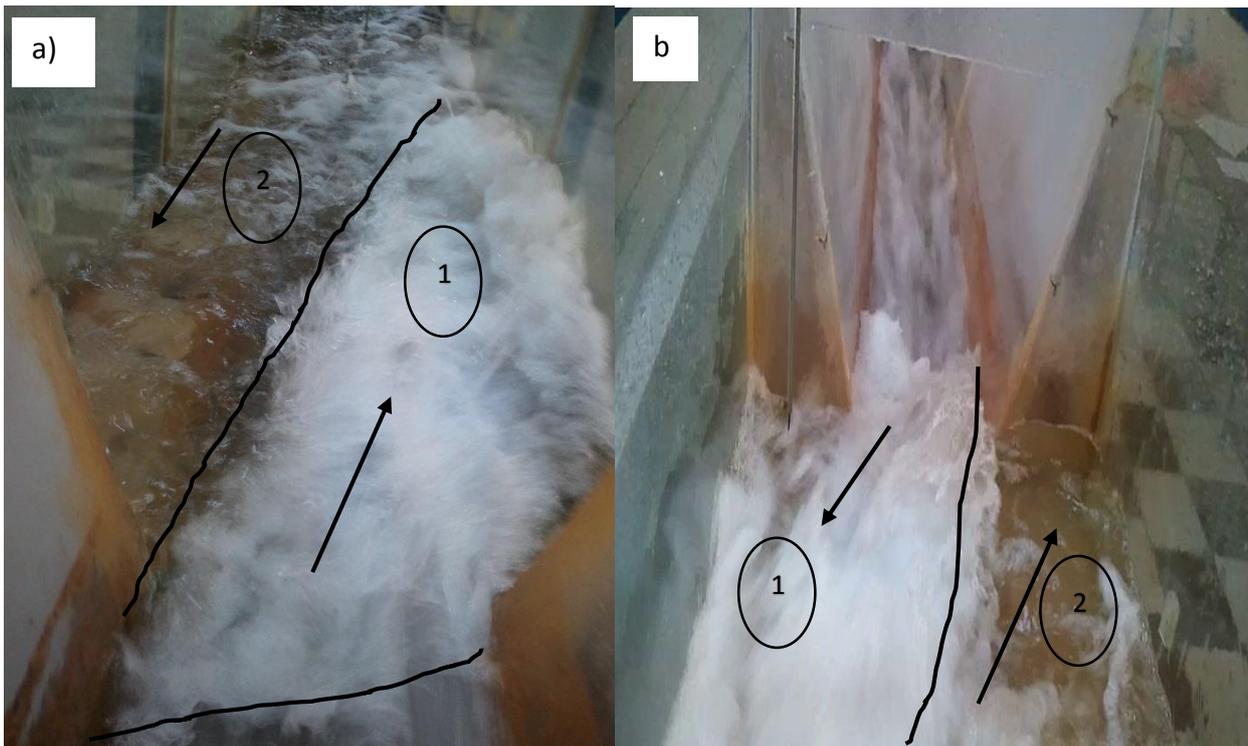


Figure 2.6 : Photographies du ressaut dont le pied est situé à la section élargie (ressaut spatial) ; a) photographie selon le sens d'écoulement ; b) au sens inverse à l'écoulement. Région 1 avec le sens d'écoulement ; 2 inverse au sens d'écoulement.



Figure 2.7 : Photographie de la forme oblique du pied du ressaut



Figure 2.8 : Photographie de l'ensemble du phénomène

II.3. Analyse des résultats expérimentaux

II.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

A la base de l'analyse bibliographique, on peut conclure que le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal brusquement élargi dépend en particulier de deux paramètres suivants :

- Le nombre de *Froude* amont F_1
- Le rapport d'occupation $X_i = X_1/L_{j \text{ ref.}}$

La représentation graphique des résultats expérimentaux des paramètres de la fonction $Y = f(F_1, X_i)$, est donnée par la figure (2.9). Cette figure évoque la variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de *Froude* de l'écoulement incident F_1 pour des intervalles de rapport d'occupation X_i allant de 0 jusqu'à 1, le pas de ces intervalles est de 0,2.

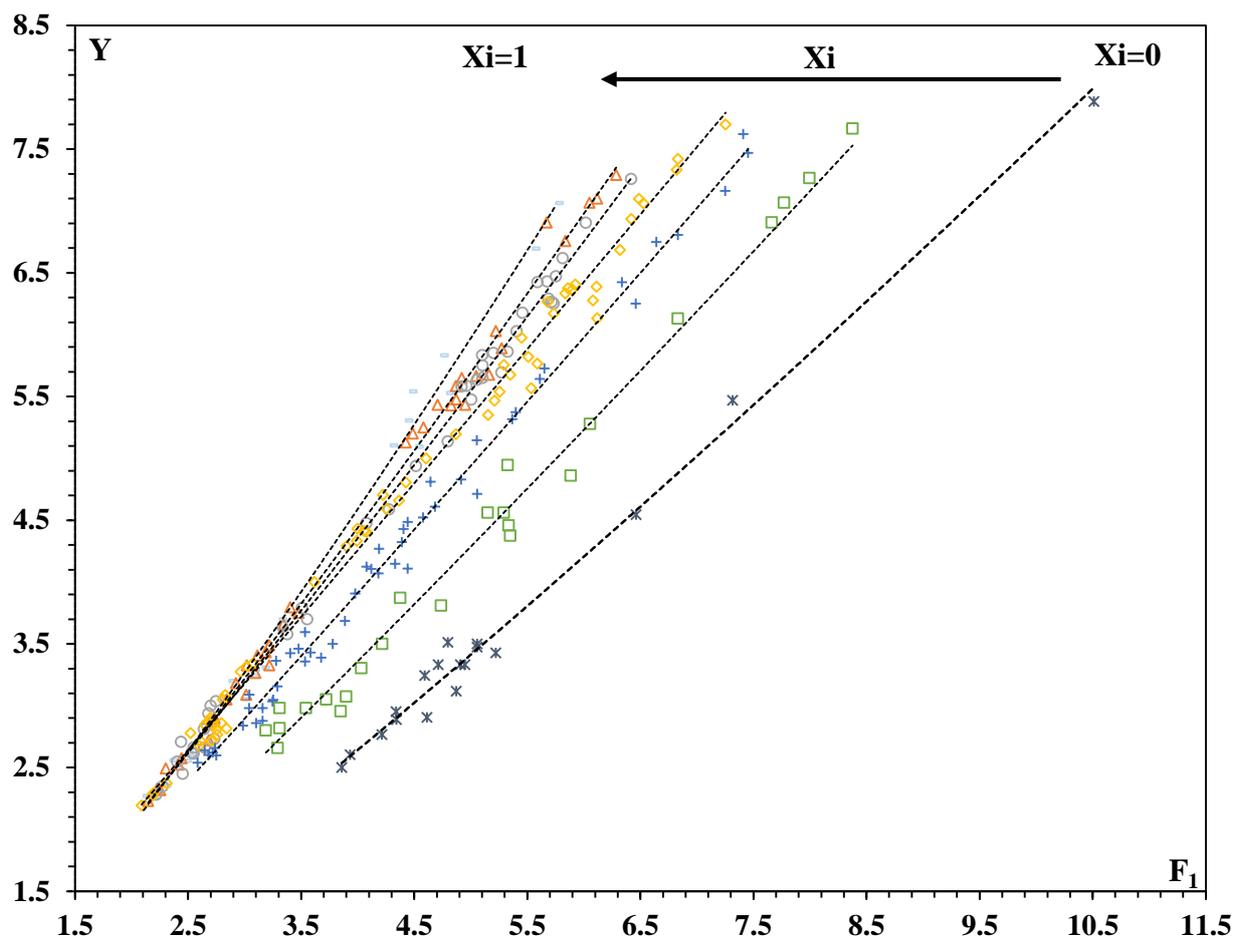


Figure 2.9 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre du Froude F_1 , pour des intervalles de rapport d'occupation X_i (où) $X_i=0$, (\square) $0 \leq X_i \leq 0,2$; (+) $0,2 \leq X_i \leq 0,4$; (\diamond) $0,4 \leq X_i \leq 0,6$; (\circ) $0,6 \leq X_i \leq 0,8$; (Δ) $0,8 \leq X_i \leq 1$; (-) $X_i=1$, (---) courbe d'ajustement

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la courbe $Y = f(F_1)$ est donné par le tableau 2.1 :

Tableau 2.1 : Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $Y = f(F_1, X_i)$.

$X_i=1$		$0,8 \leq X_i < 1$		$0,6 \leq X_i \leq 0,8$	
Y_{exp}	F_1	Y_{exp}	F_1	Y_{exp}	F_1
2,63	2,48	6,03	5,22	2,62	2,53
2,59	2,52	5,13	4,43	2,55	2,40
3,25	3,06	6,91	5,67	3,03	2,75
3,31	3,16	3,26	3,10	2,94	2,68
5,11	4,29	3,33	3,22	3,79	3,51
2,35	2,29	3,43	3,19	5,86	5,33
2,27	2,11	3,33	3,02	5,83	5,10
3,05	2,99	3,80	3,40	2,45	2,45
7,06	5,75	5,20	4,49	2,81	2,64
5,54	4,46	2,33	2,23	6,90	6,02
3,29	3,07	2,88	2,70	5,59	4,96
3,20	2,87	3,09	3,01	7,26	6,42
3,70	3,31	5,67	5,05	5,65	5,11
2,25	2,18	3,66	3,34	3,70	3,56
2,56	2,34	2,72	2,68	5,14	4,80
2,56	2,46	2,52	2,42	6,29	5,69
5,09	4,52	2,58	2,44	5,69	5,27
3,62	3,31	2,49	2,30	2,28	2,22
5,53	4,79	5,43	4,95	2,66	2,65
5,31	4,43	3,41	3,11	2,61	2,55
6,69	5,55	5,68	5,16	6,25	5,73
5,83	4,74	5,43	4,71	6,47	5,75
		2,23	2,15	5,58	4,92
		7,07	6,05	6,62	5,81
		5,43	4,83	5,63	5,06
		3,18	2,92	6,42	5,59
		3,05	2,84	5,75	5,11
		7,29	6,29	2,73	2,73
		2,32	2,25	2,66	2,55
		2,88	2,73	3,00	2,70
		2,90	2,74	4,48	4,08
		3,75	3,48	3,64	3,34
		5,89	5,27	4,94	4,52
		5,65	4,92	3,58	3,38
		5,25	4,58	4,59	4,28
		3,49	3,22	2,35	2,28
		7,10	6,12	2,84	2,67
		5,59	4,87	2,71	2,44
		6,76	5,84	5,47	5,01
		5,48	4,87	6,26	5,72
				6,43	5,68
				5,85	5,20
				6,18	5,46
				6,03	5,41

Tableau 2.1 : Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $Y=f(F_1, X_i)$. (Suite)

$0,4 \leq X_i \leq 0,6$				$0,2 \leq X_i \leq 0,4$	
Y_{exp}	F_1	Y_{exp}	F_1	Y_{exp}	F_1
4,71	4,22	7,33	6,82	4,43	4,41
3,34	3,07	5,68	5,35	4,32	4,39
6,28	6,08	4,81	4,42	3,46	3,48
4,66	4,37	4,40	4,08	3,43	3,40
4,41	4,06	6,41	5,92	3,60	3,54
2,19	2,09	5,35	5,15	3,09	3,04
3,09	2,83	6,69	6,32	7,62	7,41
7,42	6,83			3,36	3,28
6,26	5,68			5,73	5,65
5,57	5,53			3,69	3,89
6,38	5,86			3,05	3,25
6,17	5,73			2,84	2,99
2,29	2,19			2,86	3,10
2,85	2,65			2,88	3,16
2,78	2,52			3,91	3,98
2,77	2,76			2,98	3,04
2,68	2,60			5,15	5,05
6,94	6,42			5,38	5,40
2,85	2,73			6,81	6,83
2,82	2,84			5,64	5,61
2,71	2,71			6,25	6,46
7,70	7,25			4,49	4,44
5,47	5,21			4,27	4,19
3,32	3,02			4,83	4,92
4,60	4,25			3,50	3,78
5,00	4,61			2,66	2,74
4,33	3,99			2,62	2,72
6,33	5,84			2,60	2,68
5,76	5,59			4,11	4,12
7,10	6,49			4,13	4,08
5,82	5,51			7,47	7,45
5,20	4,87			2,60	2,75
3,05	2,81			2,64	2,65
2,38	2,31			2,54	2,58
2,88	2,70			4,15	4,33
2,90	2,70			4,11	4,44
2,87	2,68			3,43	3,58
7,06	6,53			3,36	3,54
5,98	5,45			4,52	4,58
5,76	5,29			4,61	4,68
2,86	2,79			6,75	6,64
2,71	2,61			7,16	7,25
2,81	2,75			6,42	6,34
4,43	4,00			3,39	3,68
4,00	3,62			3,16	3,29
3,28	2,97			2,98	3,16
6,13	6,12			3,04	3,25
4,29	3,90			4,81	4,64
6,36	5,90			4,07	4,18
5,54	5,26			5,32	5,37
2,27	2,18			4,71	5,06

Tableau 2.1 : Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $Y=f(F_1, X_i)$. (Suite et fin)

$0,0 \leq X_i \leq 0,2$		$X_i=0,0$	
Y_{exp}	F_1	Y_{exp}	F_1
4,46	5,34	3,33	4,95
3,30	4,03	3,51	4,80
2,66	3,29	3,33	4,71
2,98	3,54	3,24	4,59
2,82	3,31	2,89	4,34
7,67	8,38	2,77	4,22
3,50	4,22	3,33	4,91
6,13	6,83	2,95	4,34
7,07	7,77	3,48	5,06
4,94	5,33	2,50	3,86
4,56	5,15	2,60	3,93
4,56	5,29	3,43	5,22
3,87	4,38	2,91	4,61
3,05	3,72	3,12	4,87
2,80	3,19	3,50	5,06
2,98	3,31	4,55	6,46
2,96	3,85	5,47	7,32
4,38	5,35	7,88	10,51
3,08	3,90		
3,81	4,74		
5,28	6,05		
7,27	8,00		
4,86	5,88		
6,91	7,66		

La répartition des courbes (figure 2.9) nous indique qu'il existe deux configurations d'écoulements différentes. Pour la première configuration, le ressaut évolue en majorité dans le canal trapézoïdal, jusqu'à $X_i = 0,4$. L'évolution des caractéristiques du ressaut sont similaires (stabilité de l'écoulement et symétrie), les limites de cette configuration sont définies en fonction du rapport d'occupation (X_i) entre $0,4 \leq X_i \leq 1$.

En deca de $X_i = 0,4$, une légère modification dans l'écoulement est constatée, au fur et à mesure que le pied du ressaut se déplace vers l'aval, la hauteur d'eau dans les deux zones de décollement gauche et droite devient inégale, cette différence devient remarquable et le caractère asymétrique sera générer, cet écoulement sera accentué jusqu'à que $X_i=0,0$.

II.3.2. Equation générale régissant le contrôle du ressaut

Pour $0,4 \leq X_i \leq 1$: la variation du Y en fonction de F_1 est proportionnelle, l'augmentation du F_1 engendre l'augmentation du Y, de même, l'augmentation du rapport d'occupation X_i provoque l'augmentation du Y, nous remarquons aussi que pour des valeurs du F_1 entre 2 et 3, la position du pied du ressaut n'a pratiquement aucune influence, au-delà de $F_1 = 3$, les courbes commence à s'éloignées les unes aux autres (figure. 2.9) et l'effet de X_i commence à se faire

sentir. Pour cet intervalle les courbes ont la même allure et l'ajustement des points expérimentaux a montré que la variation suit une loi puissance de forme :

$$Y = aF_l^b \tag{2.1}$$

Les valeurs des facteurs a et b, ainsi que les coefficients de corrélation R² sont regroupés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Valeurs des facteurs a et b de l'équation (2.1) pour des intervalles du rapport d'occupation $0,4 \leq X_i \leq 1$

Intervalle de Xi	Centre de l'intervalle de Xi	R ²	a	b
1	1	0,992	0,89	1,17
1-0,8	0,9	0,994	0,94	1,11
0,8-0,6	0,7	0,995	0,97	1,08
0,6-0,4	0,5	0,994	1,04	1,01

La variation des facteurs a et b en fonction de centre des intervalles du rapport d'occupation Xi est présenté dans la figure (2.10)

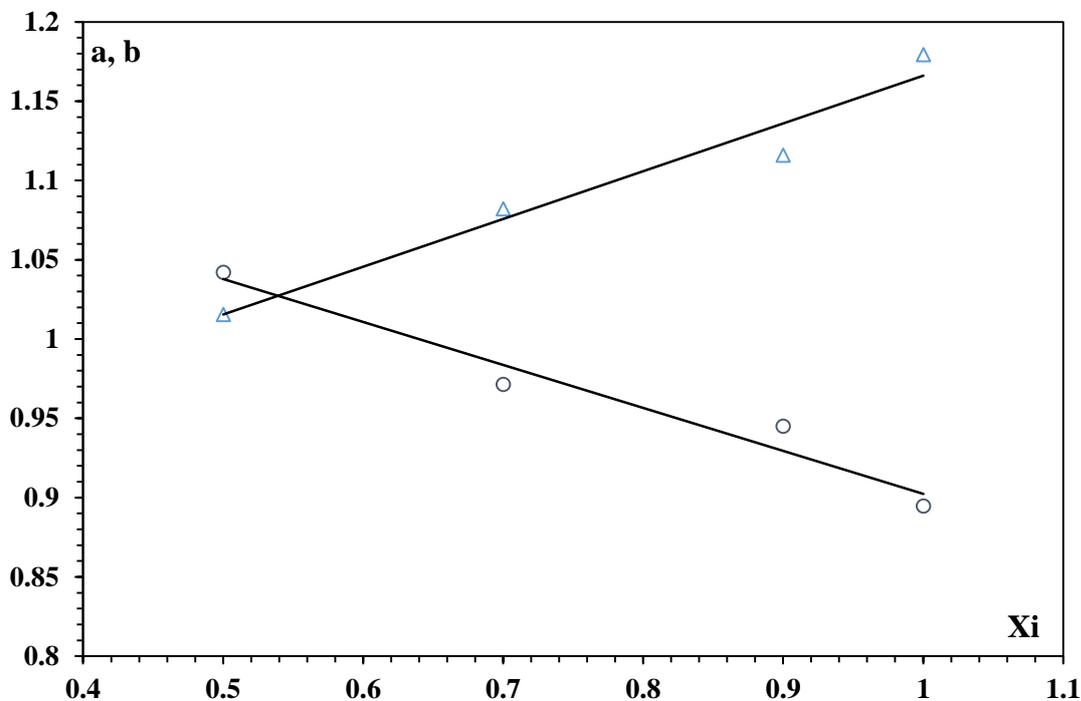


Figure 2.10 : Variation des facteurs a et b en fonction du rapport d'occupation Xi, (○) a ; (△) b, (----) courbe d'ajustement pour l'intervalle $0,4 \leq X_i \leq 1$

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrés nous a permis d'écrire :

$$a = -0,27X_i + 1,17 \tag{2.2}$$

$$b = 0,30X_i + 0,86 \tag{2.3}$$

La substitution des relations (2.2) et (3.2) dans l'équation (2.1) donne :

$$Y = (-0,27X_i + 1,17) * F_1^{0,30X_i + 0,86} \tag{2.4}$$

Les valeurs expérimentales du rapport des hauteurs conjuguées Y sont confrontées à celles de la fonction $\Psi(F_1, X_i)$ exprimée par l'équation (2.4). Les résultats rapportés dans la figure (2.11) prouvent que cette dernière relation est valable pour la détermination du Y, connaissant le nombre du *Froude* F_1 de l'écoulement incident et la position du pied du ressaut par rapport à l'élargissement.

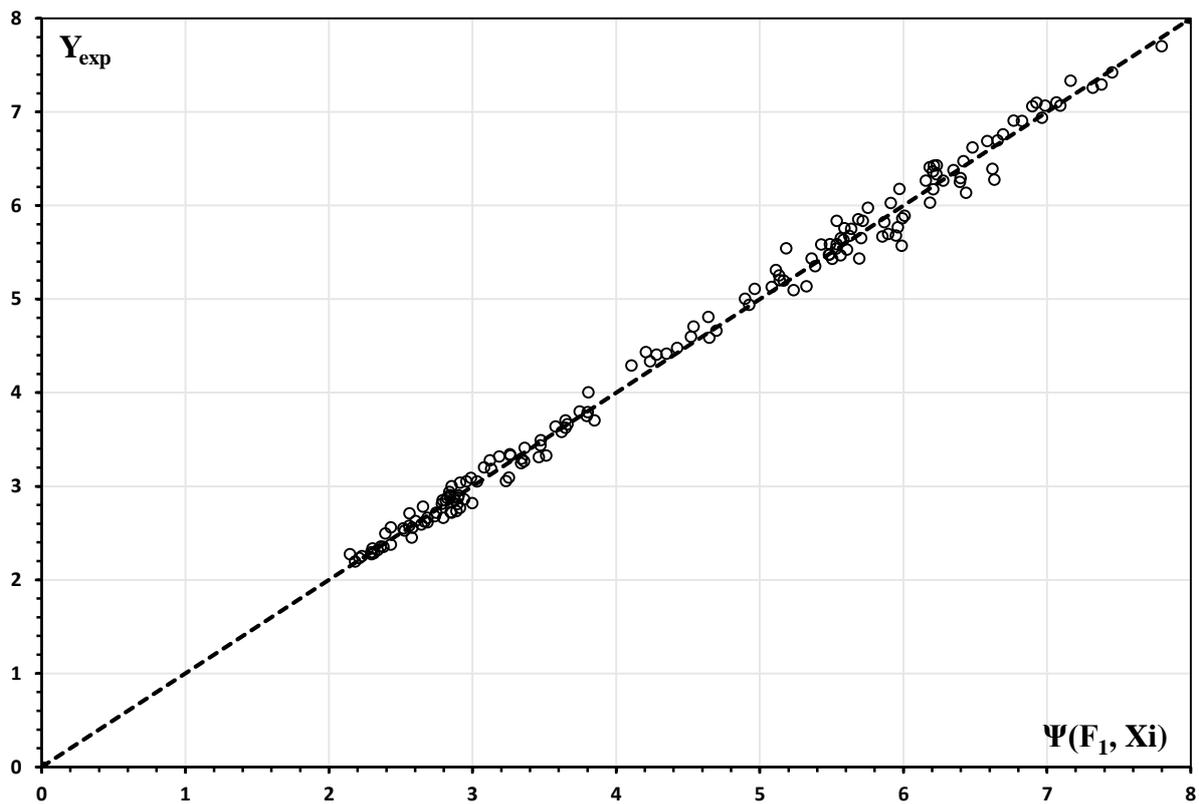


Figure 2.11 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction de $\Psi(F_1, X_i)$ exprimée par l'équation (2.4) pour $0,4 \leq X_i \leq 1$; (○) Y_{exp} du ressaut ; (---) première bissectrice

D'après le tableau ci-dessus et la figure (2.11), on remarque que 90% des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du Y et les valeurs issues de l'équation (2.4) sont inférieurs à 5%, pour le premier intervalle $0,4 \leq X_i \leq 1$.

Pour $0,0 \leq X_i \leq 0,4$: en déca de $X_i = 0,4$, l'accroissement du nombre du Froude F_1 donne naissance à l'accroissement du Y, par ailleurs, pour la même valeur du nombre de Froude F_1 , l'augmentation de X_i provoque l'augmentation du Y.

L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés à montrer que la meilleur représentation suit une loi puissance de forme :

$$Y = a' Fr^{b'} \tag{2.5}$$

Le tableau 2.3 regroupe les intervalles de X_i avec ces caractéristiques :

Tableau 2.3 : Valeurs des facteurs a' et b' de l'équation (2.5) pour des intervalles du rapport d'occupation $0,0 \leq X_i \leq 0,4$

Intervalle du X_i	Centre de l'intervalle de X_i	R^2	a'	b'
0,4-0,2	0,3	0,990	0,91	1,04
0,2-0,0	0,1	0,982	0,73	1,09
0,0	0,0	0,982	0,53	1,14

La figure (2.12) indique la variation des facteurs a' et b' en fonction de centre des intervalles du rapport d'occupation X_i

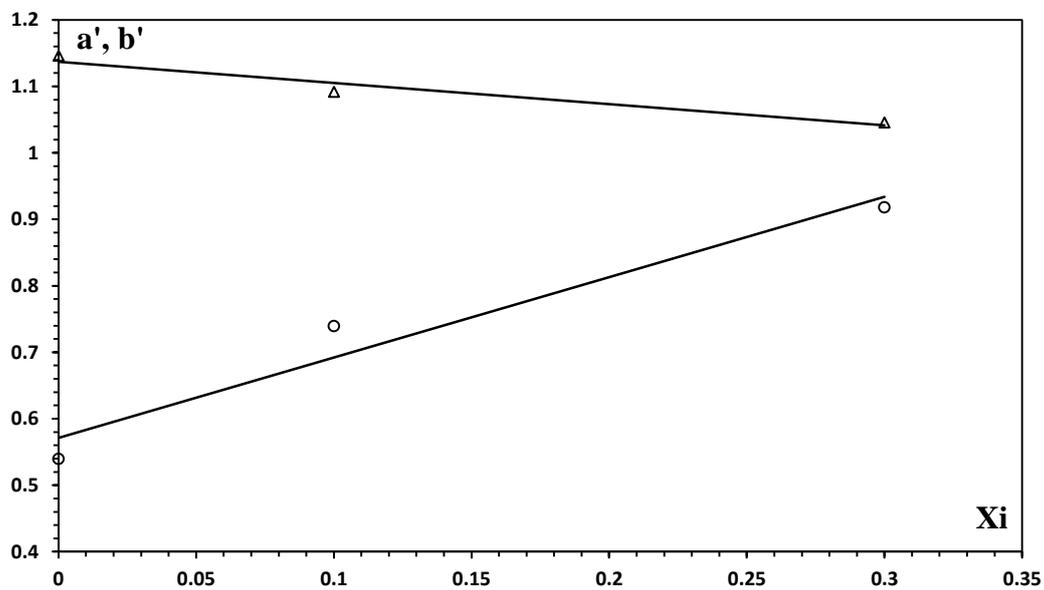


Figure 2.12 : Variation des facteurs a' et b' en fonction du rapport d'occupation X_i , (○) a' ; (△) b' , (----) courbe d'ajustement pour l'intervalle $0,0 \leq X_i \leq 0,4$

L'ajustement des points nous a permis d'écrire :

$$a' = 1,20X_i + 0,57 \tag{2.6}$$

$$b' = 0,31Xi+1,13 \tag{2.7}$$

Le remplacement des équations (2.6) et (2.7) dans l'équation (2.5) donne :

$$Y = (1,20Xi+0,57) F_1^{0,31Xi+1,13} \tag{2.8}$$

La figure (2.13) présente la variation de la fonction $f(F_1, Xi)$ exprimées par l'équation (2.8) en fonction des valeurs expérimentales du rapport des hauteurs conjuguées Y_{exp} .

La répartition des points autour de la première bissectrice montre la validité de l'équation (2.8) dans la détermination du rapport Y , tout en connaissant la position du pied du ressaut par rapport à l'élargissement et le nombre du *Froude* amont F_1 .

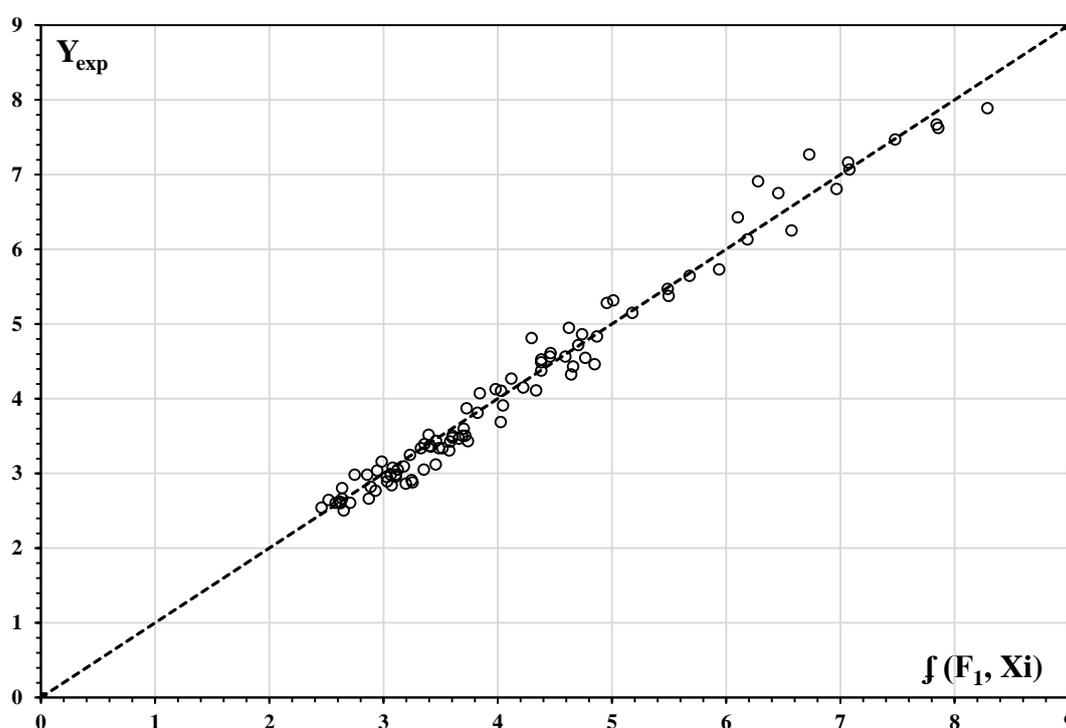


Figure 2.13 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction de $f(F_1, Xi)$ exprimée par l'équation (2.8) pour $0,0 \leq Xi \leq 0,4$; (o) Y_{exp} du ressaut ; (---) première bissectrice.

Contrairement au premier intervalle, le deuxième intervalle présente seulement 64% des écarts relatifs qui sont inférieurs à 5%.

La figure 2.14 montre que la variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ est représenté par une courbe unique, l'étant donné qu'aucune influence du rapport d'occupation Xi a été remarqué, un ajustement des couples (Y, S) par la méthode des moindres carrés linéaire, a permis d'aboutir à l'équation suivante :

$$Y = 1,08S+1,35 \tag{2.9}$$

Le coefficient de corrélation R^2 est 0,98

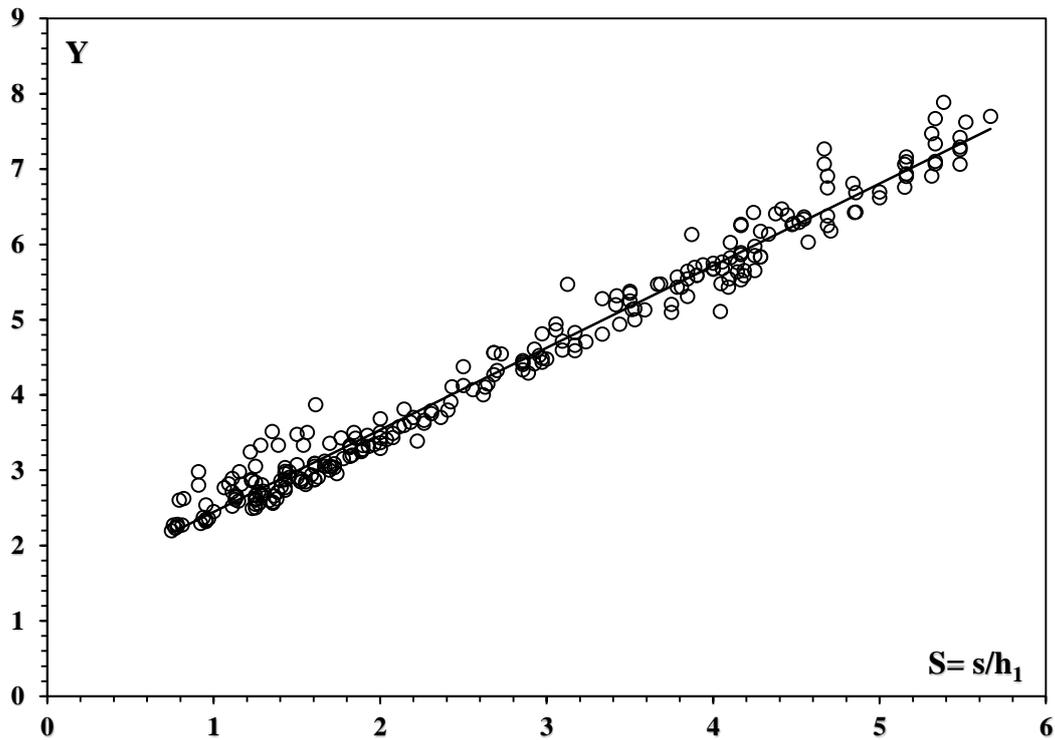


Figure 2.14 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$. (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement

Les données expérimentales qui ont servi au traçage de la fonction $Y = f(S)$, sont regroupées dans le tableau 2.4

Tableau 2.4 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $Y = f(S)$

Y_{exp}	S								
2,63	1,25	3,70	2,36	6,91	5,31	2,72	1,30	3,05	1,67
2,59	1,15	2,25	0,78	3,26	1,89	2,52	1,11	7,29	5,48
3,25	1,89	2,56	1,36	3,33	1,82	2,58	1,36	2,32	0,95
3,31	1,82	2,56	1,27	3,43	2,08	2,49	1,23	2,88	1,61
5,11	4,04	5,09	3,75	3,33	1,90	5,43	3,78	2,90	1,50
2,35	0,97	3,62	2,26	3,80	2,41	3,41	2,04	3,75	2,31
2,27	0,81	5,53	4,17	5,20	3,75	5,68	4,05	5,89	4,17
3,05	1,61	5,31	3,85	2,33	0,95	5,43	4,09	5,65	4,19
7,06	5,48	6,69	5,00	2,88	1,61	2,23	0,77	5,25	3,50
5,54	4,10	5,83	4,29	3,09	1,61	7,07	5,33	3,49	2,08
3,29	2,00	6,03	4,57	5,67	4,00	5,43	3,81	7,10	5,33
3,20	1,83	5,13	3,59	3,66	2,26	3,18	1,82	5,59	3,90

Tableau 2.4 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $Y = f(S)$ (suite)

Y_{exp}	S								
6,76	5,15	2,35	0,95	6,33	4,55	7,62	5,52	3,39	2,22
5,48	4,05	2,84	1,55	5,76	4,05	3,36	2,00	3,16	1,78
2,62	1,38	2,71	1,38	7,10	5,16	5,73	3,94	2,98	1,43
2,55	1,25	5,47	3,68	5,82	4,10	3,69	2,00	3,04	1,43
3,03	1,72	6,26	4,17	5,20	3,41	3,05	1,71	4,81	2,97
2,94	1,59	6,43	4,86	3,05	1,69	2,84	1,25	4,07	2,56
3,79	2,31	5,85	4,25	2,38	0,94	2,86	1,23	5,32	3,42
5,86	4,17	6,18	4,71	2,88	1,53	2,88	1,23	4,71	3,10
5,83	4,29	6,03	4,10	2,90	1,45	3,91	2,42	4,46	2,86
2,45	1,00	4,71	3,24	2,87	1,43	2,98	1,45	3,30	1,82
2,81	1,55	3,34	1,96	7,06	5,15	5,15	3,53	2,66	1,36
6,90	5,16	6,28	4,48	5,98	4,25	5,38	3,50	2,98	1,15
5,59	3,90	4,66	3,17	5,76	4,15	6,81	4,84	2,82	1,09
7,26	5,48	4,41	2,93	2,86	1,40	5,64	3,85	7,67	5,33
5,65	4,25	2,19	0,75	2,71	1,27	6,25	4,17	3,50	1,84
3,70	2,20	3,09	1,72	2,81	1,29	4,49	2,97	6,13	3,87
5,14	3,51	7,42	5,48	4,43	2,97	4,27	2,68	7,07	4,67
6,29	4,52	6,26	4,47	4,00	2,62	4,83	3,17	4,94	3,06
5,69	3,89	5,57	3,78	3,28	1,90	3,50	1,56	4,56	2,68
2,28	0,78	6,38	4,69	6,13	4,33	2,66	1,14	4,56	2,68
2,66	1,25	6,17	4,29	4,29	2,89	2,62	0,82	3,87	1,61
2,61	1,13	2,29	0,92	6,36	4,55	2,60	0,79	3,05	1,25
6,25	4,69	2,85	1,53	5,54	3,85	4,11	2,63	2,80	0,91
6,47	4,41	2,78	1,41	2,27	0,76	4,13	2,50	2,98	0,91
5,58	4,19	2,77	1,43	7,33	5,33	7,47	5,31	2,96	1,74
6,62	5,00	2,68	1,29	5,68	4,00	2,60	1,33	4,38	2,50
5,63	4,15	6,94	5,16	4,81	3,33	2,64	1,13	3,08	1,50
6,42	4,85	6,39	4,44	4,40	2,86	2,54	0,95	3,81	2,14
5,75	4,00	2,85	1,52	6,41	4,38	4,15	2,65	5,28	3,33
2,73	1,43	2,82	1,17	5,35	3,50	4,11	2,43	7,27	4,67
2,66	1,29	2,71	1,11	6,69	4,86	3,43	1,76	4,86	3,06
3,00	1,69	7,70	5,67	4,43	2,86	3,36	1,70	6,91	4,69
4,48	3,00	5,47	3,67	4,32	2,70	4,52	2,95	3,33	1,39
3,64	2,18	3,32	1,93	3,46	1,92	4,61	2,93	3,51	1,35
4,94	3,44	4,60	3,10	3,43	1,85	6,75	4,69	3,33	1,28
3,58	2,12	5,00	3,53	3,60	2,14	7,16	5,16	3,24	1,22
4,59	3,17	4,33	2,86	3,09	1,61	6,42	4,24	2,89	1,11

Tableau 2.4 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $Y = f(S)$ (suite et fin)

Y_{exp}	S	Y_{exp}	S
2,77	1,06	2,91	1,63
3,33	1,54	3,12	1,67
2,95	1,43	3,50	2,00
3,48	1,50	4,55	2,73
2,50	1,25	5,47	3,13
2,60	1,25	7,88	5,38
3,43	2,00		

II.3.3. Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude F_1

L’analyse des points expérimentaux a permis de discerner que la variation de la hauteur relative du seuil S dépend de :

- Le nombre du *Froude* de l’écoulement incident F_1 .
- La position du pied de ressaut représentée par le rapport d’occupation X_i .

La représentation graphique de la variation de la fonction $S = f(F_1, X_i)$ est donnée par la figure (2.15).

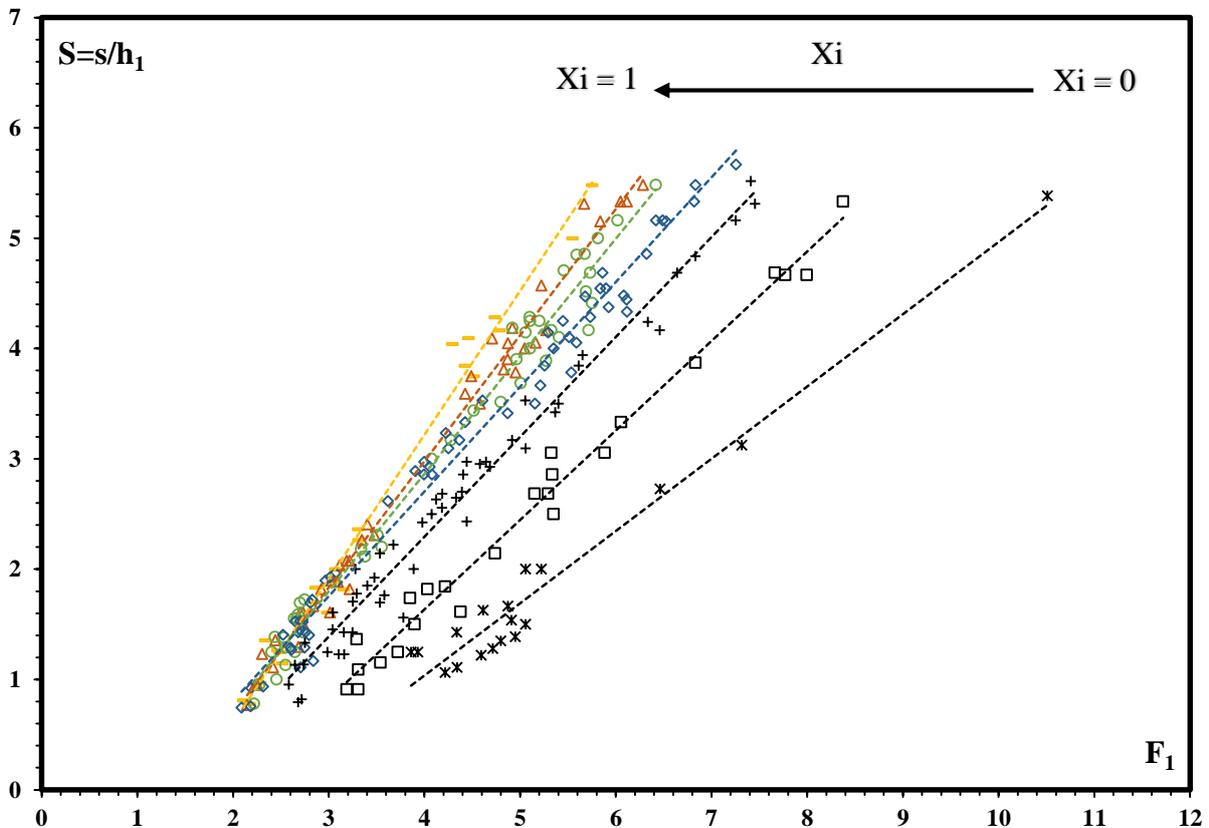


Figure 2.15 : Variation de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 , Pour des intervalles du rapport d’occupation X_i ; (\times) $X_i=0,0$, (\square) $0,0 \leq X_i \leq 0,2$; ($+$) $0,2 \leq X_i \leq 0,4$; (\diamond) $0,4 \leq X_i \leq 0,6$; (\circ) $0,6 \leq X_i \leq 0,8$; (Δ) $0,8 \leq X_i \leq 1$; ($-$) $X_i=1$, (---) courbe d’ajustement

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction $S = f(F_1, X_i)$ sont représentés sur le tableau (2.5) :

Tableau 2.5 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $S = f(F_1, X_i)$

$X_i=1$		$0,8 \leq X_i < 1$		$0,6 \leq X_i < 0,8$	
S	F_1	S	F_1	S	F_1
1,25	2,48	4,57	5,22	1,38	2,53
1,15	2,52	3,59	4,43	1,25	2,40
1,89	3,06	5,31	5,67	1,72	2,75
1,82	3,16	1,89	3,10	1,59	2,68
4,04	4,29	1,82	3,22	2,31	3,51
0,97	2,29	2,08	3,19	4,17	5,33
0,81	2,11	1,90	3,02	4,29	5,10
1,61	2,99	2,41	3,40	1,00	2,45
5,48	5,75	3,75	4,49	1,55	2,64
4,10	4,46	0,95	2,23	5,16	6,02
2,00	3,07	1,61	2,70	3,90	4,96
1,83	2,87	1,61	3,01	5,48	6,42
2,36	3,31	4,00	5,05	4,25	5,11
0,78	2,18	2,26	3,34	2,20	3,56
1,36	2,34	1,30	2,68	3,51	4,80
1,27	2,46	1,11	2,42	4,52	5,69
3,75	4,52	1,36	2,44	3,89	5,27
2,26	3,31	1,23	2,30	0,78	2,22
4,17	4,79	3,78	4,95	1,25	2,65
3,85	4,43	2,04	3,11	1,13	2,55
5,00	5,55	4,05	5,16	4,69	5,73
4,29	4,74	4,09	4,71	4,41	5,75
		0,77	2,15	4,19	4,92
		5,33	6,05	5,00	5,81
		3,81	4,83	4,15	5,06
		1,82	2,92	4,85	5,59
		1,67	2,84	4,00	5,11
		5,48	6,29	1,43	2,73
		0,95	2,25	1,29	2,55
		1,61	2,73	1,69	2,70
		1,50	2,74	3,00	4,08
		2,31	3,48	2,18	3,34
		4,17	5,27	3,44	4,52
		4,19	4,92	2,12	3,38
		3,50	4,58	3,17	4,28
		2,08	3,22	0,95	2,28
		5,33	6,12	1,55	2,67
		3,90	4,87	1,38	2,44
		5,15	5,84	3,68	5,01
		4,05	4,87	4,17	5,72
				4,86	5,68
				4,25	5,20
				4,71	5,46
				4,10	5,41

Tableau 2.5 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $S = f(F_1, X_i)$ (suite)

$0,4 \leq X_i \leq 0,6$				$0,2 \leq X_i \leq 0,4$	
S	F ₁	S	F ₁	S	F ₁
3,24	4,22	0,76	2,18	2,86	4,41
1,96	3,07	5,33	6,82	2,70	4,39
4,48	6,08	4,00	5,35	1,92	3,48
3,17	4,37	3,33	4,42	1,85	3,40
2,93	4,06	2,86	4,08	2,14	3,54
0,75	2,09	4,38	5,92	1,61	3,04
1,72	2,83	3,50	5,15	5,52	7,41
5,48	6,83	4,86	6,32	2,00	3,28
4,47	5,68			3,94	5,65
3,78	5,53			2,00	3,89
4,69	5,86			1,71	3,25
4,29	5,73			1,25	2,99
0,92	2,19			1,23	3,10
1,53	2,65			1,23	3,16
1,41	2,52			2,42	3,98
1,43	2,76			1,45	3,04
1,29	2,60			3,53	5,05
5,16	6,42			3,50	5,40
4,44	6,11			4,84	6,83
1,52	2,73			3,85	5,61
1,17	2,84			4,17	6,46
1,11	2,71			2,97	4,44
5,67	7,25			2,68	4,19
3,67	5,21			3,17	4,92
1,93	3,02			1,56	3,78
3,10	4,25			1,14	2,74
3,53	4,61			0,82	2,72
2,86	3,99			0,79	2,68
4,55	5,84			2,63	4,12
4,05	5,59			2,50	4,08
5,16	6,49			5,31	7,45
4,10	5,51			1,33	2,75
3,41	4,87			1,13	2,65
1,69	2,81			0,95	2,58
0,94	2,31			2,65	4,33
1,53	2,70			2,43	4,44
1,45	2,70			1,76	3,58
1,43	2,68			1,70	3,54
5,15	6,53			2,95	4,58
4,25	5,45			2,93	4,68
4,15	5,29			4,69	6,64
1,40	2,79			5,16	7,25
1,27	2,61			4,24	6,34
1,29	2,75			2,22	3,68
2,97	4,00			1,78	3,29
2,62	3,62			1,43	3,16
1,90	2,97			1,43	3,25
4,33	6,12			2,97	4,64
2,89	3,90			2,56	4,18
4,55	5,90			3,42	5,37
3,85	5,26			3,10	5,06

Tableau 2.5 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $S = f(F_1, X_i)$ (suite et fin) :

$0,0 \leq X_i \leq 0,2$		$X_i = 0,0$	
S	F_1	S	F_1
2,86	5,34	1,39	4,95
1,82	4,03	1,35	4,80
1,36	3,29	1,28	4,71
1,15	3,54	1,22	4,59
1,09	3,31	1,11	4,34
5,33	8,38	1,06	4,22
1,84	4,22	1,54	4,91
3,87	6,83	1,43	4,34
4,67	7,77	1,50	5,06
3,06	5,33	1,25	3,86
2,68	5,15	1,25	3,93
2,68	5,29	2,00	5,22
1,61	4,38	1,63	4,61
1,25	3,72	1,67	4,87
0,91	3,19	2,00	5,06
0,91	3,31	2,73	6,46
1,74	3,85	3,13	7,32
2,50	5,35	5,38	10,51
1,50	3,90		
2,14	4,74		
3,33	6,05		
4,67	8,00		
3,06	5,88		
4,69	7,66		

L'analyse de la présentation graphique (figure. 2.15), nous indique, comme nous l'avons déjà trouvé concernant la fonction $Y = f(F_1, X_i)$, qu'il existe ici encore deux configurations du ressaut hydraulique selon le rapport d'occupation, ces configurations sont à analyser séparément.

Pour $0,4 \leq X_i \leq 1$: la variation du S en fonction de F_1 est proportionnelle, l'augmentation du F_1 résulte l'augmentation du S, pour des valeurs du F_1 entre $2 \leq F_1 \leq 3$, la position du pied du ressaut n'a pratiquement aucune influence, l'étant donné que les courbes sont très rapprochées. Au-delà de $F_1 = 3$, les courbes commencent à s'éloigner les unes des autres (figure. 2.15) et l'effet de X_i commence à se faire sentir. L'ajustement des points expérimentaux a montré que la variation suit une loi linéaire de forme :

$$S = aF_1 - b \quad (2.10)$$

Les valeurs des facteurs **a** et **b**, ainsi que les coefficients de corrélation R^2 sont regroupés dans le tableau 2.6 :

Tableau 2.6 : Valeurs des facteurs *a* et *b* de l'équation (2.10) pour des intervalles du rapport d'occupation $0,4 \leq X_i \leq 1$

Intervalle de X_i	Centre de l'intervalle de X_i	R^2	<i>a</i>	<i>b</i>
1	1	0,985	1,3043	1,9988
1-0,8	0,9	0,988	1,143	1,5945
0,8-0,6	0,7	0,982	1,06	1,39
0,6-0,4	0,5	0,983	0,95	1,09

La variation des facteurs *a* et *b* en fonction de centre des intervalles du rapport d'occupation X_i est présenté dans la figure (2.16).

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrés nous a permis d'écrire :

$$a = 0,70e^{0,58X_i} \tag{2.11}$$

$$b = 0,62e^{1,10X_i} \tag{2.12}$$

La substitution des équations (2.11) et (2.12) dans l'équation (2.10) donne :

$$S = (0.70e^{0.58X_i}) * F_1 - 0.62e^{1.10X_i} \tag{2.13}$$

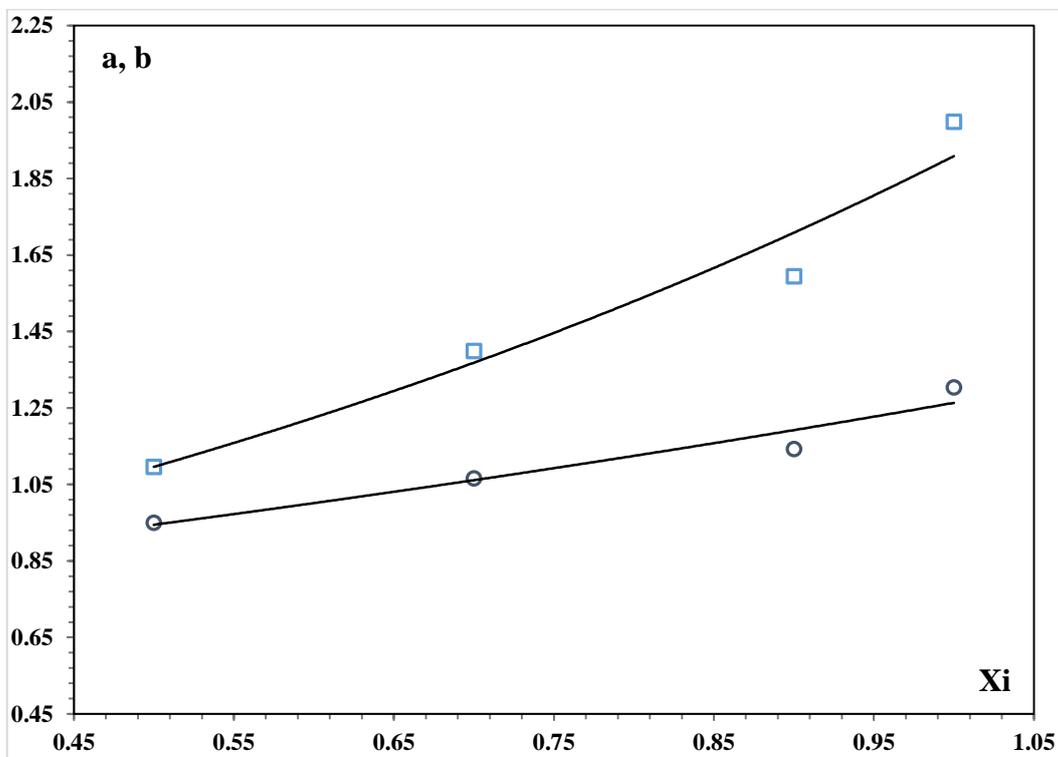


Figure 2.16 : Variation des facteurs *a* et *b* en fonction du rapport d'occupation X_i , (○) *a* ; (□) *b*, (----) courbe d'ajustement pour l'intervalle $0,4 \leq X_i \leq 1$

Pour $0,0 \leq X_i \leq 0,4$: l'accroissement du nombre du Froude F_1 donne naissance à l'accroissement du Y, par ailleurs, pour la même valeur du nombre de Froude F_1 , l'augmentation de X_i donne naissance à l'augmentation du Y. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés à montrer que la meilleur représentation suit une loi linéaire de forme :

$$S = a''F_1 - b'' \tag{2.14}$$

Le tableau 2.7 ci-dessous regroupe les valeurs des facteurs a'' et b'' ainsi que les coefficients de corrélation R^2 correspondants pour chaque étendu de l'intervalle X_i :

Tableau 2.7 : Valeurs des facteurs a'' et b'' de l'équation (2.14) pour l'intervalle du rapport d'occupation $0,0 \leq X_i \leq 0,4$

Intervalle du X_i	Centre de l'intervalle de X_i	R^2	a''	b''
0,4-0,2	0,3	0,975	0,905	1,328
0,2-0,0	0,1	0,984	0,811	1,611
0,0	0,0	0,964	0,655	1,585

La variation des facteurs a'' et b'' en fonction de centre des intervalles du rapport d'occupation X_i est présenté dans la figure (2.17). L'ajustement des points par la méthode des moindres carrés a donné les relations suivantes :

$$a'' = 0,78X_i + 0,68 \tag{2.15}$$

$$b'' = 1,63e^{-0,64X_i} \tag{2.16}$$

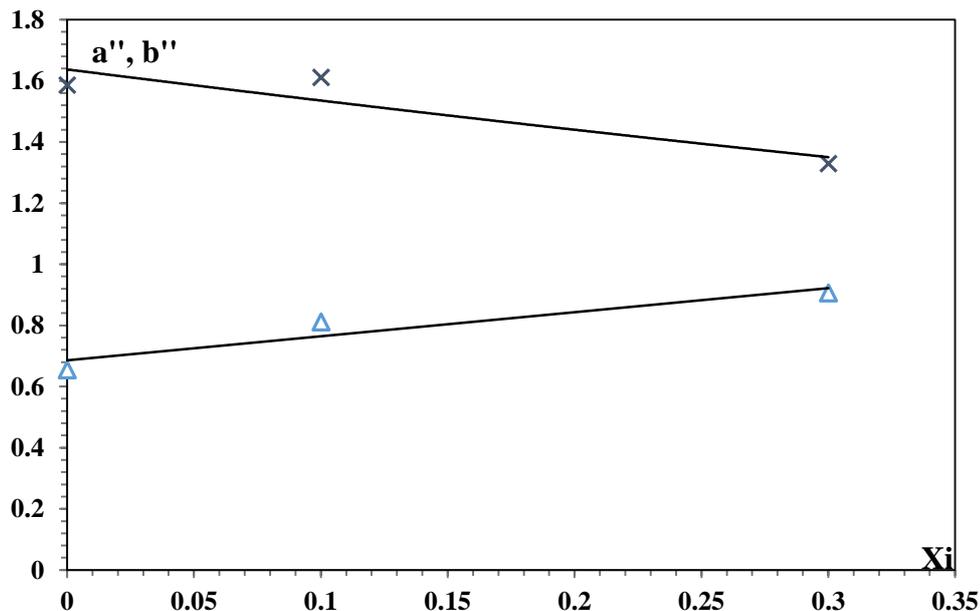


Figure 2.17 : Variation des facteurs a'' et b'' en fonction du rapport d'occupation X_i , (Δ) a ; (\times) b , (----) courbe d'ajustement pour l'intervalle $0,4 \leq X_i \leq 1$

En effet, en remplaçant les facteurs a'' et b'' par ses expressions dans l'équation (2.14) liant la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ au nombre de *Froude* F_1 , on aura :

$$S = (0,78X_i + 0,68) F_1 - 1,68e^{-0,64X_i} \quad (2.17)$$

II.3.4. Longueur relative du bassin

II.3.4.1. Variation de la longueur relative du ressaut $\lambda_j = L_j/h_1$ en fonction de nombre du *Froude* F_1

La position de la longueur du ressaut correspond à la section dont laquelle seulement les petites bulle d'air apparaissent à la partie supérieure de l'écoulement, à l'aval de cette section, la turbulence est pratiquement diminuée et l'écoulement devient uniforme. Toutefois, il existe toujours certains effets des courants latéraux.

La position finale de la longueur L_j du ressaut est définie comme la limite au-delà de laquelle la protection du bassin amortisseur n'est plus nécessaire. Il est à noter que la longueur du ressaut est un paramètre difficile à mesurer, surtout quand le pied du ressaut se situe à la section élargie. Les difficultés primordiales peuvent être attribuées à :

- L'asymétrie du ressaut.
- La fluctuation du pied de ressaut.
- La pulsation et la turbulence.

L'analyse des résultats obtenus par notre étude expérimentales ont montré qu'il y a une relation unique entre la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut et le nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident (figure. 2.18). L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés a montré que la fonction $\lambda_j = L_j/h_1$ est linéaire dont l'équation est donnée ci-dessous (2.18) :

$$\lambda_j = 9,97F_1 - 0,307 \quad (2.18)$$

$$\text{Pour } 2,09 \leq F_1 \leq 10,51 \quad \text{et } 0,0 \leq X_i \leq 1$$

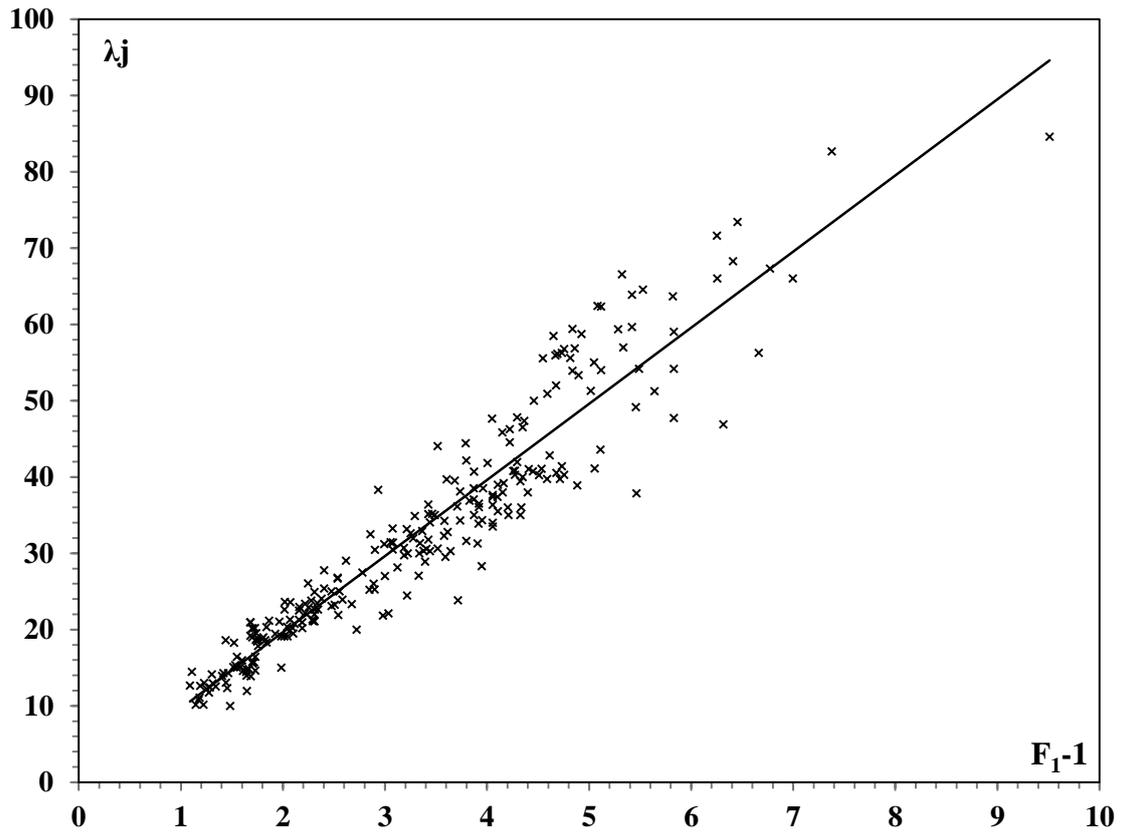


Figure 2.18 : Variation de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0,0 \leq X_i \leq 1$

L'accroissement du nombre de Froude F_1 engendre l'augmentation de la longueur du ressaut et par conséquent la longueur du bassin d'amortissement, quelque-soit la position du pied du ressaut X_i . Les points expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction $\lambda_j = f(F_1)$, sont représentés dans le tableau (2.8) :

Tableau 2.8 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $\lambda_j = f(F_1)$

λ_j	F_{1-1}								
10,00	2,48	21,27	3,07	55,56	5,55	35,00	4,49	34,32	4,95
15,08	2,52	21,17	2,87	38,10	4,74	13,02	2,23	20,74	3,11
19,81	3,06	24,91	3,31	46,29	5,22	15,54	2,70	39,19	5,16
21,27	3,16	10,78	2,18	31,79	4,43	19,11	3,01	36,14	4,71
34,89	4,29	12,54	2,34	55,94	5,67	47,67	5,05	10,15	2,15
12,42	2,29	14,29	2,46	20,19	3,10	22,64	3,34	55,00	6,05
14,46	2,11	44,06	4,52	22,18	3,22	13,89	2,68	36,90	4,83
19,11	2,99	22,64	3,31	20,94	3,19	14,29	2,42	19,45	2,92
56,77	5,75	44,44	4,79	23,62	3,02	13,05	2,44	20,33	2,84
35,18	4,46	35,13	4,43	25,37	3,40	14,15	2,30	59,35	6,29

Tableau 2.8 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $\lambda_j = f(F_1)$ (suite)

λ_j	F_{1-I}								
12,22	2,25	50,91	5,59	43,61	6,11	31,43	4,08	15,08	2,58
14,64	2,73	39,00	5,11	20,22	2,73	58,75	5,92	27,06	4,33
18,67	2,74	16,43	2,73	18,33	2,84	38,00	5,15	34,05	4,44
23,08	3,48	15,00	2,55	20,16	2,71	66,57	6,32	23,92	3,58
40,28	5,27	18,98	2,70	66,00	7,25	30,57	4,41	26,79	3,54
36,51	4,92	33,25	4,08	35,00	5,21	28,92	4,39	32,27	4,58
34,25	4,58	23,45	3,34	22,63	3,02	25,00	3,48	39,51	4,68
23,40	3,22	30,63	4,52	32,62	4,25	27,78	3,40	51,25	6,64
54,00	6,12	24,04	3,38	39,71	4,61	26,67	3,54	71,61	7,25
38,54	4,87	31,95	4,28	31,19	3,99	19,11	3,04	56,97	6,34
59,39	5,84	11,75	2,28	53,94	5,84	68,28	7,41	23,33	3,68
35,00	4,87	14,83	2,67	39,73	5,59	23,82	3,28	21,33	3,29
15,34	2,53	18,62	2,44	54,19	6,49	58,48	5,65	22,50	3,16
13,91	2,40	41,84	5,01	40,26	5,51	26,00	3,89	26,07	3,25
18,45	2,75	39,72	5,72	37,07	4,87	22,93	3,25	30,27	4,64
20,95	2,68	52,00	5,68	18,98	2,81	15,00	2,99	30,70	4,18
23,27	3,51	36,00	5,20	12,97	2,31	19,47	3,10	47,37	5,37
39,44	5,33	50,00	5,46	15,76	2,70	22,98	3,16	37,38	5,06
37,38	5,10	41,03	5,41	20,16	2,70	21,82	3,98	36,00	5,34
12,33	2,45	30,00	4,22	20,95	2,68	20,36	3,04	22,12	4,03
14,48	2,64	23,57	3,07	64,55	6,53	37,65	5,05	21,14	3,29
51,29	6,02	62,41	6,08	40,75	5,45	38,00	5,40	21,92	3,54
38,54	4,96	32,93	4,37	41,95	5,29	54,19	6,83	22,00	3,31
63,87	6,42	31,46	4,06	18,77	2,79	42,82	5,61	82,67	8,38
35,50	5,11	12,69	2,09	14,60	2,61	49,17	6,46	24,47	4,22
25,00	3,56	18,62	2,83	18,87	2,75	30,27	4,44	47,74	6,83
31,62	4,80	59,03	6,83	27,03	4,00	29,76	4,19	67,33	7,77
56,13	5,69	40,53	5,68	29,05	3,62	33,90	4,92	35,00	5,33
40,83	5,27	41,08	5,53	21,03	2,97	27,50	3,78	45,85	5,15
10,16	2,22	56,88	5,86	62,33	6,12	19,55	2,74	47,80	5,29
11,96	2,65	41,43	5,73	30,44	3,90	15,74	2,72	30,32	4,38
16,45	2,55	12,62	2,19	53,33	5,90	19,21	2,68	20,00	3,72
56,25	5,73	14,75	2,65	40,77	5,26	28,16	4,12	20,18	3,19
40,29	5,75	18,28	2,52	11,06	2,18	30,50	4,08	21,09	3,31
36,05	4,92	17,86	2,76	63,67	6,82	73,44	7,45	25,22	3,85
55,59	5,81	15,97	2,60	40,00	5,35	18,89	2,75	46,50	5,35
36,34	5,06	59,68	6,42	36,39	4,42	13,96	2,65	25,25	3,90

Tableau 2.8 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $\lambda_j = f(F_1)$ (suite et fin)

λ_j	F_{1-1}								
34,29	4,74	28,33	4,95	33,19	4,22	38,33	3,93	37,88	6,46
41,11	6,05	42,16	4,80	31,28	4,91	44,57	5,22	46,88	7,32
66,00	8,00	23,85	4,71	30,00	4,34	32,79	4,61	84,62	10,51
38,89	5,88	29,51	4,59	33,50	5,06	40,71	4,87		
56,25	7,66	31,33	4,34	32,50	3,86	34,00	5,06		

II.3.4.2. Variation de la longueur relative du rouleau de surface $\lambda_r = L_r/h_1$ en fonction de nombre du Froude F_1

La longueur L_r est considérée comme étant la distance séparant la section initiale et la section finale du rouleau de surface. D’après nos résultats expérimentaux, on a constaté qu’il y a une relation unique liant la longueur relative $\lambda_r = L_r/h_1$ et le nombre de Froude F_1 de l’écoulement incident. La figure (2.19) illustre la représentation graphique de la fonction $\lambda_r = f(F_1)$.

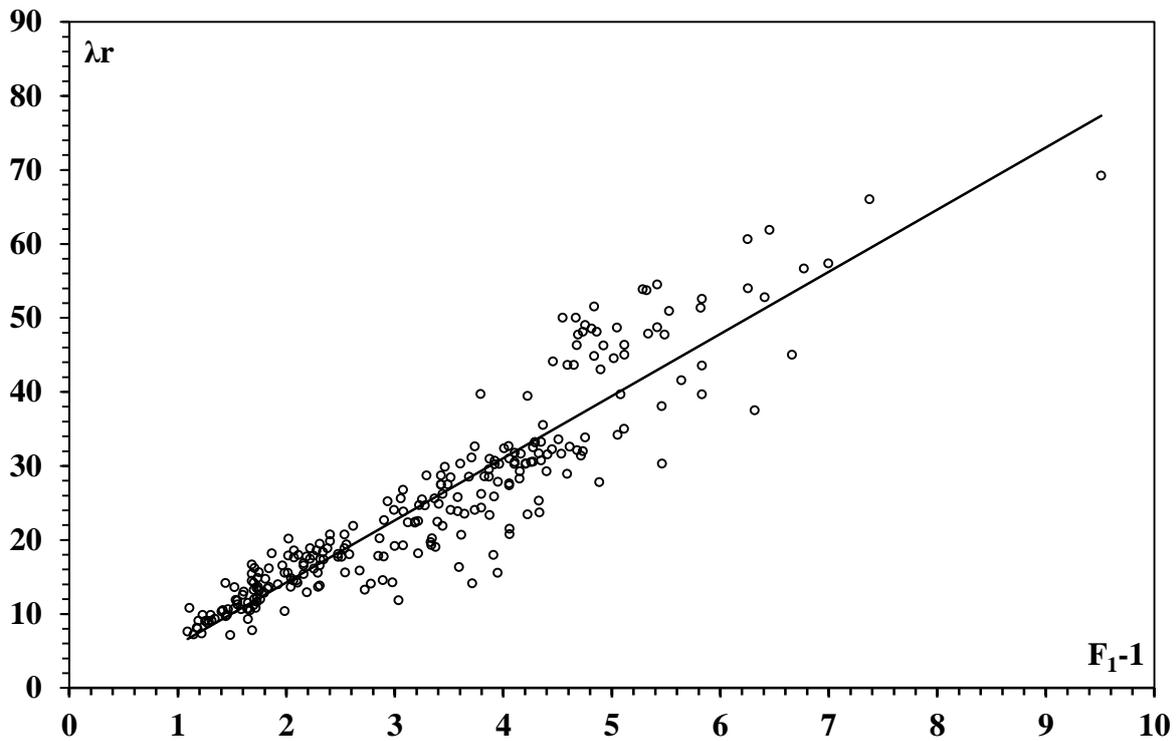


Figure 2.19 : Variation de la longueur relative du rouleau de surface $\lambda_r = L_r/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 de l’écoulement incident, pour $0.0 \leq Xi \leq 1$

La figure (2.19) montre que la variation de la fonction $\lambda_r = f(F_1)$ est une équation d’une droite de la forme $y = ax + b$. L’ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés a donné l’équation (2.19) suivante :

$$\lambda_r = 8,39F_1 - 2,54 \tag{2.19}$$

$$\text{Pour } 2,09 \leq F_1 \leq 10,51 \quad \text{et } 0,00 \leq Xi \leq 1,00$$

L'accroissement du nombre de *Froude* F_1 engendre l'augmentation de la longueur du rouleau de surface.

Comparant la longueur du ressaut évoluant dans un canal trapézoïdal brusquement élargi avec la longueur de son homologue évoluant en canal trapézoïdal $L_j/L_{j_{ref}}$ en fonction de la position relative du pied du ressaut par rapport à l'élargissement exprimé par le rapport d'occupation $X_i = X_1/L_{j_{ref}}$. Sachant que $L_{j_{ref}}$ correspond à la longueur du ressaut évoluant complètement dans le canal d'approche trapézoïdal et X_1 est la position du pied du ressaut par rapport à l'élargissement.

La condition limite du rapport d'occupation $X_i \geq 1$, conduit à un ressaut développé complètement dans le canal d'amener trapézoïdal, autrement le ressaut occupe partiellement ce canal. Quand $X_i = 0$, le pied du ressaut est situé à la section élargie et l'ensemble du ressaut est à l'aval de cette section.

La figure (2.20) présente l'évolution du $L_j/L_{j_{ref}}$ en fonction du $X_i + 0.5$. La longueur du ressaut L_j est approximativement 1.4 fois la longueur du ressaut dans le canal d'amener trapézoïdal $L_{j_{ref}}$. La valeur de $L_j/L_{j_{ref}}$ tend vers l'unité quand X_i augmente. Quand $X_i \geq 1$, le $L_j/L_{j_{ref}}$ devient approximativement égale à l'unité, la dispersion des points expérimentaux est due à la formation des ondes latérales dans les deux côtés (zone de décollement) et au caractère asymétrique du ressaut qui rend la mesure de la longueur caractéristique L_j très difficile.

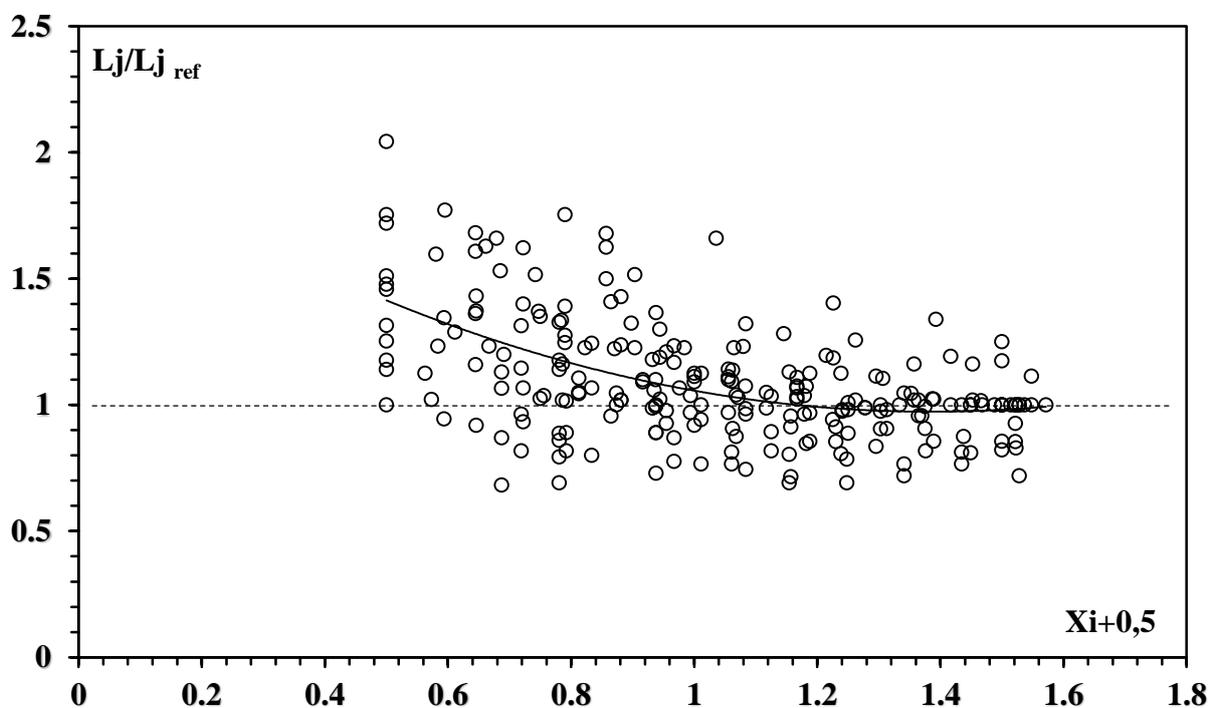


Figure 2.20 : Variation de la longueur relative du ressaut $L_j/L_{j_{ref}}$ en fonction du rapport d'occupation X_i ; (o) points expérimentaux (....) $L_j/L_{j_{ref}} = 1$

Les points expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction $\lambda r = f(F_1)$, sont représentés dans le tableau (2.9) :

Tableau 2.9 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $\lambda r = f(F_1)$

λr	F_1-I								
7,14	2,48	32,67	5,05	30,24	5,10	46,29	5,68	47,74	6,49
10,66	2,52	17,36	3,34	9,83	2,45	30,25	5,20	33,59	5,51
14,53	3,06	7,78	2,68	10,69	2,64	44,12	5,46	28,54	4,87
16,55	3,16	10,48	2,42	44,52	6,02	31,54	5,41	14,75	2,81
28,72	4,29	9,66	2,44	30,24	4,96	24,71	4,22	9,06	2,31
9,03	2,29	9,85	2,30	54,52	6,42	18,57	3,07	11,19	2,70
10,81	2,11	27,84	4,95	31,75	5,11	39,66	6,08	14,19	2,70
15,54	2,99	17,96	3,11	19,40	3,56	25,61	4,37	15,40	2,68
49,03	5,75	31,62	5,16	26,22	4,80	25,61	4,06	50,91	6,53
29,88	4,46	31,14	4,71	47,74	5,69	7,61	2,09	32,25	5,45
17,64	3,07	7,23	2,15	30,56	5,27	13,45	2,83	33,17	5,29
18,17	2,87	48,67	6,05	7,34	2,22	52,58	6,83	12,81	2,79
19,45	3,31	28,57	4,83	9,29	2,65	32,11	5,68	13,02	2,61
8,13	2,18	14,00	2,92	11,77	2,55	31,62	5,53	15,65	2,75
9,32	2,34	16,17	2,84	48,13	5,73	48,13	5,86	19,19	4,00
10,63	2,46	53,87	6,29	33,82	5,75	32,00	5,73	21,90	3,62
28,44	4,52	9,05	2,25	30,23	4,92	9,08	2,19	16,55	2,97
17,36	3,31	11,61	2,73	48,53	5,81	10,68	2,65	45,00	6,12
39,72	4,79	14,83	2,74	30,98	5,06	13,59	2,52	22,67	3,90
28,72	4,43	18,08	3,48	43,64	5,59	11,96	2,76	43,03	5,90
50,00	5,55	32,50	5,27	30,50	5,11	12,58	2,60	30,51	5,26
32,62	4,74	30,70	4,92	12,14	2,73	48,71	6,42	8,03	2,18
39,43	5,22	25,75	4,58	11,29	2,55	35,00	6,11	51,33	6,82
27,44	4,43	18,87	3,22	13,22	2,70	13,48	2,73	33,25	5,35
50,00	5,67	46,33	6,12	26,75	4,08	13,67	2,84	27,50	4,42
14,53	3,10	29,51	4,87	18,36	3,34	16,19	2,71	23,81	4,08
17,45	3,22	51,52	5,84	24,06	4,52	54,00	7,25	46,25	5,92
17,74	3,19	30,95	4,87	18,85	3,38	30,33	5,21	29,25	5,15
20,17	3,02	11,90	2,53	24,63	4,28	17,89	3,02	53,71	6,32
20,74	3,40	10,31	2,40	8,73	2,28	25,48	4,25	24,86	4,41
27,50	4,49	13,28	2,75	10,52	2,67	30,29	4,61	22,43	4,39
9,84	2,23	16,67	2,68	14,15	2,44	24,05	3,99	17,69	3,48
11,96	2,70	17,69	3,51	32,37	5,01	44,85	5,84	19,81	3,40
15,54	3,01	31,67	5,33	31,39	5,72	28,92	5,59	20,71	3,54

Tableau 2.9 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $\lambda r = f(F_1)$ (suite et fin)

λr	F_{1-I}								
14,82	3,04	25,85	4,92	60,65	7,25	56,67	7,77	14,10	4,71
52,76	7,41	14,06	3,78	47,88	6,34	25,28	5,33	16,34	4,59
18,55	3,28	13,64	2,74	15,83	3,68	28,29	5,15	20,22	4,34
43,64	5,65	10,82	2,72	15,56	3,29	33,17	5,29	22,55	4,22
14,57	3,89	14,44	2,68	15,36	3,16	19,03	4,38	17,95	4,91
16,10	3,25	22,37	4,12	17,86	3,25	13,25	3,72	19,29	4,34
10,36	2,99	19,25	4,08	23,51	4,64	12,91	3,19	20,75	5,06
14,21	3,10	61,88	7,45	22,33	4,18	13,82	3,31	20,21	3,86
16,84	3,16	13,11	2,75	35,53	5,37	17,83	3,85	25,21	3,93
14,24	3,98	11,51	2,65	27,62	5,06	30,75	5,35	23,43	5,22
13,64	3,04	10,63	2,58	23,71	5,34	17,75	3,90	20,70	4,61
27,35	5,05	19,71	4,33	11,82	4,03	24,05	4,74	23,33	4,87
29,25	5,40	26,22	4,44	13,64	3,29	34,17	6,05	21,50	5,06
43,55	6,83	18,04	3,58	15,58	3,54	57,33	8,00	30,30	6,46
32,56	5,61	18,87	3,54	16,55	3,31	27,78	5,88	37,50	7,32
38,06	6,46	23,86	4,58	66,00	8,38	45,00	7,66	69,23	10,51
21,89	4,44	28,54	4,68	18,16	4,22	15,56	4,95		
22,44	4,19	41,56	6,64	39,68	6,83	24,32	4,80		

II.3.5. Rendement du ressaut

Le rendement η du ressaut hydraulique peut être définie comme le rapport entre la charge initiale H_1 et finale H_2 (perte de charge ΔH) sur la charge initiale H_1 :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \tag{2,20}$$

ΔH peut être déterminé analytiquement en utilisant le théorème de Bernoulli, en admettant que $z_1 = z_2$ (canal horizontal), on obtient :

$$\Delta H = \left(h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \right) - \left(h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \right) \tag{2,21}$$

D'où les sections amont et aval sont donnés par les relations suivantes :

$$A_1 = b_1 h_1 + m h_1^2 \tag{2,22}$$

$$A_2 = b_2 h_2 \tag{2,23}$$

Le nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident est défini par l'équation suivante :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b + 2m h_1)}{g A_1^3} \tag{2,24}$$

En tenant compte des relations (2,21), (2,22), (2,23) et (2,24), et en introduisant les paramètres adimensionnels suivants :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} ; \quad M = \frac{mh_2}{b_1} ; \quad B = \frac{b_2}{b_1}$$

Le rendement du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal brusquement élargi en rectangulaire, s'écrit comme suit :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2(1+M)^3}{2B^2Y^2(1+2M)}}{1 + \frac{F_1^2(1+M)}{2(1+2M)}} ; \quad 0 < \eta < 1 \quad (2,25)$$

La figure (2,21), montre le rendement obtenu pour différentes position du pied du ressaut interprété par le rapport d'occupation X_i . La figure confirme que le rendement du ressaut spatial dont le rapport d'occupation $X_i=0$ est beaucoup plus grand que le rendement du ressaut classique trapézoïdal dont le $X_i=1$. Il est à noter aussi que pour calculer le rendement du ressaut dans un canal trapézoïdal brusquement élargi en rectangulaire, on utilise l'équation (2,25) qui se présente sous forme adimensionnelle, tout en affirmant que le rapport d'occupation est $0,0 \leq X_i \leq 0,4$.

Autrement dit, pour calculer le rendement du ressaut dont le rapport d'occupation est $0,4 \leq X_i \leq 1$, l'équation (2,25) n'est plus applicable, étant donné que les caractéristiques du ressaut dans cet intervalle du rapport d'occupation ne changent pas. On peut utiliser l'équation (2,9) de *Hager et Wanoschek (1989)* concernant le rendement du ressaut dans un canal trapézoïdal.

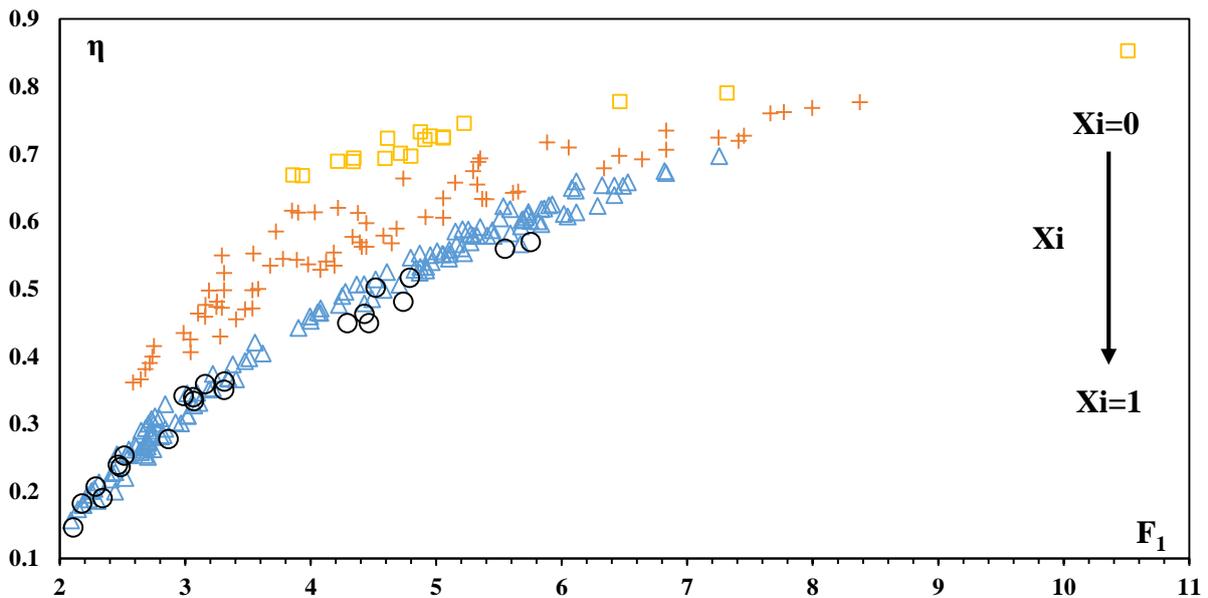


Figure 2.21 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 ; (o) pour $X_i=1$; (Δ) pour $0,40 \leq X_i \leq 1$; (+) pour $0,00 \leq X_i \leq 0,40$; (\square) pour $X_i=0$

Les paramètres, qui rentrent en jeu pour le calcul du rendement du ressaut dans un canal trapézoïdal brusquement élargi sont : Y le rapport des hauteurs conjuguées, M le rapport de forme, F_1 le nombre du *Froude* et B le rapport d'élargissement,

Pour le ressaut classique rectangulaire le $M=0$, et le $B=1$, ça nous amène à l'équation (1,30) qu'on la représente encore :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \tag{1,30}$$

On note aussi, que la dispersion des points expérimentaux du rendement dans l'intervalle de rapport d'occupation X_i entre 0,0 et 0,4, est due principalement à l'apparition de l'écoulement asymétrique qui rend la mesure des paramètres assez difficile,

Les points expérimentaux qui ont servi au traçage du graphique de η en fonction de F_1 , pour les deux intervalles du rapport d'occupation X_i et les deux cas extrême ($X_i=0$, $X_i=1$) sont regroupés dans le tableau (2,10)

Tableau 2.10 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $\eta = f(F_1, X_i)$

$X_i=1$		$0,40 \leq X_i \leq 1,00$					
η	F_1	η	F_1	η	F_1	η	F_1
0.24	2,48	0.55	5,22	0.57	5,27	0.55	5,06
0.25	2,52	0.48	4,43	0.53	4,92	0.58	5,59
0.34	3,06	0.57	5,67	0.50	4,58	0.55	5,11
0.36	3,16	0.35	3,10	0.35	3,22	0.31	2,73
0.45	4,29	0.37	3,22	0.61	6,12	0.25	2,55
0.21	2,29	0.35	3,19	0.52	4,87	0.25	2,70
0.15	2,11	0.31	3,02	0.60	5,84	0.46	4,08
0.34	2,99	0.37	3,40	0.53	4,87	0.37	3,34
0.57	5,75	0.48	4,49	0.26	2,53	0.51	4,52
0.45	4,46	0.19	2,23	0.22	2,40	0.39	3,38
0.33	3,07	0.27	2,70	0.26	2,75	0.50	4,28
0.28	2,87	0.35	3,01	0.25	2,68	0.20	2,28
0.35	3,31	0.55	5,05	0.40	3,51	0.27	2,67
0.18	2,18	0.37	3,34	0.58	5,33	0.20	2,44
0.19	2,34	0.29	2,68	0.54	5,10	0.56	5,01
0.24	2,46	0.23	2,42	0.25	2,45	0.61	5,72
0.50	4,52	0.23	2,44	0.26	2,64	0.59	5,68
0.36	3,31	0.19	2,30	0.61	6,02	0.56	5,20
0.52	4,79	0.55	4,95	0.54	4,96	0.58	5,46
0.46	4,43	0.33	3,11	0.64	6,42	0.58	5,41
0.56	5,55	0.57	5,16	0.56	5,11	0.48	4,22
0.48	4,74	0.51	4,71	0.42	3,56	0.33	3,07
		0.17	2,15	0.55	4,80	0.65	6,08
		0.61	6,05	0.60	5,69	0.51	4,37
		0.53	4,83	0.58	5,27	0.47	4,06
		0.30	2,92	0.19	2,22	0.16	2,09
		0.29	2,84	0.29	2,65	0.28	2,83
		0.62	6,29	0.26	2,55	0.67	6,83
		0.20	2,25	0.61	5,73	0.60	5,68
		0.28	2,73	0.60	5,75	0.62	5,53
		0.28	2,74	0.53	4,92	0.62	5,86
		0.39	3,48	0.60	5,81	0.61	5,73

Tableau 2.10 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $\eta = f(F_1, X_i)$ (suite et fin)

$0,40 \leq X_i \leq 1,00$				$0,00 \leq X_i \leq 0,40$				$X_i = 0$	
η	F_1	η	F_1	η	F_1	η	F_1	η	F_1
0.55	5,06	0.62	5.84	0.56	4.41	0.66	5.15	0.73	4.95
0.58	5,59	0.62	5.59	0.57	4.39	0.67	5.29	0.70	4.80
0.55	5,11	0.65	6.49	0.47	3.48	0.61	4.38	0.70	4.71
0.31	2,73	0.60	5.51	0.45	3.40	0.58	3.72	0.69	4.59
0.25	2,55	0.55	4.87	0.47	3.54	0.50	3.19	0.69	4.34
0.25	2,70	0.28	2.81	0.41	3.04	0.50	3.31	0.69	4.22
0.46	4,08	0.21	2.31	0.72	7.41	0.62	3.85	0.72	4.91
0.37	3,34	0.27	2.70	0.43	3.28	0.69	5.35	0.69	4.34
0.51	4,52	0.27	2.70	0.64	5.65	0.61	3.90	0.73	5.06
0.39	3,38	0.26	2.68	0.54	3.89	0.66	4.74	0.67	3.86
0.50	4,28	0.66	6.53	0.48	3.25	0.71	6.05	0.67	3.93
0.20	2,28	0.59	5.45	0.43	2.99	0.77	8.00	0.75	5.22
0.27	2,67	0.58	5.29	0.46	3.10	0.72	5.88	0.72	4.61
0.20	2,44	0.31	2.79	0.48	3.16	0.76	7.66	0.73	4.87
0.56	5,01	0.27	2.61	0.54	3.98			0.72	5.06
0.61	5,72	0.30	2.75	0.42	3.04			0.78	6.46
0.59	5,68	0.45	4.00	0.61	5.05			0.79	7.32
0.56	5,20	0.40	3.62	0.63	5.40			0.85	10.51
0.58	5,46	0.30	2.97	0.71	6.83				
0.58	5,41	0.66	6.12	0.64	5.61				
0.48	4,22	0.44	3.90	0.70	6.46				
0.33	3,07	0.62	5.90	0.56	4.44				
0.65	6,08	0.59	5.26	0.53	4.19				
0.51	4,37	0.18	2.18	0.61	4.92				
0.47	4,06	0.67	6.82	0.54	3.78				
0.16	2,09	0.59	5.35	0.40	2.74				
0.28	2,83	0.51	4.42	0.39	2.72				
0.67	6,83	0.47	4.08	0.38	2.68				
0.60	5,68	0.62	5.92	0.54	4.12				
0.62	5,53	0.58	5.15	0.53	4.08				
0.62	5,86	0.65	6.32	0.73	7.45				
0.61	5,73			0.41	2.75				
0.18	2,19			0.37	2.65				
0.26	2,65			0.36	2.58				
0.22	2,52			0.58	4.33				
0.31	2,76			0.60	4.44				
0.27	2,60			0.50	3.58				
0.65	6,42			0.50	3.54				
0.65	6,11			0.58	4.58				
0.29	2,73			0.59	4.68				
0.33	2,84			0.69	6.64				
0.30	2,71			0.72	7.25				
0.70	7,25			0.68	6.34				
0.59	5,21			0.53	3.68				
0.31	3,02			0.47	3.29				
0.49	4,25			0.46	3.16				
0.18	2,19			0.47	3.25				
0.26	2,65			0.57	4.64				
0.22	2,52			0.55	4.18				
0.31	2,76			0.63	5.37				
0.27	2,60			0.63	5.06				
0.65	6,42			0.69	5.34				
0.65	6,11			0.61	4.03				
0.29	2,73			0.55	3.29				
0.33	2,84			0.55	3.54				
0.30	2,71			0.52	3.31				
0.70	7,25			0.78	8.38				
0.59	5,21			0.62	4.22				
0.31	3,02			0.73	6.83				
0.49	4,25			0.76	7.77				
0.52	4,61			0.65	5.33				
0.46	3,99								

II.3.6. La symétrie du ressaut

Le ressaut hydraulique évoluant dans les canaux brusquement élargi, dont le pied est approximativement situé à la section élargie, est caractérisé par un écoulement fortement asymétrique, comme il est indiqué dans la figure (2.6 : a et b). Le degré de l'asymétrie de ce type du ressaut a été évalué en examinant la différence relative des profondeurs d'eau maximal et minimal dans les deux zones de décollement sur la moyenne de celles-ci $\Delta Y = 2(h_M - h_m) / (h_M + h_m)$ en fonction du rapport d'occupation X_i , sachant que l'utilisation des valeurs maximales et minimales tient en compte la possibilité que la symétrie peut être concentrée soit côté droite, soit côté gauche du canal

Cette analyse a pour but de trouver à partir de quelle position du pied du ressaut l'écoulement commence à être asymétrique.

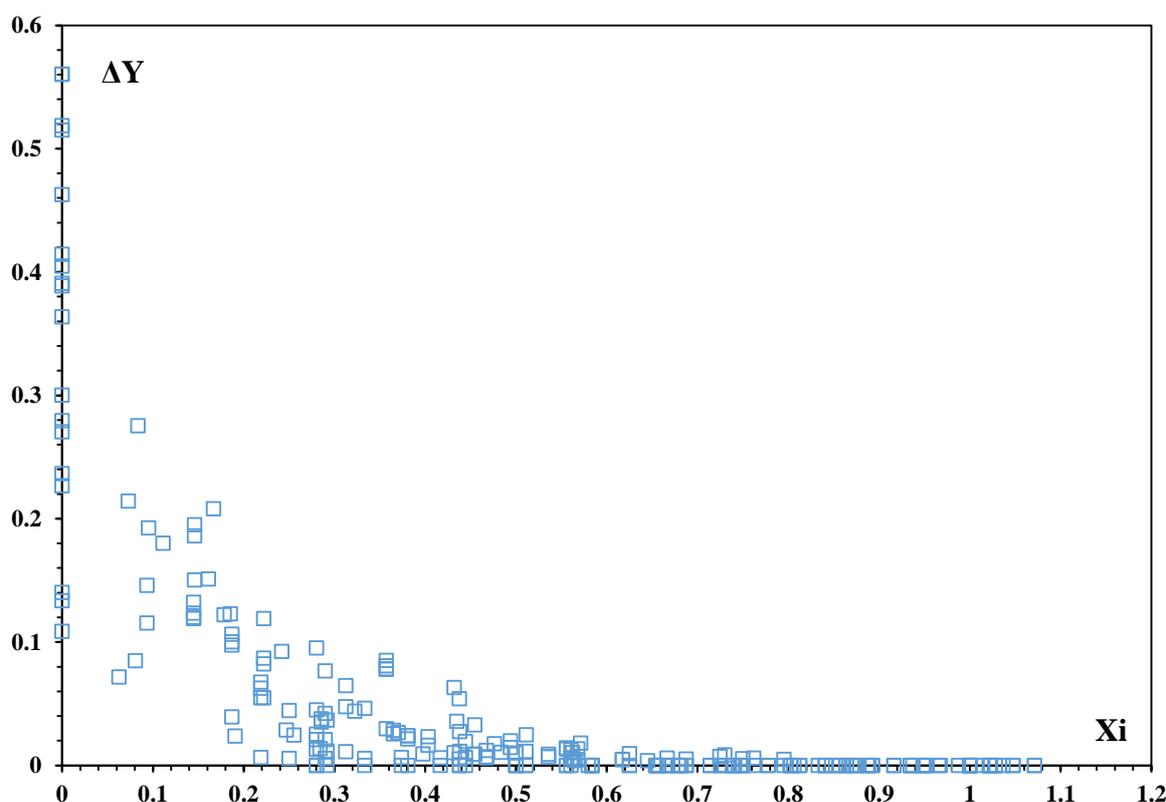


Figure 2.22 : Variation de la différence relative des hauteurs conjuguées du ressaut $\Delta Y/Y$ en fonction du rapport d'occupation X_i ; (\square) points expérimentaux

La figure (2.22) montre clairement qu'à partir de $X_i = 0,45$, le caractère asymétrique de l'écoulement commence à manifester. Cette manifestation s'accroît quand le pied du ressaut s'approche de la section élargie. Quand $X_i = 0$, ΔY est au maximum, cela signifie que le ressaut est fortement asymétrique.

La dispersion des points expérimentaux dans l'intervalle de X_i entre 0 et 0,2 peut être attribuée au caractère fortement asymétrique qui rend les mesures plus délicates.

II.4. Conclusion

Le présent chapitre de notre travail a été consacré à l'analyse des résultats expérimentaux du ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal brusquement élargi.

D'abord, nous avons décrit en détail les différentes configurations du ressaut rencontrées, en s'appuyant sur des schémas et des photographies.

Ensuite, nous avons entamé notre analyse aux résultats expérimentaux, en premier temps, il a été démontré, en analysant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de nombre de *Froude* de l'écoulement incident et la position relative du pied du ressaut, que deux configurations du ressaut peuvent être distinguées en fonction de ce dernier paramètre, en deuxième temps chaque configuration a été étudiée séparément et nous avons constaté que la variation est de type puissance pour les deux cas. En troisième temps, l'examen du rapport des hauteurs conjuguées pour les deux configurations a montré que le ressaut dont le pied est situé à la section élargie est beaucoup avantageux que son homologue qui se développe complètement ou partiellement dans le canal amont trapézoïdal.

L'analyse continue, en examinant la variation de la hauteur relative de seuil $S=s/h_1$ en fonction de F_1 et X_i , aussi deux configurations ont été trouvées. Chaque configuration est analysée séparément. L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation suit une loi de type linéaire.

La comparaison des courbes du rendement issue de notre contribution et celle de *Hager et Wanoschek (1989)* en canal trapézoïdal classique nous a permis de tirer le deuxième avantage du ressaut évoluant en canal brusquement élargi.

L'expérimentation a permis de montrer que la longueur du bassin de dissipation a ressaut spatial où le pied du ressaut est situé à la section élargie est beaucoup plus grand que son homologue dans le canal trapézoïdal.

Enfin, une analyse complémentaire de caractère asymétrique du ressaut évoluant dans le canal trapézoïdal brusquement élargi est proposée. Il est à noter que ce phénomène diminue la stabilité du bassin d'amortissement et il est compté parmi les inconvénients.

Conclusion de la deuxième

partie

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Cette présente partie de notre travail a été consacrée à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal d'angle d'inclinaison des parois $\alpha=73^\circ$ brusquement élargi en rectangulaire.

Nous avons pu diviser cette partie en deux chapitres, le premier chapitre porte sur la description du modèle expérimental, qui a servi de base à l'étude expérimentale, les appareils de mesures utilisées sont ainsi décrits d'une façon détaillée.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse des résultats expérimentaux, d'abord, une description de l'écoulement a été exposée dans laquelle nous avons mis en évidence les différentes configurations qui peuvent se générer dans notre canal de mesure, le détail est illustré au moyen des schémas et des photographies.

Ensuite, nous avons abordé l'analyse expérimentale, où il a été démontré que le ressaut dont le pied se situe à la section élargie présente des avantages par rapport à son homologue qui se développe partiellement ou complètement dans le canal d'approche trapézoïdal. En particulier, le rapport des hauteurs conjuguées et la dissipation d'énergie. Quant à la longueur du bassin d'amortissement, il a été trouvé que celle du ressaut spatial dont le pied se situe à la section élargie est presque 1,4 fois celle du ressaut dans le canal d'approche.

Finalement, une analyse complémentaire vise à quantifier le degré de l'asymétrie du ressaut est proposée, l'analyse du paramètre ΔY en fonction de position relative du pied du ressaut par rapport à l'élargissement a montré que le phénomène commence quand le $X_i = 0,4$.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La présente étude porte sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal brusquement élargi en rectangulaire, un vaste programme d'investigation expérimentale a été conduit dans le laboratoire de Recherche en Génie Civil, Hydraulique, Développement Durable et Environnement « LARGHYDE », afin de prouver et d'élargir les connaissances dans les comportements de ce type du ressaut. Le but principal de ce travail est la détermination de l'influence de l'élargissement du canal dans le ressaut hydraulique. Deux parties sont nécessaires. Dans la première partie nous avons passé en revue les principales investigations comptées dans le ressaut hydraulique, quant à la deuxième partie nous avons présenté notre contribution.

La première partie est présentée à travers trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré au ressaut hydraulique en canal rectangulaire, en premier lieu nous avons examiné les travaux les plus intéressants dans le ressaut hydraulique en canal rectangulaire prismatique de pente nul ou presque nul, notamment, ceux de *Bradley et Peterka (1957)* qui ont classifié le ressaut hydraulique en se basant sur le nombre de *Froude* de l'écoulement incident F_1 . Une démonstration de l'applicabilité du théorème de quantité de mouvement qui nous amène à l'équation connue de *Bélanger (1928)*, a été présentée. Cette dernière exprime le rapport des hauteurs conjuguées en fonction de nombre de *Froude* l'écoulement incident F_1 . En deuxième lieu, en présentant, l'étude de *Hager et Bremen (1989)* l'effet de frottement sur le rapport des hauteurs conjuguées a été mis en examen, les chercheurs ont conclu que ce rapport ne dépend pas seulement du nombre de *Froude* F_1 mais aussi au nombre de *Reynolds* et des caractéristiques géométriques de l'écoulement ($\omega = h_1/b$). En troisième lieu, nous avons abordé l'approche proposée par *Hager (1992)* concernant le profil de surface. *Hager et al (1990)* ont confirmé que les longueurs caractéristiques du ressaut, (L_j et L_r) ne sont déterminées que par la voie expérimentale, les auteurs ont découvert que la longueur de rouleau peut être développé et/ou non développé. Le rendement de ressaut classique est exposé, en comparant la formule trouvé avec celle de *Hager et Sinniger (1989)*.

Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince et épaisse a été abordé, d'abord, l'étude de *Forster et Skrinde (1950)* sur le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince est présentée. Ensuite, on a examiné l'étude *Achour, Sedira et Debabeche (2002)*. Enfin, le contrôle du ressaut

par marche a été examiné à travers l'étude de *Forster et Skrinde (1950)*, une analyse a permis aux auteurs de mettre en place les conditions d'écoulement associées aux niveaux aval variable.

Le deuxième chapitre de notre étude est consacré au ressaut hydraulique évoluant dans un cana trapézoïdal, Dans un premier temps, nous avons mis l'accent sur les travaux de *Hager et Wanoschek (1987-1989)*, dans cette étude les auteurs ont découvert pour la première fois, l'existence d'un rouleau du fond dont les caractéristiques ont été définit. Les cas de canal rectangulaire et triangulaire ont été aussi étudiés comme des cas extrêmes de la forme trapézoïdal, le rendement du ressaut évoluant en canal triangulaire est le meilleur par rapport à ce qui a trouvé dans ses homologues.

Dans un deuxième temps, la contribution expérimentale de *Kateb, Debabache et Benmalek (2013)* le ressaut contrôlé par marche positive et par seuil mince a été examiné.

Dans le troisième et le dernier chapitre de la première partie, qui porte sur le ressaut dans les canaux à élargissement brusque. La classification du ressaut par *Bremen (1990)*, basée sur la position relative du pied du ressaut par rapport à l'élargissement a été présentée. Ensuite, nous avons abordé les travaux les plus intéressants entretenus de 1960 à 1990, la plupart des études visent à définir et à déterminer l'ensemble des caractéristiques principales du ressaut. On a cité, entre autre, les études conduits par *Nosedá (1963)* ; *Rajaratnam et Subramanya (1968)* ; *Unny (1960)* et de *Herbrand (1973)* ; *Sharma (1964)*. Quant aux travaux entretenus de 1990 à 2015, nous avons pu présenter en détail l'étude conduite par *Bremen et Hager (1993)*, les travaux expérimentaux de *Zare et Doering (2011)* ; et ceux de *Scorzini et al (2015)*. La majorité de ces travaux ont comme objectif, en plus de la définition et la détermination des principales caractéristiques du ressaut, l'élimination de l'écoulement asymétrique pour rendre au ressaut sa stabilité longitudinale et transversale.

A propos de la deuxième partie, elle est divisée en deux chapitres :

Le premier chapitre est dédié à la description de modèle expérimentale y compris les appareils utilisés et aussi la procédure expérimentale adoptée. Cette descriptions se faite au moyen des schémas et des photographies.

Le deuxième chapitre est consacré à notre propre contribution. Le ressaut hydraulique en canal trapézoïdale brusquement élargi en rectangulaire a été étudié par la voie expérimentale. D'abord, une description de l'écoulement est proposée. Ensuite, une analyse expérimentale des différents paramètres du ressaut est conduite, à travers laquelle nous avons constaté que ce type du ressaut est plus avantageux au son homologue qui se forme complètement ou partiellement dans le canal d'approche trapézoïdal, en termes du rapport des hauteurs conjuguées et du

rendement, notamment pour la position relative $X_i = 0$. L'ajustement des points par la méthode des moindres carrés a montré que les deux configurations du ressaut définies selon la position relative du son pied ($0,4 \leq X_i \leq 1$ et $0,0 \leq X_i \leq 0,4$) suivent une loi puissance de forme $Y = aF_1^b$.

Quant aux longueurs caractéristiques du ressaut, il nous a été donné après l'analyse des longueurs (L_j et L_r) en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident que ces longueurs augmentent avec l'augmentation de F_1 . Afin de les comparer avec le ressaut dans le canal trapézoïdal, on a établi un graphique reflétant la variation de L_j/L_{jref} en fonction de X_i et nous avons constaté que la longueur du ressaut dans le canal trapézoïdal brusquement élargi est 1,4 fois que celle du ressaut dans le canal d'approche trapézoïdal. Ce qui affecte l'aspect économique du bassin d'amortissement.

Enfin, une étude complémentaire vise à définir le degré de l'asymétrie de ce type de ressaut est proposée, dans laquelle nous avons étudié la variation du rapport ΔY en fonction de la position relative du pied du ressaut X_i . On a conclu que le ressaut est stable et symétrique jusqu'au $X_i = 0,4$, après cela, le ressaut commence à être asymétrique, ce phénomène est accentué quand le pied du ressaut se situe à la section élargi ($X_i = 0$).

PRINCIPALES NOTATIONS

PRINCIPALES NOTATIONS

A_1	L'aire de la section mouillée initiale	[m ²]
A_2	L'aire de la section mouillée finale	[m ²]
b_1	La largeur du fond du canal trapézoïdal	[m]
b_2	La largeur du canal rectangulaire	[m]
F_1	Nombre de <i>Froude</i> incident	[-]
F	Force de frottement	[N/m ²]
G	Accélération de la pesanteur	[m/s ²]
h	Hauteur du ressaut	[m]
h_1	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h_2	Hauteur finale du ressaut	[m]
h_g	Hauteur d'eau dans la zone de décollement gauche	[m]
h_d	Hauteur d'eau dans la zone de décollement droite	[m]
\bar{h}	Distance entre le centre de gravité de la section transversale et la surface libre de l'écoulement	[m]
$h(x)$	Profondeur d'eau à la distance x du pied du ressaut	[m]
H	Charge totale	[m]
ΔH	Perte de charge due au ressaut	[m]
K	Facteur de position	[-]
L_B	Longueur du bassin	[m]
L_j	Longueur du ressaut	[m]
L_r	Longueur du rouleau de surface	[m]
$L_{j\text{ref}}$	Longueur de référence du ressaut	[m]
L_{RF}	Longueur du rouleau de fond	[m]
L_S	Position du seuil ou d'une marche par rapport au début de ressaut	[m]
M	Le rapport de forme $M = (mh_1)/b$	[-]
m	Cotangente de l'angle d'inclinaison d'un talus	[-]
P_1	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	[N]
P_2	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	[N]
P_e	Force de pression exercée sur les deux cotées latérale de la section élargi	[N]
Q	Débit volume	[m ³ /s]
Q	Débit unitaire	[m ² /s]

s	Hauteur du seuil ou de la marche positive	[m]
S	Hauteur relative du seuil ou de la marche positive	[-]
V_1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m/s]
V_2	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m/s]
W	Rapport d'aspect $W = h_1/b$	[-]
X_1	La position variable du pied du ressaut par rapport à l'élargissement	[m]
X_i	Rapport d'occupation $X_i = X_1/L_{jref}$	[-]
x_{rf}	Position de la fin du rouleau de fond à l'aval	[m]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	[-]
Y^*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
α	Facteur de correction de l'énergie cinétique	[-]
β	Facteur de correction de la quantité de mouvement	[-]
Θ	Angle d'inclinaison du canal	[-]
$\bar{\omega}$	Poids spécifique du liquide	[Kg/m ³]
η	Rendement du ressaut	[-]
B	Taux d'élargissement	[-]

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Deuxième partie

Chapitre II

ETUDE EXPERIMENTALE

Tableau 2.1 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $Y = f(F_l, X_i)$ -----	88
Tableau 2.2 : Valeurs des facteurs a et b de l'équation (2.1) pour des intervalles du rapport d'occupation $0,4 \leq X_i \leq 1,0$ -----	91
Tableau 2.3 : Valeurs des facteurs a' et b' de l'équation (2.5) pour des intervalles du rapport d'occupation $0,0 \leq X_i \leq 0,4$ -----	93
Tableau 2.4 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $Y = f(S)$ -----	95
Tableau 2.5 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $S = f(F_l, X_i)$ -----	98
Tableau 2.6 : Valeurs des facteurs a et b de l'équation (2.10) pour des intervalles du rapport d'occupation $0,4 \leq X_i \leq 1,0$ -----	101
Tableau 2.7 : Valeurs des facteurs a" et b" de l'équation (2.14) pour l'intervalle du rapport d'occupation $0,0 \leq X_i \leq 0,4$ -----	102
Tableau 2.8 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $\lambda_j = f(F_l)$ -----	104
Tableau 2.9 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $\lambda_r = f(F)$ -----	108
Tableau 2.10 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $\eta = f(F_l, X_i)$ -----	111

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Première partie

Chapitre I

Figure 1.1 : Ressaut Hydraulique Ondulé, a) Onde stationnaire, b) Onde brisé-----	4
Figure 1.2 : le pré-ressaut-----	4
Figure 1.3 : Ressaut de transition-----	5
Figure 1.4 : Le Ressaut stable-----	5
Figure 1.5 : Le ressaut agité ou clapoteux-----	5
Figure 1.6 : Ressaut hydraulique classique – Notation-----	7
Figure 1.7 : Profil de la surface libre, $y(X)$ du ressaut hydraulique classique pour $F_1 = 4.3$ (O), 5.5 (Δ), 6.85 (\blacksquare) et 8.9 (\square), (\bullet), Eq 1.11 (\leftarrow)-----	10
Figure 1-8 : Ressaut hydraulique avec écoulement de Rouleau a) Développé b) non- Développé-----	11
Figure 1.9 : Longueur du ressaut Classique L_j/h_2 en fonction de F_1 (Peterka 1958). Domaines du ressaut : ① ressaut de transition, ② ressaut bon, ③ ressaut acceptable, ④ ressaut moins accepté-----	13
Figure 1.10 : (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique-----	14
Figure 1.11 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 (—) Courbe tracée selon la relation (1.30), (-----) courbe tracée Selon la relation (1.31)-----	16
Figure 1.12 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince-----	17
Figure 1.13 : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince pour quelques valeurs de x/h_2 , selon Forster et Skrinde (1950)-----	17
Figure 1.14 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de x/h_2 -----	18
Figure 1.15 : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions-----	29
Figure 1.16 : 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 (1.31)-----	20
Figure 1.17 : Ressaut forcé par marche positive de hauteur s , les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions-----	20

Figure 1.18 : 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)-----	21
--	----

Chapitre II

Figure 2.1 : Vue schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut en canal trapézoïdal. (→) Courants de surface, (↔) courants de fond-----	26
Figure 2.2 : Hauteur conjuguées $Y=h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M=mh_1/b$ -----	27
Figure 2.3 : Hauteur conjuguées $Y=h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M=mh_1/b$, (—) : équation 2.4 ; (.....) $M=0$; (▼) $M=0.1$; (■) $M=0.2$; (▲) $M=0.3$; (●) $M=0.4$; (⊖ · ⊖) $M = \infty$ -----	28
Figure 2.4 : Croquis de définition-----	29
Figure 2.5 : Caractéristiques principales du rouleau de fond : a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximale adimensionnelle h_b/h_2 en fonction de F_1 , et de M . (▼) $M=0.1$; (■) $M=0.2$; (▲) $M=0.3$; (●) $M=0$ -----	29
Figure 2.6 : Longueur relative λ_s de courant de retour latérale. (▼) $M=0.1$; (■) $M=0.2$; (▲) $M=0.3$; (●) $M=0.4$ -----	30
Figure 2.7 : Longueur relative λ_j de ressaut en fonction de F_1 et de M . (▼) $M=0.1$; (■) $M=0.2$; (▲) $M=0.3$; (●) $M=0.4$. (.....) Pour un ressaut en canal Rectangulaire -----	31
Figure 2.8 : Schéma de définition du ressaut hydraulique -----	32
Figure 2.9 : Dissipation relative d'énergie : $\eta = \frac{\Delta H}{H_1}$, fonction de F_1 et de M -----	34
Figure 2.10 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 (O) ressaut contrôlé par seuil mince ; (□) ressaut contrôlé par marche positive ; (Δ) ressaut forcé de type A par marche positive ; (-----) courbe tracé selon la relation théorique-----	35
Figure 2.11 : Variation du rapport S de la marche en fonction du nombre de Froude F_1 . (▲) Ressaut contrôlé par marche ; (□) ressaut contrôlé par seuil mince ; (⋈) ressaut forcé de type A par marche positive-----	36
Figure. 2.12 : Variation de la position de la marche X en fonction du nombre de Froude F_1 . (▲) Ressaut contrôlé par marche ; (□) ressaut contrôlé par seuil mince ; (⋈) Ressaut forcé de type A par marche positive-----	37
Figure 2.13 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . (▲) Ressaut contrôlé par marche ; (□) ressaut contrôlé par seuil mince ; (⋈) ressaut forcé de type A par marche positive-----	37

Chapitre III

Figure 3.1 : Photographies du barrage Daecheong (Corée du sud), a) maquette du barrage, b) vue en aval du barrage-----	40
--	----

Figure 3.2 : Notation a) vue en plan, b) vue longitudinale. Index 1 : section initiale. Index 2 : section finale-----	40
Figure 3.3 : Le Ressaut repoussé Selon Rajaratnam et Subramanya (1968), (---) ondes croisées (—) pied du ressaut-----	41
Figure 3.4 : Le ressaut spatial selon Herbrand (1973)-----	42
Figure 3.5 : Configuration expérimentale de Nosedá (1963). (---) les ondes croisées ; (—) schéma du pied du ressaut sous un niveau aval variable-----	43
Figure 3.6 : Les résultats expérimentaux de Rajaratnam et Subramanya (1968). (○) $\beta = 1.2$; (●) $\beta = 1.5$; (Δ) : $\beta = 2.0$ et (\blacktriangle) $\beta = 3.0$; (—) Eq. (3.3), (---) Eq. (3.4) pour $\beta=2$; (-.-) pour $\beta=1.2$ -----	45
Figure 3.7 : Installation expérimentale selon Unny, (---) volume de contrôle et schéma de la typologie de l'écoulement dans un canal élargi et asymétrique. $b_1=0.285\text{m}$; $b_2=0.57\text{m}$ -----	46
Figure 3.8 : Variation du coefficient des hauteurs conjuguée Y en fonction du nombre de Froude amont F_1 pour différents coefficients de forme $\omega_1=h_1/b_1$ (Unny 1961 (Selon Rajaratnam (1967)) -----	47
Figure 3.9 : Schéma illustrant l'application de l'équation de quantité de mouvement au ressaut spatial selon Herbrand (1973)-----	48
Figure 3.10 : Comparaison de toutes les valeurs mesurées avec des exemples calculés d'après les formules (3.11) et (3.12)-----	50
Figure 3.11 : L'installation expérimentale de Sharma (1964). (---) les frontières du volume de contrôle AODE. A-F : paroi avancée, $b_1 = 1\text{m}$; $b_2=2\text{m}$ -----	52
Figure 3.12 : Variation du paramètre ψ (X_i). (●), pour $B=3$; (—) équation (3.18) ; (□) équation (3.19)-----	53
Figure 3.13 : Rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de la position du pied du ressaut pour divers rapports d'élargissement selon l'équation (3.20)-----	54
Figure 3.14 : Rendement η du ressaut du type T en fonction de F_1 pour diverses positions du pied du ressaut X_i et a). $B=5$; b). $B=3$; (----) $\eta^*(F_1)$ du ressaut classique-----	55
Figure 3.15 : La longueur relative L_j/L_j^* du ressaut de type T en fonction de la position relative du pied du ressaut pour $B=3$; (—) équation (3.21)-----	56
Figure 3.16 : Asymétrie du ressaut du type T, ΔY_a en fonction de X_i pour $\beta=3$. a) canal LCH1 ; b) canal LCH2 (---) limite pour le ressaut symétrique-----	57
Figure 3.17 : Le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude amont F_1 avec géométrie symétrique, pour plusieurs valeurs du paramètre δ , a) $\beta=0.2$; b) $\beta=0.5$ -----	58

Figure 3.18 : Le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude amont F_1 avec géométrie asymétrique, pour plusieurs valeurs du paramètre δ , a) $\beta= 0.2$; b) $\beta= 0.5$ -----	59
Figure 3.19 : Le rendement η en fonction du nombre de Froude amont F_1 avec géométrie symétrique, pour plusieurs valeurs du paramètre δ , a) $\beta= 0.2$; b) $\beta= 0.5$ -----	61
Figure 3.20 : Le rendement η en fonction du nombre de Froude amont F_1 avec géométrie asymétrique, pour plusieurs valeurs du paramètre δ , a) $\beta=0.2$; b) $\beta=0.5$ -----	62
Figure 3.21 : La longueur relative du ressaut en fonction du paramètre δ pour deux rapport d'élargissement ; symétrique et asymétrique. a) $\beta= 0.2$; b) $\beta=0.5$ -----	63
Figure 3.22 : Schéma du canal avec des configurations typique : a) dissipateur avec une pente vers le haut ; b) dissipateur avec pente vers le bas-----	65
Figure 3.23 : Profil de la Vitesse longitudinale à travers la section de mesure pour six (06) hauteurs d'eau aval pour les quatre configurations choisies-----	67
Figure 3.24 : Les courbes d'efficacité pour les quatre configurations choisies, montre la variation de $\beta_L^* v_{m2}$ en fonction de h/h_T ; a) comparaison des quatre configurations ; b) comparaison les quatre configurations avec les configurations de référence sans le système-----	68

Deuxième partie

Chapitre I

Figure 1.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal, ayant servi à l'expérimentation-----	75
Figure 1.2 : Photographie du modèle expérimental -----	76
Figure 1.3 : Pompe centrifuge et vanne de régulation du débit-----	76
Figure 1.4 : Photographie du déversoir sans hauteur de pelle avec contraction latérale-----	76
Figure 1.5 : Photographie d'une boîte en charge-----	77
Figure 1.6 : Photographie d'une série de convergent-----	77
Figure 1.7 : Photographie des seuils utilisés dans l'expérimentation-----	77
Figure 1.8 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique-----	78

Chapitre II

Figure 2.1 : Les principales caractéristiques mesurées du ressaut formé complètement dans le canal trapézoïdal-----	82
Figure 2.2 : Photographies du ressaut formé complètement dans le canal trapézoïdal a) selon le sens de l'écoulement ; b) au sens inverse à l'écoulement.-----	83
Figure 2.3 : Les principales caractéristiques mesurées du ressaut formé partiellement dans le canal trapézoïdal (ressaut de transition).-----	83

Figure 2.4 : Photographies du ressaut formé partiellement dans le canal trapézoïdal (ressaut de transition); a) illustration à la tendance à l'écoulement asymétrique ; b) forme du pied du ressaut.-----	84
Figure 2.5 : Les principales caractéristiques mesurées du ressaut dont le pied est situé à la section élargie (ressaut spatial).-----	84
Figure 2.6 : Photographies du ressaut dont le pied est situé à la section élargie (ressaut spatial) ; a) photographie selon le sens d'écoulement ; b) au sens inverse à l'écoulement. Région ① avec le sens d'écoulement ; ② inverse au sens d'écoulement.-----	85
Figure 2.7 : Photographie de la forme oblique du pied du ressaut-----	85
Figure 2.8 : Photographie de l'ensemble du phénomène-----	86
Figure 2.9 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre du Froude F_1 , pour des intervalles de rapport d'occupation X_i , (\times) $X_i=0$; (\square) $0 \leq X_i \leq 0,2$; ($+$) $0,2 \leq X_i \leq 0,4$; (\diamond) $0,4 \leq X_i \leq 0,6$; (\circ) $0,6 \leq X_i \leq 0,8$; (Δ) $0,8 \leq X_i \leq 1$; ($-$) $X_i=1$, (---) courbe d'ajustement-----	87
Figure 2.10 : Variation des facteurs a et b en fonction du rapport d'occupation X_i , (\circ) a ; (Δ) b , (---) courbe d'ajustement pour l'intervalle $0,4 \leq X_i \leq 1$ -----	91
Figure 2.11 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction de $\Psi(F_1, X_i)$ exprimée par l'équation (2.4) pour $0,40 \leq X_i \leq 1,00$; (\circ) Y_{exp} du ressaut ; (---) première bissectrice -----	92
Figure 2.12 : Variation des facteurs a' et b' en fonction du rapport d'occupation X_i , (\circ) a' ; (Δ) b' , (---) courbe d'ajustement pour l'intervalle $0,0 \leq X_i \leq 0,4$ -----	93
Figure 2.13 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction de $f(F_1, X_i)$ exprimée par l'équation (2.8) pour $0,0 \leq X_i \leq 0,4$; (\circ) Y_{exp} du ressaut ; (---) première bissectrice-----	94
Figure 2.14 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$. (\circ) points expérimentaux. (\longrightarrow) Courbe d'ajustement -----	95
Figure 2.15 : Variation de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ en fonction du nombre du Froude F_1 , Pour des intervalles du rapport d'occupation X_i ; (\times) $X_i=0,0$; (\square) $0,0 \leq X_i \leq 0,2$; ($+$) $0,2 \leq X_i \leq 0,4$; (\diamond) $0,4 \leq X_i \leq 0,6$; (\circ) $0,6 \leq X_i \leq 0,8$; (Δ) $0,8 \leq X_i \leq 1$; ($-$) $X_i=1$; (---) courbe d'ajustement-----	97
Figure 2.16 : Variation des facteurs a et b en fonction du rapport d'occupation X_i , (\circ) a ; (\square) b , (---) courbe d'ajustement pour l'intervalle $0,40 \leq X_i \leq 1$ -----	101
Figure 2.17 : Variation des facteurs a'' et b'' en fonction du rapport d'occupation X_i , (Δ) a ; (\times) b , (---) courbe d'ajustement pour l'intervalle $0,40 \leq X_i \leq 1$ -----	102
Figure 2.18 : Variation de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0,0 \leq X_i \leq 1$ -----	104

Figure 2.19 : Variation de la longueur relative du rouleau de surface $\lambda r = Lr/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0,0 \leq X_i \leq 1$ -----	106
Figure 2.20 : Variation de la longueur relative du ressaut $L_j/L_{j_{ref}}$ en fonction du rapport d'occupation X_i ; (\circ) points expérimentaux (\dots) $L_j/L_{j_{ref}} = 1$ -----	107
Figure 2.21 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 ; (\circ) pour $X_i=1$; (Δ) pour $0,4 \leq X_i \leq 1$; (+) pour $0,0 \leq X_i \leq 0,4$; (\square) pour $X_i=0$ -----	110
Figure 2.22 : Variation de la différence relative des hauteurs conjuguées du ressaut $\Delta Y/Y$ en fonction du rapport d'occupation X_i ; (\circ) points expérimentaux-----	113

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- Achour. B., Sedira.N., Debabeche. M. (2002).* Ressaut contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire, LARHYSS Journal, N°.01, Mai 2002.
- Andersen J, V. M., (1978).* Undular hydraulic jump, Proc, ASCE, J, Hydraulics Division, Vol. 104, pp. 1185-1188.
- Bakhmeteff, B. A., Matzke, A. E. (1936).* The Hydraulic Jump terms of dynamic similarity, Transactions, American society of civil engineers, Vol.101, pp, 630-647.
- Belanger, J.B., (1828).* Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes, Carilian-Goëury, 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.
- Bremen, R. (1990).* Expanding Stilling Basin. Laboratoire de constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, Communication No. 3.
- Bremen, R., Hager .Willi, H. (1993).* T-jump in abruptly expanding channel, Journal of Hydraulic Research. Vol 31, N°01, 1993.
- Bremen, R., Hager, W. H. (1994).* Expanding stilling basin. Proc.ICE Water Mar. Energy, 106(3), 215–228
- Bretz, N., V., (1988).* Ressaut Hydraulique Forcé par seuil, Laboratoire de constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, Communication No. 2.
- Carlier, M., (1980).* Hydraulique Générale et Appliquée 1^{er} édition.
- Debabeche, M., Achour, B., (1996).* Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, 1^{er} Séminaire Maghrébin sur l'eau, Université de Tizi-Ouzou.
- Debabeche, M., (2003).* Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Debabeche, M., (1996).* Contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, Thèse de Magistère, Université de Biskra.
- Debabeche, M., Achour, B., (2006).* Effet du seuil sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. Journal of Hydraulic Research (article accepté pour publication en 2007).
- Debabeche, M., Achour, B., (2007).* Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel. Journal of Hydraulic Research, Vol. 45(1), pp. 135-139.

Debabeche, M., Lakehal, M., Mansri, N. and Achour b., (2008). Theoretical study of the forced hydraulic jump by positive step in a triangular channel. Journal of fluid mechanics research, Vol. 35(4), pp. 318-326.

Debabeche, M., Lakehal, M., Mansri, N. and Achour b., (2006). Ressaut hydraulique force par marche positive. The third international conference on the 'Water Resources in the Mediterranean Basin', watmed 3 – Tripoli – Lebanon.

Einwachter, J. (1932). Zur Frage der Wassersprungberechnungen, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 27(14): 157-159. Selon Willi .H. Hager, (1992) Energy dissipators and hydraulic jump- p cm (Water science and technology library v. 8).

Forster, J. W. and Skrinde, R. A., (1950). Control of Hydraulic jump by sills, Trans. ASCE, 115,973-1022.

Hachemi rachedi, L., (2006). Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, mémoire de magistère en science hydrauliques, Département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

Hager, Willi .H., (1992). Energy dissipators and hydraulic jump- p cm (Water science and technology library v. 8).

Hager, W.H., (1993). Classical Hydraulic Jump: free surface profile. Can. J. Civ. Eng. 20, 536-539 (1993).

Hager, W.H., Bremen. R., (1989). Classical hydraulic jump: sequent depth, J. Hydraulic Research Vol. 27, 1989, No. 5 pp. 565-585.

Hager, W. H., Bremen R., Kawogoshi N. (1990). Classical hydraulic jump; length of roller, J. Hydraulic research 28(5), 591-608.

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. H., Wanoschek, R., (1987). Hydraulic jump in triangular channel, J. Hydraulic Research, Vol.25, n°5,549-564

Harleman, D.R.F: (1959): Discussion to Rouse, et al. (1959), Trans. ASCE. Vol. 124: 959-962.

Herbrand, K. (1973). The Spatial Hydraulic Jump, Journal of Hydraulic Research, 11: N°, 03, 205-218.

Kateb. S., Debabache. M., Benmalek. A. (2013)

Lauffer, H, (1935). Wassersprung bei kleinen Sprunghohen. Wasserwirtschaft und Technik 28 (11/12):137-140, selon Willi .H. Hager. (1992) Energy dissipators and hydraulic jump- p cm (Water science and technology library v. 8).

Noseda, G. (1963). La Formazione del Risalto Lungo una Corrente Veloce in Espansione. VIII Convegno di Idraulica, Pisa, A4: 1-11

Noseda, G. (1964). Un Fenomeno di Instabilia del Risalto Lungo una Corrente Veloce in Espansione. L'Energia Elettrica 41 (4):249-254.

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

Peterka, A, J, (1958): Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. US Department Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph, 25 (appeared as 7th Printing in 1983).

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

Rajaratnam, N. (1962). Profile Equation For the Hydraulic Jump. Water power 14 (AUG): 324-327. Discussion 1962, 14(Nov):424. Selon *Willi .H. Hager, (1992)* Energy dissipators and hydraulic jump- p cm (Water science and technology library v. 8).

Rajaratnam, N. (1967): Hydraulic Jumps. In Advances in Hydrosiences, 4:197-280, ed. V.T: Chow, Academic Press: New York.

Rajaratnam, N. Subramanya, K. (1968). Profile of the Hydraulic Jump, Proc. ASCE, J. Hydraulics Division 94 (HY3): 663-673. Discussions 1969, 95(Hy1): 546-557; 1969, 95(HY2): 725-727, 1970, 96 (HY2): 579-580.

Rajaratnam, N. Subramanya, K. (1968). Hydraulic Jumps below Abrupt Symmetrical Expansions. Proc. ASCE, J. Hydraulics Division 94(HY2): 481-503. Discussion 1969, 95(Hy2):723-724;:1970, 96(Hy2):579.

Rouse, H., Bhootha, B.V. & Hsu, E.Y. (1951): Design of Channel Expansions. Trans. ASCE 116: 326-346.

Rouse, H. & Jezdinsky, V. (1965): Cavitation and Energy Dissipation in Conduit Expansions. X/ IAHR Congress Leningrad, 1(28): 1-7.

Rouse, H., Tien To Siao., Nagaratnam, S. (1959): Turbulence Characteristics of the Hydraulic Jump. Trans. ASCE 124: 926-966.

Safranez, K. (1929). Untersuchungen Uber den Wechselsprung. Bauingenieur 10(37): 649-651: 10(38): 668-677. Selon *Willi .H. Hager, (1992)* Energy dissipators and hydraulic jump- p cm (Water science and technology library v. 8).

Sarma, K, V, N. Newnham, D, A. (1973). Surface profiles of Hydraulic Jump for Froude Numbers less than Four, Water Power 25(Apr) : 139-142. Selon *Willi .H. Hager, (1992)* Energy dissipators and hydraulic jump- p cm (Water science and technology library v. 8).

Schroder, R., (1963). Die turbulente Stromung im freien Wechselsprung. Habilitationsschrift, Mitteilung 59, Institut fur Wasserbau und Wasserwirtschaft, RU Berlin, ed. H. Press : Berlin

Scorzini. A. R.. Di Bacco. M.. Leopardi. M. (2015). Experimental Investigation on a System of Crossbeams As Energy Dissipator in Abruptly Expanding Channels.

Sharma, H. R. (1963). Der raumliche Wechselsprung und seine Probleme. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden, Heft 6, 1963.

Sharma, H.R. (1965): Der geknickte Wechselsprung. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universitiit Dresden 14(1): 73-79.

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

Wanoschek. R. Hager, W. H.,(1989): Hydraulic jump in trapezoidal channel, J. Hydraulic Research, Vol.27, n°3,426-446

Zare H. K.. Doering. J.C.. (2011). Forced Hydraulic Jump below Abrupt Expansions, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 137, N°08. August 1. 2011. 825-835.