

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

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



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

Ref :.....

جامعة محمد خيضر بسكرة

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Doctorat en sciences**  
Spécialité : Hydraulique  
Option : Sciences Hydrauliques

**ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE  
DE QUELQUES TYPES DE RESSAULTS  
HYDRAULIQUES DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL**

Présentée par :

**KATEB SAMIR**

Maître Assistant-A- Université Kasdi Merbah Ouargla

Soutenue publiquement le .....

**Devant le jury composé de :**

<b>ACHOUR Bachir</b>	<b>Professeur</b>	<b>Président</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>DEBABECHE Mahmoud</b>	<b>Professeur</b>	<b>Encadreur</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>BOUZIANE M. Tewfik</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>DJEMILI Lakhdar</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université d'Annaba</b>
<b>BOUDOUKHA Abderrahmane</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Batna</b>
<b>REMINI Boualem</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Blida</b>

# SOMMAIRE

## INTRODUCTION GENERALE

### Première Partie

#### **ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE**

INTRODUCTION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE .....	1
--	---

### Chapitre I

#### **RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE**

I.1. Introduction.....	2
I.2. Ressaut hydraulique classique.....	3
I.2.1. Classification du ressaut classique.....	3
I.3. Approche de HAGER et WANOSCHEK (1989).....	6
I.3.1. Généralités .....	6
I.3.2. Description des essais.....	6
I.3.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	6
I.3.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire .....	8
I.3.3.2. Cas particulier du canal triangulaire .....	9
I.3.4. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	10
I.3.4.1. Longueur du rouleau .....	10
I.3.4.2. longueur du rouleau de fond.....	11
I.3.4.3. Longueur du ressaut.....	12
I.3.5. Rendement du ressaut.....	13
I.4. Conclusion .....	15

### Chapitre II

#### **RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINE**

II.1. Introduction .....	16
II.2. Classification des ressauts inclinés .....	16
II.2.1. Ressaut hydraulique de type C et de type D .....	17
II.3. Classification du ressaut en contre pente .....	18
II.4. Travaux de MC CORCODAL et al (1994) .....	19
II.5. Travaux de PAGLIARA et PERUGINELLI (2000) .....	23
II.6. Travaux DEBABECHE et al (2009) .....	26
II.6.1. Analyse théorique.....	26
II.6.2. Analyse expérimentale.....	29

---

II.6.2.1. Détermination du coefficient K.....	29
II.6.2.2. Relation explicite du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ et de l'angle d'inclinaison $\alpha$ du canal .....	29
II.6.3. Longueurs caractéristiques du ressaut .....	30
II.6.3.1. Variation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	30
II.7. Conclusion .....	31

### Chapitre III

#### **RESSAUT HYDRAULIQUE FORCÉ PAR MARGE**

III. 1. Introduction .....	33
III.2. Travaux de HAGER et SINNIGER (1986) .....	33
III.3. Travaux de HAGER et BRETZ (1987).....	36
III.4. Travaux de DEBABECHE et al (2008) .....	38
III.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut .....	38
III.4.2. Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de Froude .....	39
III.4.3. Longueur relative du bassin .....	41
III.5. Conclusion .....	42
CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE.....	43

### Deuxième partie

#### **RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ PAR SEUIL DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL À PENTE VARIABLE**

INTRODUCTION À LA DEUXIÈME PARTIE.....	45
--	----

#### Chapitre I

#### **ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ PAR SEUIL DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL À PENTE VARIABLE**

I.1. Introduction .....	46
I.2. Description du modèle .....	46
I.2.1. Description du canal .....	46
I.2.2. Débitmètre électromagnétique .....	49
I.2.3. Limnimétrie .....	50
I.3. Résultats expérimentaux .....	51
I.3.2. Analyse des résultats expérimentaux .....	54
I.3.2.1. Ressaut hydraulique à pente positive et négative .....	54
I.3.2.1.1. Variation de la hauteur relative du seuil $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	54
I.3.2.1.2. Variation de la longueur relative $L_r/h_1$ du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	61

---

I.3.2.2. Rendement du ressaut hydraulique .....	65
I.4. Exemple d'application.....	69
I.5. Conclusion .....	70

## Chapitre II

### **ETUDE THEORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL A PENTE POSITIVE**

II.1. Introduction.....	72
II. 2. Equation de la quantité de mouvement.....	72
II.3. Nombre de Froude .....	75
II.4. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F1 et de l'angle d'inclinaison $\alpha$ du canal .....	79
II.5. Exemple d'application.....	85
II.6. Conclusion.....	86
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE.....	87

## Troisième partie

### **RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE ET FORCE -A PAR MARCHE POSITIVE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL**

INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE.....	89
--	----

#### Chapitre I

### **ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE ET FORCE PAR MARCHE POSITIVE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL**

I.1. Introduction.....	90
I.2. Description du modèle .....	90
I.2.1. Description du canal .....	90
I.2.2. Mesure du débit .....	93
I.2.3. Limnimétrie .....	94
I.2.4. Marches positives .....	94
I.3. Résultats expérimentaux .....	95
I.3.1. Procédure expérimentale .....	95
I.3.2. Analyse des résultats expérimentaux .....	99
I.3.2.1. Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive .....	99
I.3.2.1.1 Variation de la hauteur relative du seuil $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	99
I.3.2.1.2. Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de Froude .....	103

---

I.3.2.1.3. Position relative de la marche en fonction de nombre de Froude .....	104
I.3.2.1.4. Longueur relative du rouleau .....	106
I.3.2.1.5. Longueur relative du ressaut .....	108
I.3.2.2. Ressaut hydraulique forcé type -A .....	110
I.3.2.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut .....	110
I.3.2.2.2. Hauteur relative de la marche en fonction de nombre de Froude .....	111
I.3.3. Etude comparative entre le ressaut contrôlé par seuil mince et forcé par marche positive..	113
I.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut .....	113
I.3.3.2. hauteurs relative de la marche positive .....	114
I.3.4. Rendement du ressaut hydraulique .....	115
I.3.5. Exemple d'application.....	117
I.5. Conclusion.....	120

## Chapitre II

### APPROCHE THEORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DE TYPE A FORCE PAR MARCHE POSITIVE

II.1. Introduction .....	122
II.2. Equation de la quantité de mouvement .....	122
II.3. Analyse dimensionnelle .....	127
II.4. Comparaison entre la relation théorique et les résultats expérimentaux .....	129
II.4.1. Ecart relatif entre le nombre de Froude issu de la relation universelle avec celui issu de la relation théorique .....	129
II.4.2. Correction de la relation théorique par les mesures expérimentales .....	132
II.5. Ajustement de la relation théorique .....	133
II.6. Conclusion.....	135
CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE.....	138
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	142
PRINCIPALES NOTATIONS.....	143
LISTE DES TABLEAUX .....	145
LISTE DES FIGURES.....	147
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	155

---

# Remerciement

Je tiens à remercier vivement mon directeur de thèse promoteur et frère Monsieur DEBABECHE Mahmoud, professeur à l'université de Biskra qui n'a, à aucun moment, cessé de prodiguer ses aides et assistance scientifique et moral, afin de rendre mon travail plus aisé mon travail pour l'achèvement de cette thèse.

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

Je remercie aussi Monsieur BOUZIANE M. Tewfik, Professeur et Chef du Département Génie Civil & hydraulique pour m'avoir accueilli au sein du département mais également pour sa participation au jury.

Je remercie cordialement DJEMILI Lakhdar, Professeur de l'université d'Annaba et BOUDOUKHA Abderrahmane, Professeur de l'université de Batna d'avoir accepté d'examiner ma thèse de doctorat. Je souhaite adresser également mes remerciements à REMINI Boualem, professeur de l'université de Blida d'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail.

---

## RESUME

### **Résumé:**

Cette recherche a pour but d'étudier d'une manière théorique et expérimentale les différents types de ressauts hydrauliques évoluant dans un canal trapézoïdal. L'objectif principal étant la détermination des relations fonctionnelles pratiques permettant le dimensionnement des bassins de dissipation de charge hydraulique à l'aval des barrages, ainsi que le dimensionnement des canaux d'irrigation. En effet, il a été étudié d'une manière théorique et expérimentale les caractéristiques de deux types de ressauts hydrauliques : le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal à pente variable et le ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive. Cependant, pour mener à bien cette étude il a été nécessaire de concevoir et réaliser à l'échelle du laboratoire un canal de forme trapézoïdal.

**Mots clés :** ressaut hydraulique, ressaut forcé, canal trapézoïdal, marche positive, canal incliné.

---

**Abstract:**

This research aims to study in a theoretical and experimental way different types of hydraulic jumps evolving in a trapezoid channel. The main objective is the determination of practical functional relations allowing the design of the stilling basins at the upstream of dams, as well as the irrigation channels. Indeed, It was studied in a theoretical and experimental way the characteristics of two types of hydraulic jumps: the hydraulic jump evolving in a trapezoid sloped channel and the hydraulic jump controlled and forced by positive step. However, in order to get a successful outcomes it was necessary to design and realize on the scale of the laboratory a trapezoid channel.

**Keywords:** hydraulic jump, forced jump, trapezoidal channel, positive step, abrupt channel.

---

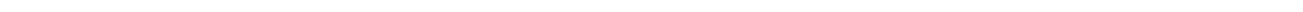


## ملخص:

منذ فجر القرن التاسع عشر ورغم التطور المائل للنمذجة الرياضية شكلت النماذج الفيزيائية المصغرة الوسيلة التي لا مغيص عنها لمعالجة المشكلات المعقدة في مجال الهيدروليكي ( الجريان الحر لمياه.....), فإنجاز المنشآت المائية كمنشآت السدود و الحواجز المائية و حواجز الحماية من الفيض و غيرها يمكن أن يسبب أضرار بالغة السكان والممتلكات إذا صممت هذه المنشآت بطريقة تعوزها الدقة الكافية. ما فتى النموذج المصغر يوفر للتقنيين و المهندسين و أصحاب القرار و السكان الضمانات المنشودة لتوفير الحماية من الأخطار في بعديها لإنساني و الأقتصادي. تشغل مسألة تصميم الهيدروليكي أحواض التبريد حيزا هاما تناولته أبحاث عديدة في المدارس العالمية المختلفة. تناولت الدراسة في شطرها لأولى الدراسة النظرية والتجريبية للفتحة الهيدروليكية في قناة ذات شكل شبه منحرف مع ميل إيجابي. تم إيجاد علاقات عامة تظهر تأثير الانحدار الموجب قاعدة القناة على خصائص هذا النوع من الفتحات الهيدروليكية. المعادلات التي تم الحصول عليها هي بدون أبعاد، و ذلك لاستعمالها في الواقع. أما في الشطر الثانية تهدف الدراسة المقترحة إلى إجراء التحليل النظري والتجريبى للفتحة المائية و المجرية ذات النوع-أ- بالعتبة الموجبة داخل قناة مفتوحة شبه منحرفة الشكل جزئى هذه الدراسة إلى قسمين الأول ذو طابع تجريبى حيث سمح لنا بإيجاد علاقات تجريبية جيدة و كذا اثر العتبة الطويلة على خصائص الفتحة المائية وفي القسم الثانى و الأخير قمنا بمحاولة لإيجاد علاقة نظرية المتضمنة لمدى تأثير هذه العتبة الموجبة .

**الكلمات المفتاحية** للفتحة المائية، قناة مفتوحة شبه منحرفة الشكل، أحواض التبريد، الانحدار الموجب

# **INTRODUCTION GENERALE**



# INTRODUCTION GENERALE

Les ouvrages de retenue sont souvent soumis à de fortes crues, qu'il est nécessaire d'évacuer pour la sécurité de l'ouvrage. En effet, l'écoulement torrentiel provenant de l'évacuateur de crues du barrage est caractérisé par des forces tractrices présentant un caractère érosif. A cet effet, un ouvrage de retenue tel que le barrage est doté d'un dissipateur de charge hydraulique, nécessaire pour dissiper l'eau provenant du barrage afin de la restituer en régime fluvial vers la rivière. Il existe plusieurs moyens pour dissiper cette charge hydraulique, mais selon la bibliographie le moyen le moins onéreux et le plus pratique est certainement le ressaut hydraulique. Le ressaut hydraulique est la conséquence du passage de l'écoulement d'un régime torrentiel vers un régime fluvial. Le ressaut hydraulique trouve son application non seulement dans les barrages hydrauliques mais aussi dans d'autres domaines, tel que les canaux d'irrigation.

Depuis les années 80, l'étude de ce phénomène hydraulique a connue de nombreuses recherches, visant d'une part à décrire le ressaut hydraulique, et d'autre part à trouver les relations liant ses caractéristiques dans le but de dimensionner l'ouvrage de dissipation de charge.

Par ailleurs, les chercheurs ont classifié le ressaut hydraulique en différentes catégories relatives à sa configuration. En effet, la modification des conditions à l'amont (débit, hauteurs, ...etc.) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur, la pente du canal,...etc.) peut conduire à différentes configurations du ressaut (Debabeche et al, 2009). Le ressaut est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente nulle ou faible, sans obstacle à l'aval (Hager, Bremen et Kawagoshi, 1990). Il est dit contrôlé lorsque sa formation est conditionnée par la mise en place d'un obstacle (Hager et Bretz, 1988). Il est dit forcé lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle (Rand, 1957 ; Bretz, 1988).

L'ensemble des chercheurs ont confirmé que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. C'est en d'autres termes la seconde loi de Newton qui est appliquée, qui montre que la variation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut est égale à la résultante des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement (Debabeche et al, 2009).

L'application de la quantité de mouvement a eu pour but d'évaluer le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_1$  incident caractérisant l'écoulement à l'amont. La relation la plus simple est celle obtenue par Bélanger pour le cas du ressaut classique en canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible et dont la validité a été vérifiée par plusieurs auteurs (Debabeche et Achour (2007)). En effet, Bélanger (1928) est le premier à avoir présenté une relation exprimant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, appliquée au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal. Parmi les pionniers de l'étude du ressaut hydraulique on peut citer : Safranez (1927) qui a étudié expérimentalement le ressaut hydraulique classique et Bakhmeteff et Matzake (1936) qui ont travaillé sur le ressaut en canal à rectangulaire pente faible. Quant à Posey et Hsing (1938), ils ont abordé d'un point de vue expérimental le ressaut hydraulique dans le canal trapézoïdal.

Dans l'étude du ressaut hydraulique, ce qui a toujours intéressé les chercheurs c'est la détermination des dimensions du bassin de dissipation, afin d'assurer une dissipation complète de la charge hydraulique. Ces dimensions sont étroitement liées aux caractéristiques du ressaut et à la forme géométrique de la section du canal dans lequel il évolue.

Par ailleurs, le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal n'a pas fait l'objet de beaucoup d'études. Cependant, les études abordées ont en majorité été dédiées au ressaut à pente horizontale.

Parmi les travaux les plus intéressants sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal on peut citer ceux effectués par Silvester (1964) et Wanoschek et Hager (1989). Cependant, la première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné fut celle de Bakhmeteff et Matzké (1938), qui ont évoqué dans leur étude, le profil de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. Kindsvater (1944) classifiât les ressauts à pente positive en quatre principaux types : le type A, type B, type C et type D. Les études récentes concernant le ressaut dans les canaux inclinés ont été dirigées par Hager (1988) et Ohtsu et Yasuda (1991) mais toujours dans un canal rectangulaire. Debabeche et al (2009) ont étudié théoriquement le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$  incliné d'une pente positive. En 2010, Cherhabil a abordé dans sa thèse de doctorat le ressaut hydraulique dans deux profils de canaux inclinés : le canal triangulaire et le canal profilé en "U". Cette dernière étude a approché le sujet d'un point de vue théorique et expérimental. Par ailleurs, pour ce qui concerne le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, la première étude devrait être attribuée à 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 ont étudié en 1989 le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique à angle d'ouverture de 45°.

Le ressaut forcé par marche positive n'a connu que très peu d'études. Les recherches les plus récentes dans ce domaine, sont certainement celles de Hager et Bretz (1987), et celles de Hager et Sinniger (1986). Les auteurs ont abordé le ressaut forcé par marche positive dans un canal rectangulaire. Debabeche et al (2008) ont étudié le ressaut contrôlé et forcé par marche positive dans un canal triangulaire.

La présente étude s'intéresse à l'analyse théorique et expérimentale de quelques types de ressauts hydrauliques évoluant dans un canal trapézoïdal. En effet, il a été abordé le ressaut contrôlé par seuil mince dans canal trapézoïdal à pente variable et le ressaut hydraulique contrôle et forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal. L'étude a nécessité trois parties :

➤ la première partie, travers laquelle nous passerons en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans les canaux inclinés d'une part, et les études relatives au ressaut forcé et contrôlé par marche positive d'autre part. Cette partie bibliographique sera divisée en trois chapitres.

✓ Dans le premier chapitre nous allons donner un bref aperçu sur le ressaut hydraulique classique, ensuite nous passerons en revue les travaux de Hager et Wanoschek (1989) relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal

✓ Le second chapitre présente les travaux les plus intéressants dans le domaine du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince dans les canaux inclinés.

✓ Le troisième chapitre sera consacré à l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire. Les travaux les plus récents dans ce domaine sont ceux de Hager et Wanoschek (1987). Nous allons également passer en revue l'étude de Debabeche et al (2008) concernant l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire.

➤ La deuxième partie de notre étude, consiste à analyser expérimentalement et théoriquement les caractéristiques des ressauts hydrauliques évoluant dans un canal trapézoïdal à pente variable. L'objectif principal de cette étude est de déterminer expérimentalement les relations fonctionnelles liant les différents paramètres de ces deux types de ressaut hydraulique, ce volet de notre travail a été divisé en deux chapitres :

✓ Le premier chapitre a pour objectif d'étudier, d'un point de vue expérimental, le ressaut hydraulique, dans un canal trapézoïdal symétrique, incliné d'une pente positive. Des relations fonctionnelles, en terme adimensionnel, liant les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'influence de la pente du fond du canal sur les caractéristiques du ressaut, seront proposées.

✓ Le deuxième chapitre sera consacré à l'établissement des relations théoriques qui régissent le ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale à pente variable. L'application de l'équation de la quantité de mouvement montre que ce type de ressaut est régi par trois paramètres pouvant former une relation fonctionnelle de la forme :  $f(F_1, Y, \alpha) = 0$ .

➤ L'objectif principal de la troisième partie est de déterminer expérimentalement les relations fonctionnelles liant les différents paramètres de ces deux types de ressaut hydraulique. Dans le but d'organiser ce travail, nous avons divisé cette partie de notre étude en deux chapitres :

✓ Le premier chapitre sera consacré à l'étude expérimentale de deux types de ressaut hydraulique : le ressaut hydraulique contrôlé et le ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive. Pour ces deux ressauts, nous présenterons une analyse complète des résultats obtenus au laboratoire. A travers cette étude nous examinerons l'effet de la marche positive sur les caractéristiques physiques du ressaut hydraulique.

✓ Le deuxième chapitre de notre travail consiste à développer théoriquement, par l'application de l'équation de la quantité de mouvement : en premier lieu la relation liant le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale, en deuxième lieu, le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident puis, le rapport de forme  $M$ , et en dernier lieu la hauteur relative  $S$  de la marche positive.

La thèse a été clôturée par une conclusion générale dans laquelle une discussion sur les résultats obtenus a été présentée.

---

## **PREMIERE PARTIE**

### **ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE**

**CHAPITRE I : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL**

**CHAPITRE II : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINE**

**CHAPITRE III : RESSAUT HYDRAULIQUE FORCE TYPE-A PAR MARCHE**

---

## INTRODUCTION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette première partie de notre étude bibliographique a pour but principal, de passer en revue les travaux les plus intéressants, ayant abordé le ressaut hydraulique en canal rectangulaire et triangulaire d'une part, incliné ou avec marche positive d'autre part.

Cette partie est scindée en trois chapitres.

✓ Le premier chapitre de cette partie de notre étude sera consacré à l'étude du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, où nous examinerons essentiellement les travaux de BRADLEY et PETERKA (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de HAGER (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

✓ Le second chapitre Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal à pente variable, n'a connu que de très peu d'études. Les travaux les plus intéressants dans ce domaine sont ceux d'étude de Mc Corcodal et al (1994), Pagliara et Peruginelli (2000) concernant le ressaut hydraulique dans les canaux contre pente. Ainsi que ceux, plus récemment sont ceux, de Debabeche et al (2009) qui ont effectué une étude expérimentale sur le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince dans canal triangulaire a pente variable.

✓ Le troisième chapitre sera consacré au ressaut hydraulique forcé par marche positive n'a connu que de très peu d'études, les recherches les plus récentes dans ce domaine, sont certainement celles de Hager et Bretz (1987), celles de Hager et Sinniger (1986), ces auteurs ont abordé le ressaut forcé par marche positive dans un canal rectangulaire. Debabeche et al (2008) ont étudié le ressaut contrôlé et forcé par marche positive dans un canal triangulaire.



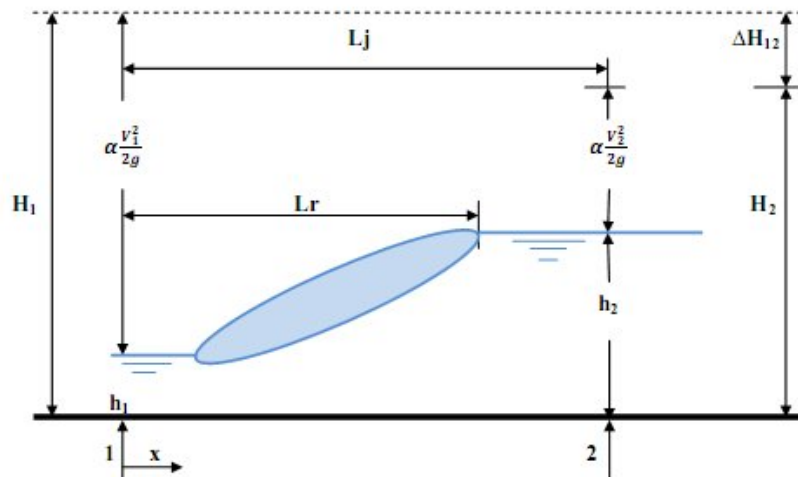
## Chapitre I

### RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL

#### I.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous allons donner un bref aperçu sur le ressaut hydraulique classique, ensuite nous passerons en revue les travaux de Hager et Wanoschek (1989) relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal de pente géométrique horizontale, à parois latérales inclinées d'un angle de 45°.

Le ressaut hydraulique est une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement permanent, qui se produit lors du passage du régime torrentielle au régime fluvial. Il est accompagné d'une agitation marquée et de grandes pertes d'énergie. (Figure 1.1).



*Figure 1.1: Ressaut Hydraulique*

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

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

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

## **I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE :**

Le ressaut hydraulique désigne le passage de l'écoulement torrentiel (ou supercritique) à l'écoulement fluvial (sub-critique). Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur  $L_r$  appelée longueur du rouleau. Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible. Les caractéristiques du ressaut sont essentiellement les longueurs  $L_r$  et  $L_j$ , qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut, et les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$ , appelées également hauteurs conjuguées.

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ses sections initiale et finale. L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un nombre de Froude  $F_1 > 1$  étroitement lié au débit volumique, à la hauteur initiale  $h_1$  ainsi qu'à la forme géométrique du canal.

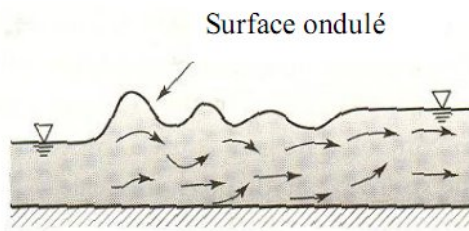
On s'accorde à dire que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude  $F_1$ .

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

### **1.2.1. Classification du ressaut classique**

La classification du ressaut classique est basée sur la variation du nombre de Froude  $F_1$  caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut. Pour les valeurs de  $F_1 = 1$ , le régime est lent, ou critique, et il n'y a pas de ressaut. Pour des valeurs de nombre de Froude comprise entre

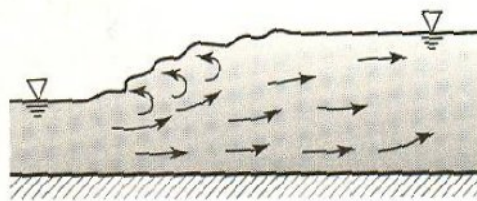
1 et 1.7 et cela d'après Andersen (1978), la différence des profondeurs conjuguées en amont et en aval est très faible, et le ressaut est caractérisé par de légères rides à la surface libre, aspect qui diffère peu de celui que l'on observe dans le régime critique, c'est le ressaut ondulé (figure 1.1.a).



**Figure 1.1.a:** Ressaut ondulé

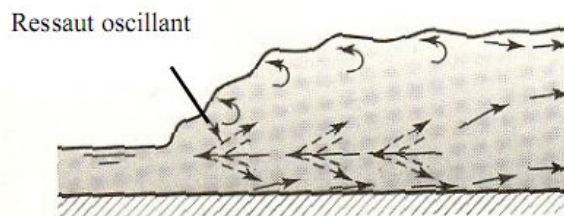
Selon la classification de *Bradly et Peterka* (1957) on distingue quatre formes de ressaut classique.

1- LE PRE-RESSAUT avec  $1,7 < F_1 < 2,5$  (figure 1.1,b) : La surface du ressaut est composée d'une série de petits rouleaux pour  $F_1 = 1,7$  ; ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude  $F_1$  augmente. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible.



**Figure 1.1.b:** le Pré-ressaut

2- LE RESSAUT DE TRANSITION avec  $2,5 < F_1 < 4,5$  (figure 1.1,c) : Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.



**Figure 1.2.c :** Le ressaut de transition

3 - LE RESSAUT STABLE obtenu pour la gamme  $4,5 < F_1 < 9$  (figure 1.1,d) : C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans les bassin de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

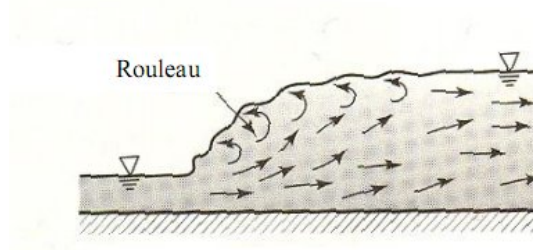


Figure 1.2.d : Le ressaut stable

4 - LE RESSAUT AGITE OU CLAPOTEUX obtenu pour  $F_1 > 9$  (figure 1.1,e) : Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très élevée. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.

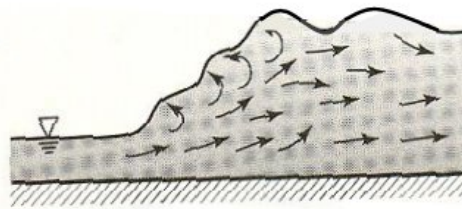


Figure 1.1.e : Ressaut agité.

### I.3. Approche de HAGER et WANOSCHEK (1989)

#### I.3.1. Généralités

La première étude concernant le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal est probablement celle de POSEY et HSING (1938). Ils ont constaté que le rapport des hauteurs conjuguées observées s'ajuste bien avec les prédictions basées sur l'approche dynamique classique. Toutefois, les caractéristiques d'écoulement ont été jugées tout à fait différentes de celles rencontrées dans des canaux rectangulaires. La longueur  $L_j$  du ressaut hydraulique dans des canaux trapézoïdaux mesurée le long de l'axe du canal a été jugée moins définie que dans le canal rectangulaire. SANDOVER et HOLMES (1962), ont étudié le ressaut hydraulique dans des canaux trapézoïdaux pour des pentes des parois latérales de  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , ils ont signalé des difficultés dans la corrélation des hauteurs conjuguées prévus par l'approche dynamique avec leurs données, les caractéristiques des longueur ont été

impossible à établir. SILVESTER (1964) s'est référé aux épreuves présentées par HSING. Ses observations ne couvraient pourtant que les nombres de Froude  $F_1 < 4$ .

### I.3.2. Description des essais

Les essais ont été menés dans un canal trapézoïdal symétrique, la pente des parois latérales est de  $45^\circ$  ( $m=1$ ), de largeur de fond 0,2 m, de largeur de la grande base 1,6 m, de profondeur 0,7 m et une longueur de 8m. Les valeurs de  $h_1=20\text{mm}$ , 40mm, 60mm et 80mm ont été examinés, pour lesquels  $M=0,1$ ; 0,2; 0,3 et 0,4 respectivement.

### I.3.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure 1.2 montre un ressaut classique évoluant entre sa section initiale et finale 1 et 2.

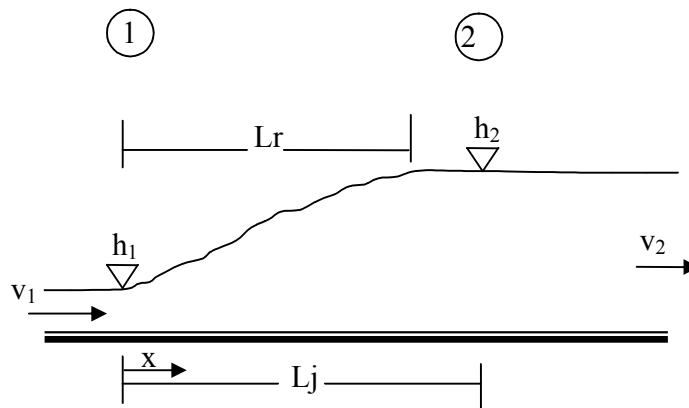


Figure 1.2 : Ressaut hydraulique classique.

L'écoulement à l'amont du ressaut (à l'origine) est caractérisé par une profondeur  $h_1$  et une vitesse moyenne  $V_1$ . L'équation de continuité permet d'écrire :

$$V_1 = Q/A_1 \quad (1.1)$$

$Q$  est le débit volume et  $A_1$  l'aire de la section mouillée initiale qui s'exprime par :

$$A = bh_1 + mh_1^2 \quad (1.2)$$

tel que:

$b$  : la largeur du canal trapézoïdal.

$m$  : la cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal à section droite trapézoïdal symétrique par rapport à l'horizontal.

Le ressaut est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En effet, la variation de la quantité de mouvement entre les sections 1 et 2 est égale à la somme des forces extérieures agissant sur l'écoulement. L'application de cette loi nécessite quatre hypothèses simplificatrices:

1. la répartition des pressions dans la section finale et initiale est hydrostatique;
2. la distribution des vitesses est uniforme;
3. la perte de charge par frottement est négligeable;
4. la résistance de l'air est négligeable.

En outre, en raison du fait que le ressaut évolue dans un canal de pente nulle, la composante tangentielle du poids propre de la masse liquide considérée n'est également nulle.

Ainsi, les forces extérieures appliquées à la masse liquide en mouvement se résument aux forces de pressions hydrostatiques  $P_1$  et  $P_2$  s'exerçant sur les sections 1 et 2. Ces forces s'écrivent :

$$P_1 = \varpi \bar{h}_1 A_1 \quad (1.3)$$

$$P_2 = \varpi \bar{h}_2 A_2 \quad (1.4)$$

$\varpi = \rho.g$  désigne le poids spécifique du liquide,  $\rho$  est la masse volumique du liquide,  $\bar{h}_1$  et  $\bar{h}_2$  sont respectivement la position du centre de gravité des sections  $A_1$  et  $A_2$  par rapport à la surface libre de l'écoulement dans ces sections.

On peut donc écrire que :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6} \cdot \frac{3b + 2mh_1}{A_1} \quad (1.5)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6} \cdot \frac{3b + 2mh_2}{A_2} \quad (1.6)$$

L'application de la loi de Newton mène à écrire :

$$\frac{b.h_1^2}{2} + \frac{m.h_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(bh_1 + m.h_1^2)} = \frac{b.h_2^2}{2} + \frac{m.h_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b.h_2 + m.h_2^2)} \quad (1.7)$$

$h_1$  et  $h_2$  sont respectivement les hauteurs initiale et finale du ressaut, et  $g$  est l'accélération de la pesanteur.

En tenant compte des relations précédentes et sachant que le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut est tel que :

$$F_1^2 = \frac{Q^2 (b + 2mh_1)}{g(bh_1 + mh_1^2)^3}, \quad Y = \frac{h_2}{h_1}, \quad M = \frac{mh_1}{b} \quad (1.8)$$

L'équation (1.7) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme :

$$F_1^2 \left[ 1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)} \left[ Y^2 \left( 1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left( 1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (1.9)$$

La relation (1.9) exprime la variation du nombre de Froude à l'amont du ressaut en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées et du coefficient de forme M. Les équations régissant les ressauts en canal de section rectangulaire constante et en canal triangulaire peuvent être déduites de la relation (1.9).

Sur la Figure 1.3 est représentée graphiquement, dans un système d'axes de coordonnées cartésiennes, la relation (1.9) :

### I.3.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire :

Pour obtenir la fonction Y(F<sub>1</sub>) pour le cas du ressaut hydraulique évaluant en canal rectangulaire, il suffit d'annuler dans l'équation (1.9) m et M (m = 0 et M = 0).

L'équation (1.9) devient.

$$F_1^2 \left[ 1 - \frac{1}{Y} \right] = \frac{Y^2 - 1}{2} \quad (1.10)$$

Ou encore :

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

Eléments connus : Q, b, h<sub>1</sub> donnent F.

L'équation (1.10) conduit à la relation :

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

C'est l'équation de *Bélanger* (1828), cette équation traduit un ressaut classique sans obstacle en aval.

Elle a été reprise par *Hager* (1988) :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \left[ \sqrt{2} F_1 - \frac{1}{2} \right]$$

Valable pour F<sub>1</sub> > 3

Hager à vérifier expérimentalement que pour des ressauts où  $F_1 > 3$  ;  $\sqrt{1+8F_1^2} \approx \sqrt{8F_1^2}$

d'où a relation 
$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \left[ \sqrt{2F_1} - \frac{1}{2} \right]$$

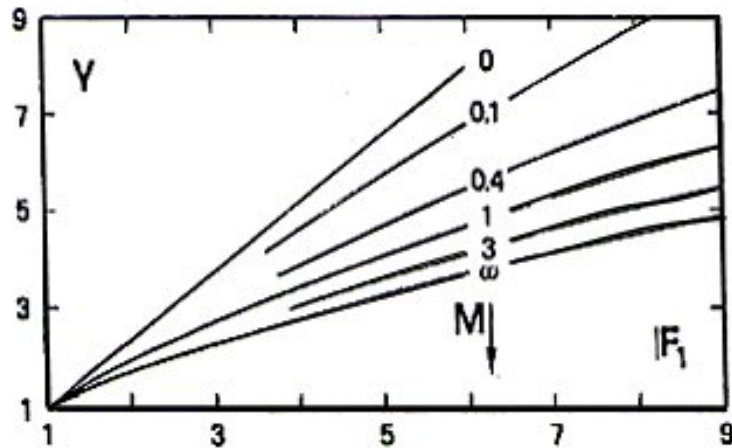
### I.3.3.2. Cas particulier du canal triangulaire :

En remplaçant dans l'équation (1.9) :  $b = 0$  et  $1/M = 0$  ( $M \rightarrow \infty$ ), l'équation (1.9) donne :

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^2 + Y + 1)}{3(Y+1)} \quad (1.11)$$

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

$$Y = \left( \frac{3}{2} F_1^2 - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.12)$$



**Figure 1.3 :** Variation du nombre de Froude  $F_1$  en fonction du rapport  $Y$  des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme  $M$ .

$0 < M < \infty$  : profil trapézoïdaux.

$M=0$  : profil rectangulaire.

$M \rightarrow \infty$  : profil triangulaire.



La Figure 1.3 montre clairement que la plus faible valeur de rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut est obtenue dans le cas du profil triangulaire, pour une même valeur du nombre de FROUDE  $F_1$  de l'écoulement incident.

### I.3.4. Longueurs caractéristiques du ressaut

#### I.3.4.1. Longueur du rouleau :

En 1990 HAGER définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisent ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé.

La figure 1.4 montre ces deux types de ressaut et les longueurs  $L_r$  qui leur

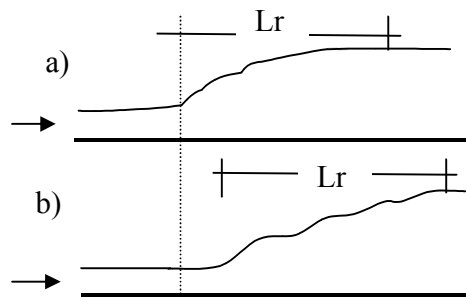


Figure 1.4 : Aspect du ressaut classique.

a) rouleau développé. b) rouleau non développé.

#### I.3.4.2. Longueur du rouleau de fond :

Une caractéristique particulière de ressaut trapézoïdal pour  $F_1 > 4$  est l'apparition d'un rouleau de fond, la figure 1.5 montre un esquisse de définition. Les dimensions du rouleau de fond peut être proposée par  $L_u$  (la distance du pied du ressaut au début du rouleau de fond),  $L_b$  longueur du rouleau de fond et  $h_b$  la hauteur maximal du rouleau de fond.

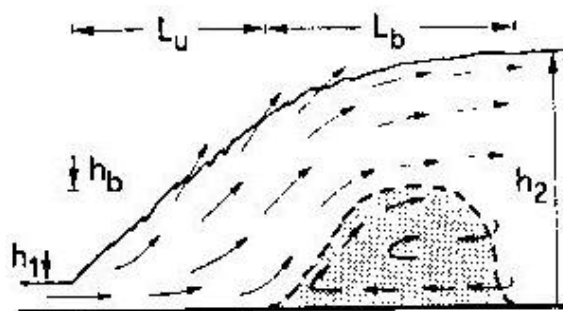


Figure 1.5 : schéma de définition

Les figures 1.6a à c montre les rapports  $\lambda_u=L_u/h_2$ ,  $\lambda_b=L_b/h_2$ , et  $h_b/h_2$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour diverses M. où  $h_2$  correspond à la profondeur de l'écoulement en aval du ressaut.

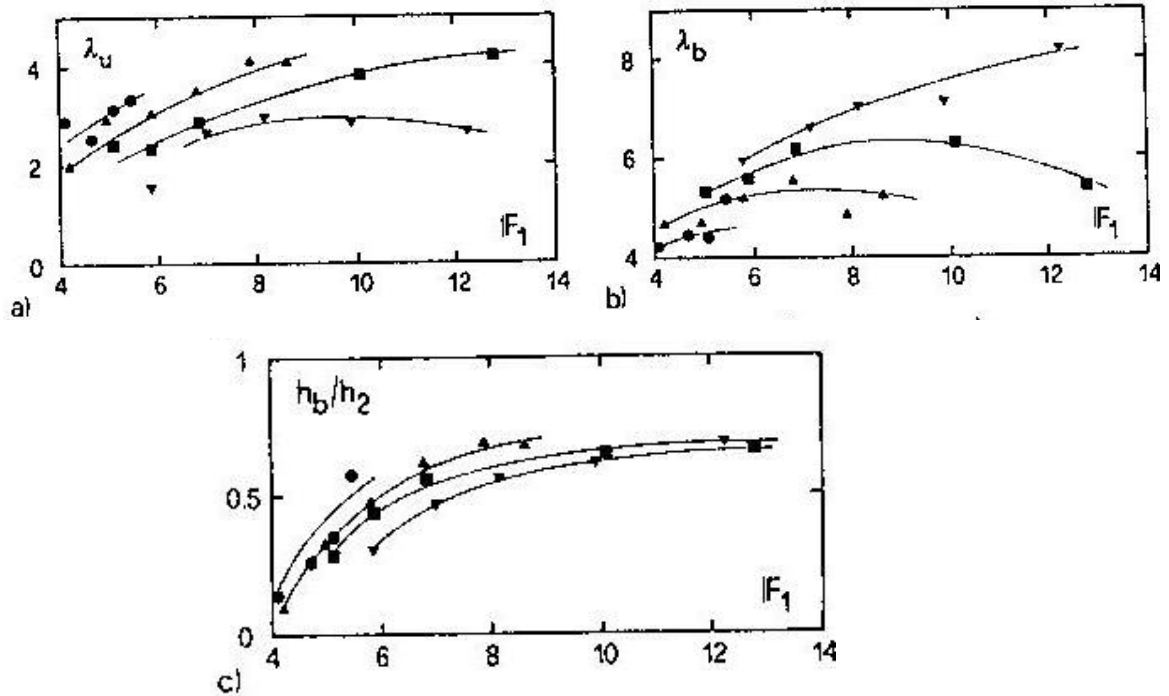


Figure 1.6 : caractéristique principale du rouleau de fond: a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximale.

La figure 1.6 montre que:

- \_  $2 < \lambda_u < 4$ , tout à fait près au pied du ressaut.
- \_ pour une valeur bien déterminé de  $F_1$ ,  $\lambda_u$  augmente avec l'augmentation de M.
- \_  $\lambda_b \gg \lambda_u$  et peut atteindre des valeur aussi supérieures que la valeur 8.
- \_  $\lambda_b$  diminue avec l'augmentation de M.
- \_ la fin du rouleau de fond ( $\lambda_u + \lambda_b$ ) est pratiquement indépendante de M, et augmente avec l'augmentation de  $F_1$  arrivant à 10,5.
- \_  $h_b/h_2$  augmente avec l'augmentation de M et de  $F_1$ .

### I.3.4.3 Longueur du ressaut :

Une autre longueur importante est la longueur du ressaut  $L_j$ , bien que de nombreuses définitions de mesure de cette longueur ont été avancées; Il a été conseillé de laisser la position de la fin du ressaut où l'ébullition de surface disparaît. A ce stade, les poches de bulles d'air remontent à la surface

indiquant la fin de la zone de dégazage, de tout évidence, le niveau de turbulence diminue ensuite de manière significative et indique la fin du ressaut.

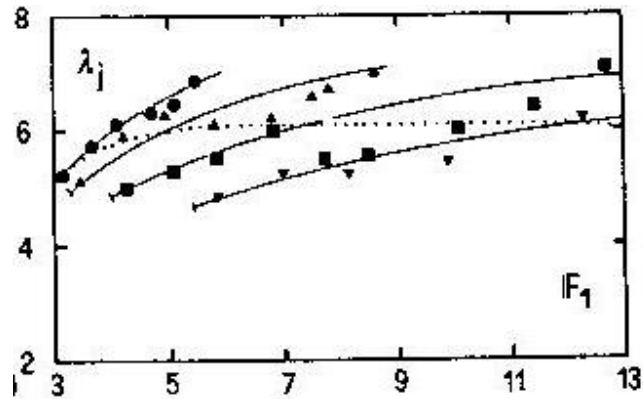


Figure 1.7: longueur relative  $\lambda_j$  du ressaut en fonction de  $F_1$  et de  $M$

La figure 1.7 représente les mesures expérimentales de Hager et Wanoschek (1989) ( $m=1$ ) concernant la longueur relative  $L_j/h_2$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et de  $M$ , il apparaît par conséquent que la longueur relative  $L_j/h_2$  dépend uniquement de  $M$  et de  $F_1$ .

### I.3.5. Rendement du ressaut :

La figure 1.8 montre la ligne de charge totale le long de la longueur  $L_j$  sur laquelle s'étend le ressaut classique.

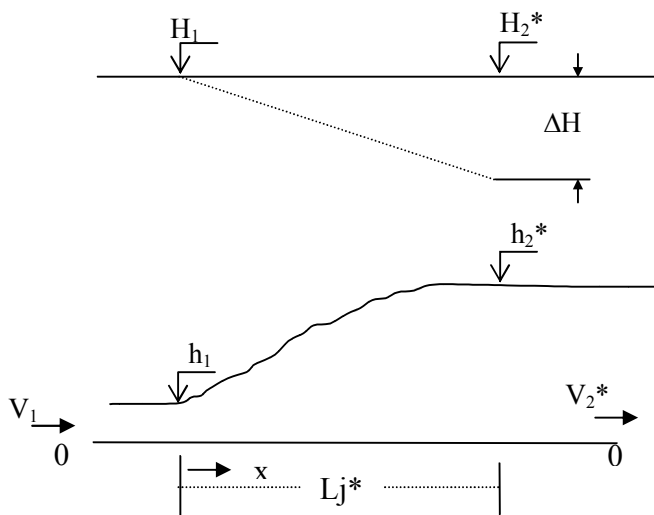


Figure 1.8 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

En se référant au plan 0-0, la charge totale dans la section initiale du ressaut s'écrit :

$$H_1 = h_1 + \alpha_1 \cdot v_1^2 / (2 \cdot g) \quad (1.10)$$

Tandis que la charge totale dans la section finale est :

$$H_2^* = h_2^* + \alpha_2 \cdot v_2^{*2} / (2 \cdot g) \quad (1.11)$$

$\alpha$  désigne le facteur de correction de l'énergie cinétique dont on admet que la valeur est égale à l'unité.

La perte de charge  $\Delta H^*$  due au ressaut est la différence des charges totales initiale et finale:

$$\Delta H^* = H_1 - H_2^* \quad (1.12)$$

En raison du caractère permanent de l'écoulement, l'équation de continuité reste en vigueur et l'on peut écrire :

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2^* \cdot A_2 \quad (1.13)$$

$$\text{où } A_1 = bh_1 + mh_1^2 \text{ et } A_2 = bh_2^* + mh_2^{*2}.$$

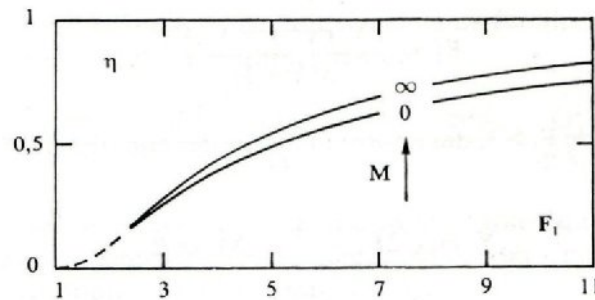
Le nombre de Froude de l'écoulement incident dans un canal de section droite trapézoïdal est défini par la relation :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(1+2M)}{gb^2 h_1^3(1+M)^3}$$

En tenant compte des relations précédentes, le rendement du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal horizontal, s'écrit comme suit :

$$\eta^* = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2(1+M)^3}{2Y^2(1+2M)(1+YM)^2}}{1 + \frac{F_1^2(1+M)}{2(1+2M)}} \quad (1.14)$$

$Y = h_2^*/h_1$  étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.



**Figure 1.9 :** Rendement  $\eta$  du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude.  
 $M \rightarrow \infty$  : Cas du canal triangulaire.  $M = 0$  : Cas du canal rectangulaire.

La figure 1.9 montre que le rendement du ressaut dans les canaux trapézoïdaux est compris entre les courbes de rendement du ressaut dans le canal triangulaire et du canal rectangulaire. Par ailleurs, pour le même nombre de FROUDE  $F_1$  le rendement  $\eta$  est important pour le canal triangulaire.

#### I.4. CONCLUSION :

Cette partie de notre étude bibliographique a pour objectif de faire le point sur les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. La détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique, a été souvent l'objectif principal des travaux entrepris par : POSEY et HSING (1938), SILVESTER (1964), OHTSU (1976), et plus récemment ceux de HAGER et WANOSCHEK (1989).

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

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

Le comportement du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive, dans un canal trapézoïdal, ainsi que ses caractéristiques principales n'ont pas fait l'objet de travaux des chercheurs jusqu'à maintenant. Plus loin et à travers notre étude théorique et expérimentale, nous avons consacré notre travail sur l'étude du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive dans un canal à section droite trapézoïdal.

## Chapitre II

### RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINE

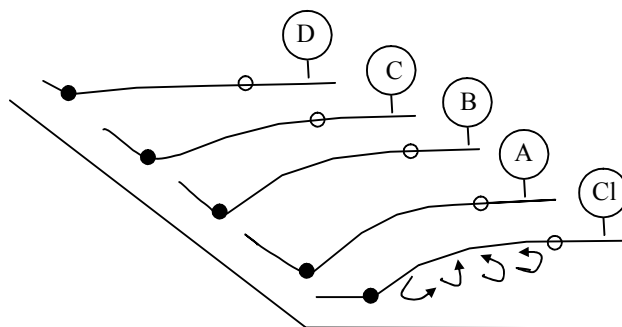
#### II.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons traiter les travaux relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal incliné, sont ceux d'étude de MC CORCODAL et al (1994), PAGLIARA et PERUGINELLI (2000) concernant le ressaut hydraulique dans les canaux contre pente. Ainsi que ceux, plus récemment, de DEBABECHE et CHERHABILE (2009) qui ont effectué une étude expérimentale sur le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince dans canal triangulaire a pente variable.

#### II.2. Classification des ressauts inclinés :

Selon RAJARATNAM (1966), les études de ce type de ressaut ont été déjà élaborées auparavant par DARCY et BAZIN (1865), ainsi que par RIEGEL et BEEBE (1971) qui sont toujours d'actualité. Selon HAGER (1987), la première approche théorique à été effectuée par ELLMS (1928,1932). Safranez (1933) a repris les résultats de ELLMS. La première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné a été celle de BAKHMETEFF et MATZKE (1938), qui ont évoqué dans leur étude, le profil de surface, la longueur du ressaut et la distribution de la vitesse. KINDSVATER (1944) classifie les ressauts inclinés selon la position du pied du ressaut par rapport à l'extrémité aval de la pente (Figure 2.1):

- Type A pour lequel le pied du ressaut coïncide avec l'extrémité aval de la pente
- Type B pour lequel le pied du ressaut se trouve entre le type A et le type C
- Type C pour lequel la fin du rouleau coïncide avec l'extrémité aval de la pente et
- Type D pour lequel le rouleau se présente entièrement dans la portion incliné



*Figure 2.1 : Classification des ressauts inclinés selon KINDSVATER (1944).*

KINDSVATER (1944) a analysé expérimentalement le ressaut type C et a proposé une approche pour le rapport des hauteurs conjuguées. D'autres chercheurs tels que Bradley et

PETERKA (1957) et ARIEMMA (1958) et Van BEESTEEN (1962) se sont également intéressés au ressaut de type C.

Le ressaut de type D a été analysé par Bunyan (1958), Smith (1959), Rajaratnam (1963), WILOGORSKI et WILSON (1970), MURA HARI (1973), OHASHI et AL.(1973), RAJARATNAM et MURAHARI (1974) et MIKHALEV et HOANG (1976).

Le ressaut de type B a été étudié par HAGER (1988), KAWAGOSHI et HAGER (1990). MAHMOOD (1964) a étudié le ressaut incliné pour différentes inclinaisons. Il a été montré que le ressaut de type A et le ressaut classique sont quasi semblables. BRADLEY et PETERKA ont confirmé également cette constatation. Cependant, très peu d'études ont été faites sur le ressaut de type B.

### II.2.1. Ressaut hydraulique de type C et de type D :

La plus part des recherches a été orientées vers le ressaut de type C, pour lequel la fin du rouleau coïncide avec l'extrémité aval de la pente. KINDSVATER (1944) a proposée pour le rapport des hauteurs conjuguées la formule suivante :

$$Y = h_2/h_1 = \frac{1}{2} \left[ (1 + 8F_{1s}^2) \right]^{1/2} - 1 \quad (2.1)$$

Avec  $h_1 = N_1 \cos \theta$  la profondeur initial,  $N_1$  la longueur de la normal et  $\theta$  l'angle d'inclinaison du canal (Figure 2.2), et le nombre de Froude modifié pour le canal inclinée ( $F_1 = v_1 / g N_1^{1/2}$ ). Pour le canal horizontal ( $\theta=0$ )  $F_{1s} = F_1$ .

$$F_{1s} = \frac{(\cos \theta)^{3/2}}{(1 - 2K \tan \theta)^{1/2}} F_1 \quad (2.2)$$

En se basant sur les résultats expérimentaux de BRADLEY et PETERKA (1957), et de PETERKA (1958). RAJARATNAM (1966) a obtenu la relation empirique suivante :

$$F_{1s} = \Gamma F_1 \quad (2.3)$$

Ou  $\log_{10} \Gamma = 0,027\theta$ . La relation (1.25) peut être approximée alors comme suit :

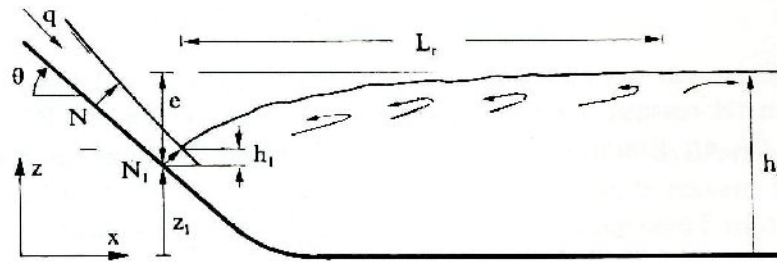
$$Y = \sqrt{2} \cdot 10^{0,027\theta} F_1 - \frac{1}{2} \quad (2.4)$$

La longueur du ressaut a été estimée expérimentalement par BRADLEY et PETERKA (1957) comme suit:

$$\frac{L_j}{L_j^*} = \exp\left(-\frac{4}{3}\theta\right) \quad (2.5)$$



Avec  $L_j^*$  étant la longueur du ressaut classique selon l'équation (1.12). Les équation (2.5) et (2.6) sont appliquées pour la pente :  $\text{tg}(\theta)=0,3(\theta<17^\circ)$ .



**Figure 2.2 :** Notation du ressaut incliné.

L'équation (2.6) peut également être appliquée au ressaut type D ou  $h_2$  représente la profondeur de l'écoulement à la fin du ressaut, mesurée verticalement du fond inclinée jusqu'à la surface libre. Les longueurs de rouleau du type C et type D sont quasi identiques.

RAJARATNAM et MUHRAHARI (1974), ont considéré la distribution des vitesses pour le cas du ressaut de type D pour  $\theta < 0,25$ . Les autres ont trouvé que la répartition des vitesses à l'amont du ressaut est comparable à celle du ressaut classique.

### **II.3. CLASSIFICATION DU RESSAUT EN CONTRE PENTE :**

STEVENSENS (1942) a analysé théoriquement le ressaut en contre pente en utilisant l'équation de quantité de mouvement. OKADI et AKI (1955) ont effectué une étude expérimentale sur la stabilité du ressaut en contre pente pour des nombres de FROUDE  $F_1 > 9$ . RAJARATNAM (1966, 1967) classifie le ressaut en contre pente comme un ressaut de type F, et conclue qu'il est impossible de garder le ressaut complètement dans la contre pente. OHASHI et al (1973) étudient le ressaut en contre pente et confirment son instabilité lorsqu'il est entièrement dans la contre pente. MC CORCODAL et al (1994) on effectué une analyse assez explicite sur ce type de ressaut, qu'ils ont appelé configuration du ressaut limite où le ressaut est localisé complètement dans la partie en contre pente.

Analyse bibliographique montre que le ressaut en contre pente est classé en quatre configurations principales telles que représentées dans la figure 2.2 :

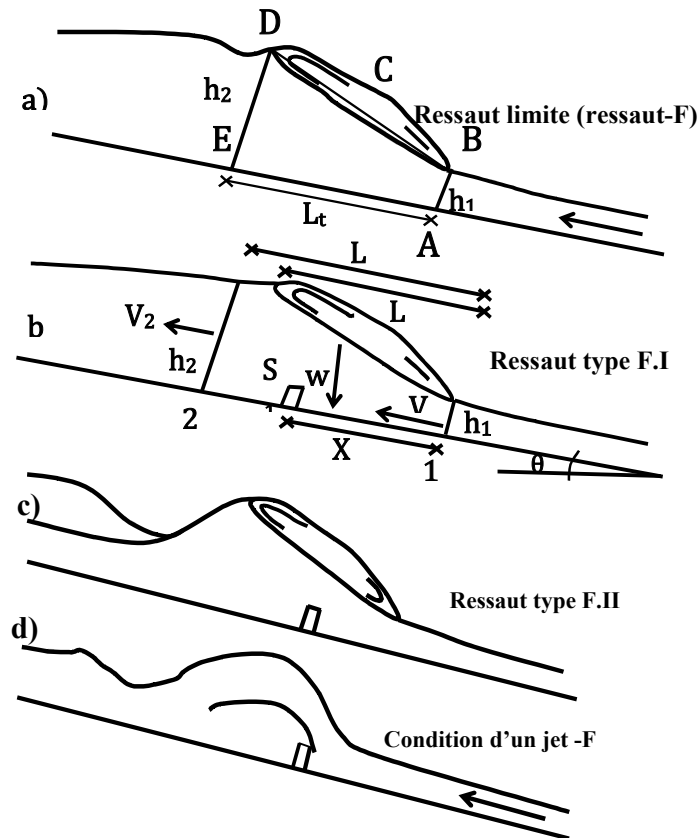


Figure 2.3 : Classification du ressaut en contre pente.

Selon la figure 2.3, le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en contre pente peut se présenter en quatre formes principales :

- Ressaut limite (Type F) qui désigne le ressaut sans obstacle à l'aval,
- Types FI et FII relatifs au ressaut forcé par seuil,
- Type F-S désignant la configuration d'un jet à travers un seuil.

Pour le cas du type F-S, l'écoulement torrentiel saute au-dessus du seuil sans formation de ressaut.

#### II.4. Travaux de MC CORCODAL et al (1994) :

MC CORCODALE et al (1994) ont étudié le ressaut hydraulique dans des canaux en contre pente, dans le but de déterminer les paramètres de définition du cas limite d'existence de ce type de ressaut. La figure 2.4 montre le schéma de définition du ressaut à contre pente selon les auteurs.

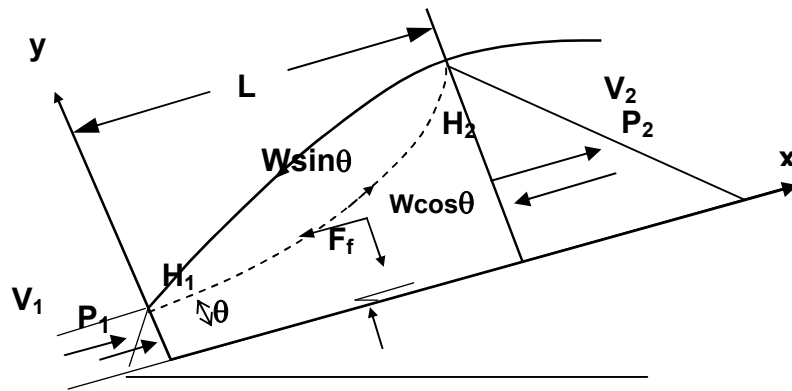


Figure 2.4 : Schéma de définition et volume de contrôle pour le ressaut en contre pente

L'équation de quantité de mouvement pour un ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à contre pente s'écrit comme suit :

$$\beta_2 \rho U_2 Q - \beta_1 \rho U_1 Q = P_1 - P_2 + W \sin \theta - F_f \quad (2.7)$$

où  $P_1$  et  $P_2$  sont respectivement les forces hydrostatiques au début et à la fin du ressaut ;  $F_f$  est la force de frottement. Le poids  $W$  s'écrit comme suit :

$$W = \varphi_s \gamma L_r (H_1 + H_2) / 2 \quad (2.8)$$

Avec :  $\gamma$  le poids spécifique de l'eau,  $L_r$  la longueur du rouleau qui est pris dans ce cas comme longueur de ressaut,  $\varphi_s$  étant le facteur de forme.  $\beta$  est considéré comme égale à l'unité.

Un développement théorique de l'équation de quantité de mouvement conduit à l'équation suivante :

$$H_2 / H_1 = (\sqrt{1 + 8G_a^2} - 1) / 2 \quad (2.9)$$

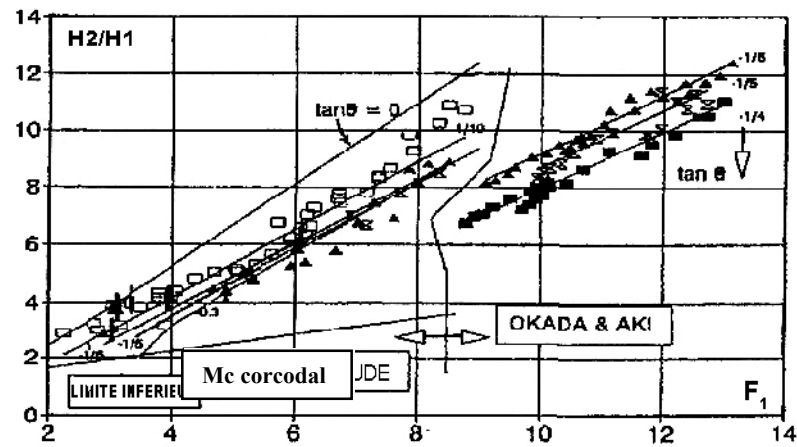
Avec :

$$G_a^2 = \frac{\beta_1 F_1^2}{1 - \frac{\varphi_s L_j \operatorname{tg} \theta}{H_2 - H_1} - \frac{2F_f}{\gamma(H_1^2 - H_2^2) \cos \theta}} \quad (2.10)$$

Avec :  $F_1 = U_1 / (g H_1 \cos \theta)^{1/2}$

Une étude expérimentale a été conduite par MC CORCODAL dans un canal rectangulaire de 0,46m de largeur, 0,65m de profondeur et une contre pente de 1m de longueur. Trois pente négatives ont été testées :  $\operatorname{tg} \theta = -0.1, -0.167, -0.20$ .

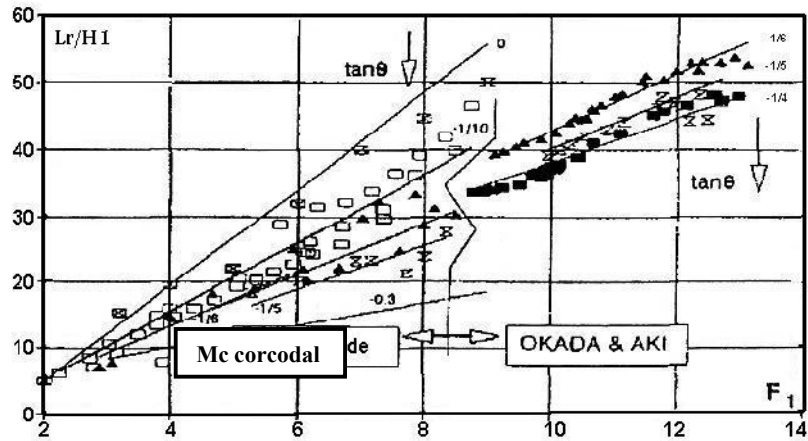
La figure 1.13 montre la variation du rapport des hauteurs conjuguées  $H_2/H_1$  pour différentes valeurs du nombre de Froude  $F_1$  et pour trois contre pentes.



**Figure 2.5 :** Rapport de hauteurs conjuguées expérimentales et théoriques pour des cas limites et des cas stabilisés de ressaut en contre pente, provenant de l'étude de Mc Corcodal et al (1994), ainsi que celle de Okada et Aki (1959).  $\tan \theta =$  (+) 0,0 ; (□) -0,1 ; (▲) -1/6 ; (▽) -1/5 ; (◆) -1/4 ; (—) Equation théorique

La figure 2.5 montre que l'augmentation de la pente négative engendre la diminution du rapport  $H_2/H_1$  des hauteurs conjuguées. En outre, les mesures de  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $L_r$  et le débit  $Q$  ont permis aux auteurs d'estimer expérimentalement le facteur de forme  $\varphi_s$  dans l'équation 1.26. Ils trouvent une valeur constante  $\varphi_s = 1,08 \pm 0,3$  pour les trois contre pentes étudiées. Ces valeurs sont différentes de celle de OKADA et AKI (1959), qui a trouvé  $\varphi_s = 1,39 \pm 0,1$ . MC CORCODAL et al (1994) attribuent cette différence à la définition de la longueur du ressaut et à la différence entre les conditions des deux études, car OKADA et Al (1959) ont expérimenté un autre type de ressaut en contre pente dit stabilisé, qui commence dans une pente positive et fini dans une pente négative. En outre il a été montré que la position du ressaut est très sensible à la variation de la profondeur conjuguée aval  $H_2$  et précisément pour les nombre de Froude  $F_1 < 4$ , et nécessite un ajustement continu des conditions aux limites pour maintenir une position stable. Cependant, pour les nombre de Froude  $F_1 < 9$ , les auteurs confirment que le ressaut limite en contre pente (type D) est difficile à établir.

La figure 2.5 montre la variation de la longueur relative  $L_r/H_1$  en fonction de  $F_1$  pour trois contre pentes.



**Figure 2.6 :** Longueurs du rouleau mesurées dans les cas limites et les cas stabilisés de ressaut en contre pente. Provenant de l'étude de Mc Corcodal et al (1994) et de celle de Okada et Aki (1959).  
 $tg\theta = (+) 0,0 ; (\square) -0,1 ; (\blacktriangle) -1/6 ; (\nabla) -1/5 ; (\blacksquare) -1/4 ;$   
 (—) Equation théorique

La figure 2.6 montre que pour une valeur donnée de  $F_1$ , la longueur relative  $L_r/H_1$  du rouleau diminue avec l'augmentation de la contre pente. Les mesures expérimentales ont été comparées avec la longueur relative du rouleau horizontal ; il a été montré que le rapport  $L_r/H_1$  de la contre pente, pour une valeur donnée de  $F_1$ , est plus faible que son homologue horizontal. Une relation empirique a été effectuée par OKADA et AKI (1959), de la forme :

$$L_r/H_1 = (C_0 + C_1 \sin\theta + C_2 \sin^2\theta)[F_1 - 1] + D_1(1 + D_2 \sin^4\theta) \quad (2.11)$$

où les constantes empiriques sont les suivantes :

a. Ressaut limite selon MC CORCODAL et al ( $F_1 < 9$ ) :

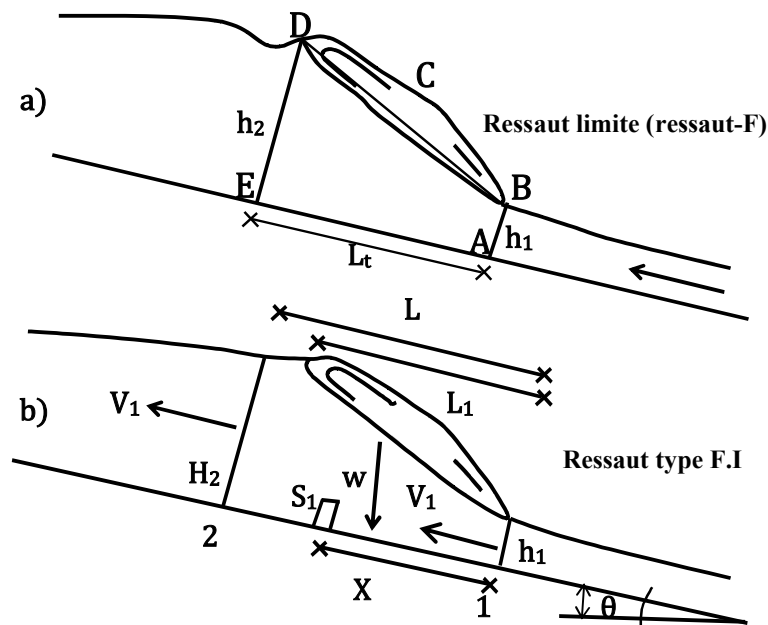
$$C_0 = 7,27 ; C_1 = 20,8 ; C_2 = 5 ; D_1 = 5 ; C_2 = 50.$$

b. Ressaut Stabilisé selon OKADA et AKI (1959)  $9 < F_1 < 13$ :

$$C_0 = 7,2 ; C_1 = 21 ; C_2 = 19 ; D_1 = 7,7 ; C_2 = 175.$$

## II.5. Travaux de PAGLIARA et PERUGINELLI (2000) :

PAGLIARA et PERUGINELLI (2000) analysent théoriquement et expérimentalement le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire prismatique à contre pente. Les auteurs proposent pour deux types de ressaut hydraulique : le ressaut classique en contre pente (type F) et le ressaut forcé par seuil (type F.I) (figure 2.7), une relation générale liant le rapport des hauteurs conjuguées au nombre de Froude et à l'angle d'inclinaison du canal a été proposée. Les auteurs expérimentent le ressaut dans un canal rectangulaire en contre pente de 6m de longueur, de 0,4m de largeur et de 1,2m de profondeur. Quatre pentes négatives ont été testées : -5, -10, -15, -20 %.



**Figure 2.7:** Classification du ressaut limite et du ressaut contrôlé par seuil dans un canal en contre pente.

L'équation de quantité de mouvement appliquée entre les sections 1 et 2 de l'écoulement s'écrit :

$$P_1 - P_2 + M_1 - M_2 + W \sin \theta - D = 0 \quad (2.12)$$

Pour une unité de largeur, les éléments de l'équation 1.28 peuvent s'écrire comme suit :

$$P_1 = 0,5 \gamma h_1^2 \cos \theta ; M_1 = (\gamma/g) h_1 U_1^2 \quad i=1,2 \quad (2.13)$$

$$W = 0,5 \gamma L k (h_2 + h_1) ; F_R = C_d S \rho U_1^2 / 2$$

Avec :  $g$  accélération de la pesanteur ;  $h_1, h_2$  profondeurs conjuguées mesurées perpendiculairement au fond ;  $U_1, U_2$  vitesse moyenne ;  $\theta$  angle d'inclinaison du fond (négative pour la contre pente) ;  $\omega$  poids

de l'eau contenu dans le volume de contrôle pour une unité de largeur ; k coefficient de correction du poids ; L longueur du ressaut ;  $F_R$  force de réaction du seuil ;  $C_d$  coefficient de traînée ; s hauteur de seuil ;  $\gamma$  poids spécifique ;  $\rho$  masse volumique ;  $Y=h_2/h_1$  rapport des hauteurs conjuguées ;  $F_1^2 = U_1^2/gh_1$  le carré du nombre de Froude de l'écoulement incident.

Avec  $\lambda = L/h_1$  et  $S = s/h_1$ .

Les auteurs aboutissent à l'expression suivante :

$$Y^3 - Y(1+2G_s^2) + 2G_s^2 = 0 \quad (2.14)$$

où  $G_s$  représente une forme générale du paramètre G introduit par Chow(1959) pour le cas des contre pentes sans seuil. Le paramètre G est appelé « paramètre de contrepente » (Mc CORCODAL et Mohamed, 1994). Pour le ressaut forcé les auteurs définissent le paramètre  $G_s$  de l'équation (2.13) comme suit :

$$G_s^2 = \frac{F_1^2}{\cos \theta - \frac{\lambda \cdot k \cdot \sin \theta}{Y-1} - \frac{C_d \cdot S \cdot F_1^2}{1-Y^2}} \quad (2.15)$$

L'équation (1.38) est valable pour le ressaut forcé par seuil évoluant, aussi bien dans un canal à pente positive que dans un canal à pente négative. En utilisant l'équation (2.15), les auteurs ont aboutis à une équation analogue à celle de Bélanger pour le cas du ressaut classique :

$$Y = 0,5 \cdot (-1 + \sqrt{1 + 8 \cdot G_s^2}) \quad (2.16)$$

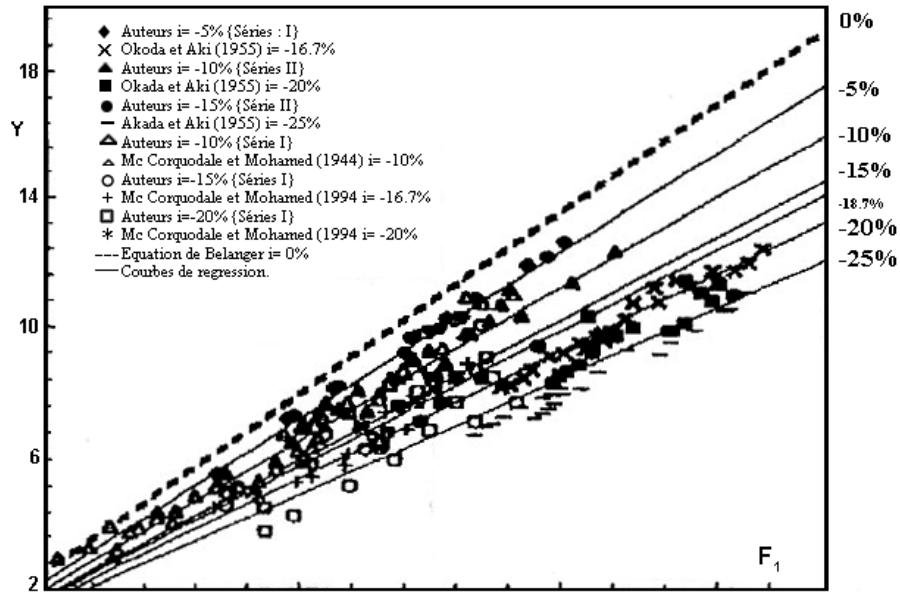
Pour le cas du ressaut limite (type F), la valeur du coefficient k est déterminée expérimentalement. Cette constante est indépendante de la pente et du nombre de Froude. Les auteurs ont trouvé une valeur  $k=1,06$  par régression statistique. Une relation entre G et  $F_1$  a été déterminée expérimentalement en fonction de l'inclinaison i du fond. L'équation d'ajustement est représentée par la relation (2.17) :

$$G = 3,32^{1,52 \cdot i} F_1, \quad -0,25 < i < 0 \quad (2.17)$$

En considérant la relation (1.40), l'équation (1.32) peut être écrite comme suit :

$$Y = 0,5 \cdot (-1 + \sqrt{1 + 8 \cdot F_1^2 \cdot 3,32^{2(1,52 \cdot i)}}) \quad (2.18)$$

Les auteurs confirment, à travers la figure (2.8) que l'équation (2.18) représente assez bien les données expérimentales. Aussi, les données de OKADA et AKI (1955) relatives au ressaut stabilisé sont également bien représentées par la relation (2.18).



**Figure 2.8 :** Variation de  $Y$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et de la pente  $i$  du canal.

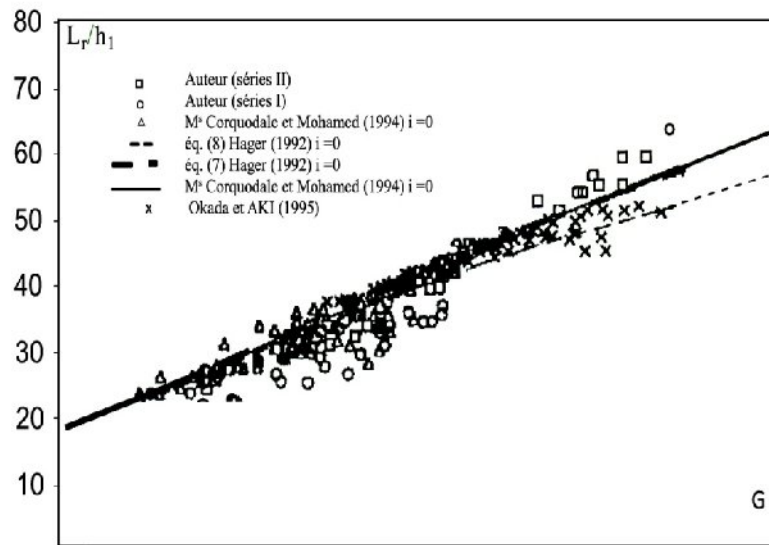
La longueur relative  $\lambda_r = L_r/h_1$  pour le cas du ressaut limite est représentée par la figure 2.8, de même que l'équation de Hager (1992) pour une pente nulle. Telle que :

$$\lambda_r = -12 + 160.tgh(F_1/20), \quad h_1/b < 0,1 \quad (2.18a)$$

$$\lambda_r = -12 + 100.tgh(F_1/12,5), \quad 0,1 < h_1/b < 0,7 \quad (2.18b)$$

Où  $b$  est la largeur du canal. Les données de l'étude de PAGLIARA et PERUGINELLI (2000) sont dans l'intervalle de  $h_1/b < 0,16$ .





**Figure 2.9 :** Longueur relative  $L_r/h_1$  du rouleau en fonction de  $G$ .

Les données de MC CORCODAL et MOHAMED (1994) sont dans l'intervalle  $h_1/b < 0,19$ . Cette figure montre que la longueur relative du rouleau est indépendante de l'inclinaison du fond du canal. Pour le ressaut contrôlé par seuil les auteurs obtiennent le même coefficient  $k = 1,06$  et recommandent l'utilisation du seuil afin de stabiliser le ressaut.

## II.6. Travaux DEBABECHE et al (2009) :

L'étude expérimentale de DEBABECHE et al (2009) a pour but de déterminer expérimentalement l'effet de la pente du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique, que l'on ne peut trouver théoriquement, à savoir la hauteur  $s$  du seuil, la longueur  $L_r$  du rouleau, la longueur  $L_j$  du ressaut. Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil, la longueur relative  $\lambda = L_j/h_1$  du ressaut et la longueur relative  $\lambda_r = L_r/h_1$  du rouleau de surface.

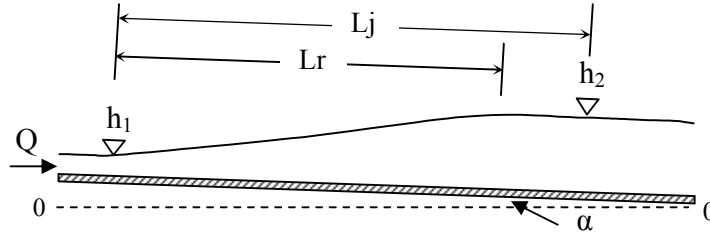
### II.6.1. Analyse théorique :

L'équation dynamique appliquée entre les sections 1 et 2 est rédigée comme suit:

$$\rho Q v_1 + P_1 + G \sin \alpha = \rho Q v_2 + P_2 \quad (2.19)$$

où  $\rho$  est la masse volumique, et  $Q$  le débit volume.

La figure 2.10 montre un ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire avec une pente positive.



**Figure. 2.10:** ressaut hydraulique sur une pente positive

Le poids de l'eau  $G$  ainsi que les forces de pressions  $P_1$  et  $P_2$  peuvent être exprimées, en appliquant les lois de l'hydrostatique:

$$P_1 = m\varpi \frac{h_1^3 \cos(\alpha)}{3}; \quad P_2 = m\varpi \frac{h_2^3 \cos(\alpha)}{3}; \quad G = \omega V \quad (2.20)$$

Où  $h_1$  et  $h_2$  représente les profondeurs de l'écoulement respectivement en amont et en aval du ressaut,  $v_1$  et  $v_2$  sont les vitesses moyennes,  $\alpha$  est l'angle d'inclinaison du canal,  $V$  est le volume d'eau compris entre les sections 1 et 2,  $m$  est la cotangente de l'angle d'inclinaison  $\theta$  des parois latérale du canal par rapport à l'horizontal, et  $\omega$  le poids spécifique du liquide en écoulement. Géométriquement, le volume  $V$  du ressaut dans un canal triangulaire représente le quart du volume d'une pyramide.

La forme géométrique du volume équivalent  $V$  représentative du ressaut hydraulique étudié, n'étant pas en réalité parfaitement prismatique, comme il a été supposé, à cause de la perturbation de la surface libre du ressaut due au rouleau de surface. Pour cela, il a été nécessaire de corriger ce volume en le multipliant par un coefficient  $k$ , qui exprime le rapport du volume réel et du volume calculé du ressaut. Ce coefficient a été déterminé en utilisant les données expérimentales.

$$V = \frac{1}{3} mkL_j h_1^2 (1 + Y + Y^2) \quad (2.21)$$

En tenant compte des relations (3.22) et (3.23) la relation (3.21) devient:

$$\frac{Q^2}{gmh_1^2} + \frac{mh_1^3 \cos \alpha}{3} + \frac{1}{3} kmL_j h_1^2 (1 + Y + Y^2) \sin \alpha = \frac{Q^2}{gmh_2^2} + \frac{mh_2^3 \cos \alpha}{3} \quad (2.22)$$

Le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident pour une section triangulaire s'écrit alors comme suit:

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{gm^2h_1^5} \quad (2.23)$$

Avec  $m = \text{ctang}(\theta)$  (pour  $\theta=45^\circ$ ,  $m=1$ ),  $g$  et  $\theta$  sont, respectivement, l'accélération de la pesanteur et l'angle d'inclinaison des parois latérales du canal par rapport à l'horizontal.

En incluant la relation (3.25) dans la relation (3.24) on obtient:

$$F_1^2 + \frac{2}{3} \cos\alpha + \frac{2}{3} k\lambda(Y^2 + Y + 1)\sin\alpha = \frac{F_1^2}{Y^2} + \frac{2}{3} Y^3 \cos\alpha \quad (2.24)$$

L'équation (3.26) peut être exprimée telle que :

$$F_1^2 = \frac{2}{3} Y^2 \frac{(Y^2 + Y + 1)}{(Y + 1)} \left[ \cos(\alpha) - \frac{k\lambda \sin(\alpha)}{Y - 1} \right] \quad (2.25)$$

La relation (2.25) exprime le nombre de Froude  $F_1$  en fonction du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées, de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du canal par rapport à l'horizontale et la longueur relative  $\lambda=L_j/h_1$  d'un ressaut hydraulique à pente positive, évoluant dans un canal de section droite triangulaire symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ .

Le remplacement de  $\alpha = 0$  dans la relation (3.27), donne la relation (3.28) de Hager et Wanoschek (1987) concernant le ressaut hydraulique classique dans le canal triangulaire.

$$F_1^2 = \frac{2}{3} Y^2 \frac{(Y^2 + Y + 1)}{(Y + 1)} \quad (2.26)$$

Pour déterminer le coefficient  $k$  de l'équation (3.27), l'approche proposée sera analysée à l'aide des données expérimentales.

La relation (3.28) a permis aussi d'obtenir l'expression de la longueur relative  $\lambda$  du ressaut tel que:

$$\lambda = \frac{(Y^3 - 1)\cos(\alpha) - \frac{3F_1^2(Y^2 - 1)}{2Y^2}}{k(Y^2 + Y + 1)\sin(\alpha)} \quad (2.27)$$

## II.6.2. Analyse expérimentale :

### II.6.2.1. Détermination du coefficient k :

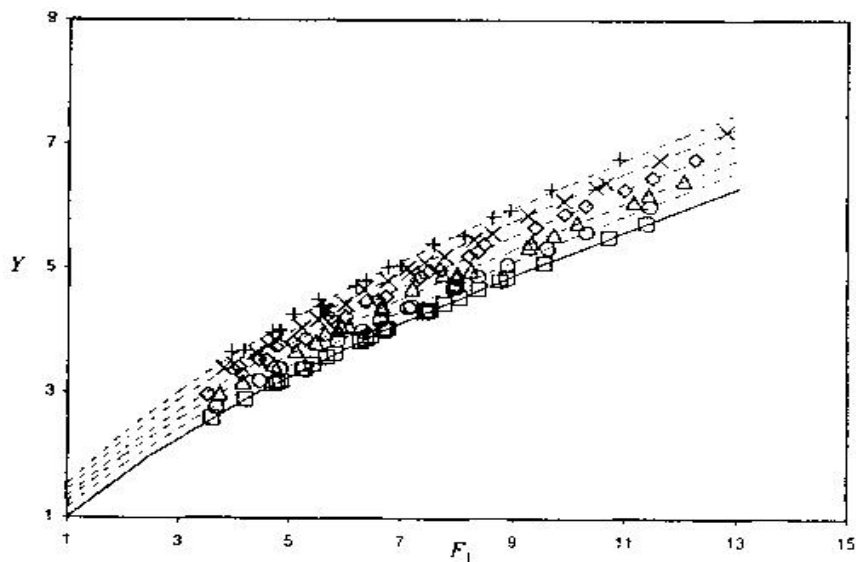
D'après la relation (2.28) l'expression du coefficient k est tel que:

$$k = \frac{(Y^3 - 1)\cos(\alpha) - \frac{3F_1^2(Y^2 - 1)}{2Y^2}}{\lambda(Y^2 + Y + 1)\sin(\alpha)} \quad (2.28)$$

Les données expérimentales ont permis aux auteurs de trouver une valeur constante du coefficient  $k = 1.12$ , ce dernier ne dépend pas de la pente du canal. Cette observation a été également vérifiée par MC CORCODALE et al (1994) ainsi par PAGLIARA et PERUGINELLI (2000) pour le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en contre pente.

### II.6.2.2. Relation explicite du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ et de l'angle d'inclinaison $\alpha$ du canal :

L'équation (2.11) apparaît sous une forme implicite et son application par conséquent se fait par itération.



**Figure. 2.11 :** Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude semi théorique  $F_1$  selon la relation (3.27), pour six valeurs de la tangente de l'angle d'inclinaison du canal, tels que:  $\tan(\alpha) = (\square)0.00$  (selon DEBABECHE et ACHOUR (2007) ),  $(\circ) 0.01$ ,  $(\triangle) 0.02$ ,  $(\diamond) 0.03$ ,  $(\times) 0.04$  et  $(*) 0.05$ .  
(—) Courbe selon relation (2.26), (---) courbe selon la relation (2.29).

Par ailleurs la figure 3.12 montre que pour  $F_1$  donne la profondeur de l'écoulement  $h_2$  augmente avec l'augmentation de la pente du canal  $\tan(\alpha)$ . En utilisant les mesures expérimentales, l'analyse de la relation (2.26) mène à la relation suivante (2.29):

$$Y = (9,15 \tan \alpha + 1,07) F_1^{(0,7-1,4 \tan \alpha)} \quad (2.29)$$

Pour  $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$

$$3 < F_1 < 13$$

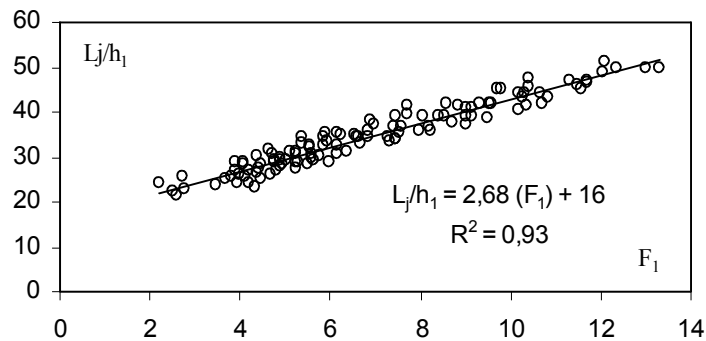
L'expression (2.29) est explicite d'où en déduit le rapport  $Y$ , sachant  $F_1$  et  $\tan(\alpha)$ .

### II.6.3. Longueurs caractéristiques du ressaut :

#### II.6.3.1. Variation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ :

La longueur  $L_j$  a été considérée comme étant la distance séparant la section initiale du ressaut et la section finale. L'objectif principal de cette partie de l'étude est de quantifier la longueur relative  $L_j/h_1$  dans la gamme de valeurs testées de la pente du canal. La représentation de la relation  $L_j/h_1 = f(F_1)$ , montre que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative  $L_j/h_1$  du ressaut.

La figure 2.12 montre la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure.2.12** : Variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour  $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$ .

Bien que le nuage de points soit assez dense, dû essentiellement à la difficulté de l'estimation de la longueur  $L_j$ , l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à une relation linéaire d'équation :

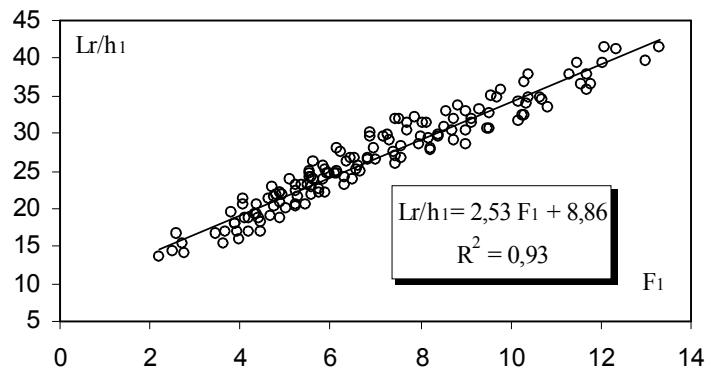
$$L_j/h_1 = 2,68 F_1 + 16 \quad (2.30)$$

Pour  $2 < F_1 < 14$

### II.6.3.2. Variation de la longueur relative $L_r/h_1$ du rouleau de surface en fonction du nombre de 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. L'analyse de la relation  $L_r/h_1 = f(F_1)$ , a permis également aux auteurs de montrer, que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative du rouleau.

La figure (2.13) montre la variation de la longueur relative  $L_r/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure.2.13 :** Variation de la longueur relative  $L_r/h_1$  du rouleau en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour  $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$ .

La figure 2.13 montre que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident, engendre celle de la longueur relative du rouleau. Par ailleurs, l'ajustement des points expérimentaux a permis aux auteurs d'aboutir à une relation linéaire d'équation :

$$L_r/h_1 = 2,53 F_1 + 8,86 \quad (2.31)$$

Pour  $2 < F_1 < 14$

### II.7. Conclusion :

A travers ce chapitre nous avons abordé, en premier temps les travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à pente positive. Il a été montré que la première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné était celle de BAKHMETEFF et MATZKE (1938), qui ont évoqué dans leur étude, le profil de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. En outre KINDSVATER (1944) a classifié les ressauts dans un canal à pente positive en quatre principaux types: type A, type B, type C et type D selon la position du pied du ressaut par rapport à l'extrémité aval de la pente.

En outre KINDSVATER (1944) a recommandé une relation explicite, liant le rapport des hauteurs conjuguées au nombre de Froude  $F_1$ , par la suite une relation simple a été proposée par RAJARATNAM (1966), la longueur du ressaut a été estimée expérimentalement par BRADLEY et PETERKA (1957).

En fin, nous avons abordé le ressaut en pente négative, la bibliographie montre que le ressaut en pente négative est classé en quatre configurations principales : type F, type FI, type FII et type F-S. Les travaux les plus significatifs sont ceux de MC CORCODALE et al (1994) qui ont étudié le cas limite d'existence des ressauts en pente négative. Une relation théorique a été proposée pour le type D, les auteurs confirment que ce type de ressaut est très sensible à la variation de la profondeur conjuguées pour les nombres de Froude  $F_1 < 4$ , cependant pour les nombres de Froude  $F_1 < 9$ , selon les auteurs, le ressaut limite en pente négative (type D) est difficile à établir.

En second a eu but de présenter les principaux travaux sur le ressaut hydraulique dans des canaux inclinés, l'étude de DEBABECHE et al (2009) et CHERHABIL (2010), relative à l'analyse de l'influence de la pente positive sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire symétrique. Une relation générale sous une forme implicite est obtenue liant le rapport des profondeurs conjuguées ( $Y$ ) en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et de l'angle d'inclinaison du canal  $\alpha$ .

L'expérimentation pour objectif d'évaluer les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique à savoir la longueur du ressaut et la longueur du rouleau de surface. Il a été montré que l'inclinaison du

canal, n'a pas d'influence sur les relations  $\lambda(F_1)$  et  $\lambda_r(F_1)$ . En outre, l'analyse statistique des mesures expérimentales a montré que les deux relations suivent une Loi de type linéaire

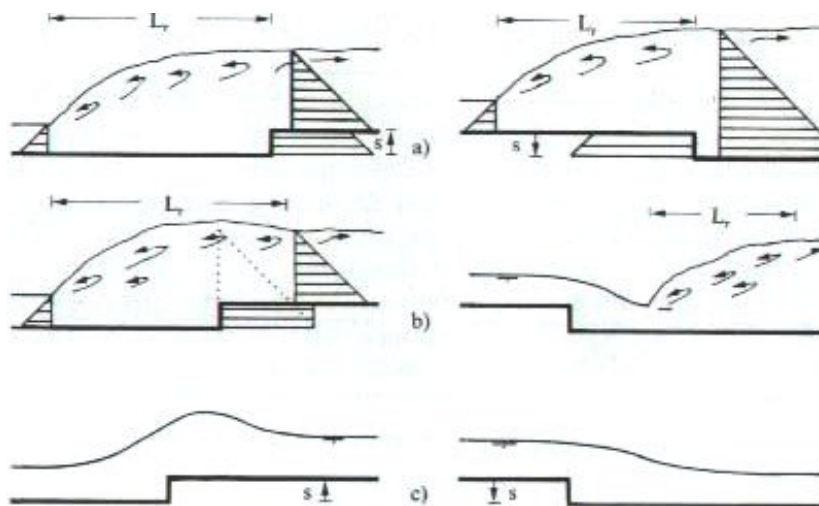
## Chapitre III

### RESSAUT HYDRAULIQUE FORCÉ PAR MARCHE

#### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons citer, les recherches le plus récentes dans ce domaine, sont certainement celles de HAGER et SINNIGER (1986), celles de HAGER et BRETZ (1987).les auteurs ont abordé le ressaut forcé par marche positive dans un canal rectangulaire. DEBABECHE et al(2009) concernant le ressaut contrôlé et forcé par marche positive dans un canal triangulaire.

La marche positive constitue l'un des moyens les plus simples pour réaliser la transition de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial, par un changement local du radier. Le ressaut se développe dans un canal rectangulaire à pentes amont et aval presque horizontales et avec marche positive de hauteur  $s$



*Figure 3.1 : types de ressaut hydraulique évaluant dans un canal doté d'une marche positive. (a) ressaut type A (b) ressaut type B (c) ressaut type B-min*

#### III.2.Travaux De HAGER et SINNIGER (1986) :

Dans cette étude HAGER et SINNIGER (1986) énoncent qu'en raison des fluctuations importantes de la surface d'eau, la longueur du ressaut  $L_j$  ne peut être définie avec suffisamment de précision. C'est la raison pour laquelle seule la longueur du rouleau  $L_r$  est prise en considération

Par comparaison avec le ressaut hydraulique dans un canal sans marche, on distingue divers types de ressauts ,la transition d'un type à l'autre est normalement continue ; du point de vue du dimensionnement, concernant la position limite amont, le ressaut hydraulique apparait de manière similaire avec ou sans marche. Cette limite est donc caractérisée par un ressaut pour lequel l'extrémité aval du rouleau se trouve au droit de la marche, la répartition des pressions est évidemment



hydrostatique et les vitesses sont réparties presque uniformément dans les deux sections limitant le volume de contrôle ,ce type de ressaut est appelé ressaut type A (figure 3.2.a).

Les paramètres  $F_1$ ,  $Y$  et  $S$  peuvent être liés entre eux par l'application du théorème de la quantité de mouvement en négligeant les effets de frottement (HAGER et BRETZ (1987)).

$$F_1^2 = \frac{Y[(Y+S)^2 - 1]}{2(Y-1)} \quad (3.1)$$

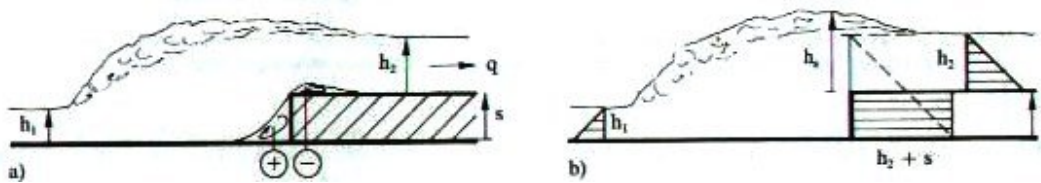
Avec

-  $Y = h_2/h_1$  : rapport des hauteurs conjuguées ou  $h_1$  et  $h_2$  sont respectivement les hauteurs d'eau à l'amont et à l'aval du ressaut.

-  $S = s/h_1$  : hauteur relative de la marche positive ;  $s$  étant la hauteur de la marche positive.

-  $F_1 = q/(gh_1^3)^{1/2}$  nombre de Froude à la section du ressaut ou  $q = Q/b$  est le débit par unité de largeur.

Le ressaut hydraulique A se transforme en un ressaut type B .il correspond à la position stable du ressaut situé le plus loin possible à l'aval (figure 3.2.b).



**Figure 3.2** ; a) zones de séparation d'écoulement pour une marche positive, (+) et (-) indiquent respectivement les surpressions et les dépressions par rapport à la pression hydrostatique. b) répartition de la pression autour du volume de contrôle

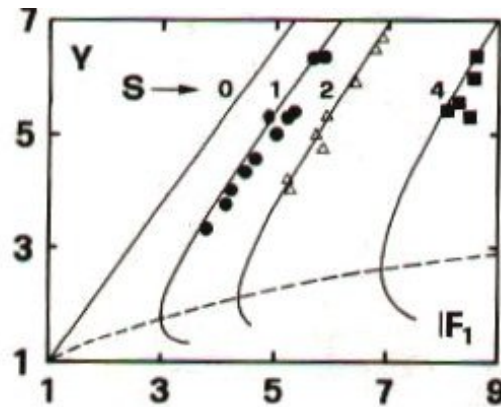
Comme est montré à la (figure 3.2.a), il existe deux zones de séparation autour de la marche positive, celle située à l'amont et caractérisée par une surpression, celle située à l'aval par une dépression par rapport à la pression hydrostatique.

Comme hypothèse de la dépression sur la marche positive, une distribution uniforme est admise égale la valeur  $(h_2+s)$  ou  $h_2$  est la hauteur d'eau aval sur la marche (figure 3.2.b).

La relation liant les paramètres  $F_1$ ,  $Y$  et  $S$  régissant le ressaut hydraulique forcé par marche positive type B s'écrit donc

$$F_1^2 = \frac{Y[(Y+S)^2 + S^2 - 1]}{2(Y-1)}, \quad S \geq 0 \quad (3.2)$$

Les courbes correspondant montrent une bonne concordance avec les essais de FORSTER SKRINDE (1950).



**Figure 3.3 :** variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour différentes hauteurs relatives  $S$  de marche positive. (-) courbes théorique pour divers  $S$  selon HAGER et SINNIGER (1986) ; points expérimentaux de Froude et FORSTER SKRINDE (1950) (---) la limite théorique

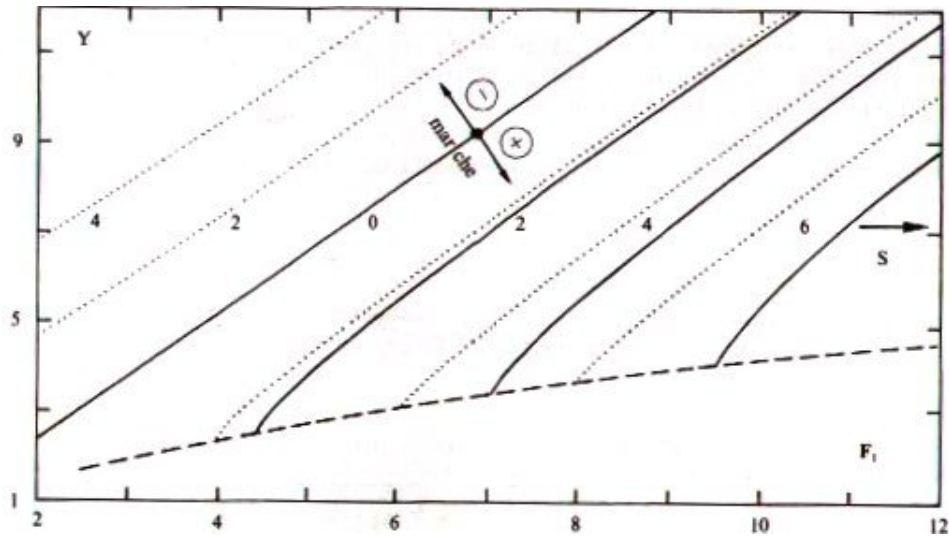
Pour  $Y$  et  $S$  données, l'équation (3.2) conduit à un nombre de Froude  $F_1$  plus grand que celui résultant de l'équation (3.1) autrement dit, la valeur de  $Y$  tirée de l'équation (3.2) est inférieure à celle tirée de l'équation (3.1) pour une même valeur de  $F_1$ , les deux relations ne deviennent identiques que pour  $S=0$ , correspondant au ressaut hydraulique dans un canal sans marche (classique)

Une formule simplifiée est développée pour la dissipation d'énergie relative à la charge amont pour le ressaut type B sur marche positive :

$$\eta = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right)^2 \text{ Pour } F_1 > 2,5 \quad (3.3)$$

Il faut dire que  $\eta$  est indépendant de  $S$  et correspond donc au cas  $S=0$ .

La figure 3.4 montre la variation du rapport des hauteurs conjuguées pour les marches positives et négatives en fonction du nombre de Froude amont  $F_1$  et la hauteur relative  $S$  de la marche. Les courbes pointillées correspondent à la position extrême amont et les courbes pleines se réfèrent à la position extrême aval de la marche, la courbe en trait discontinu correspond à la limite inférieure de l'apparition du ressaut sur une marche positive de la fonction  $Y(F_1)$  pour  $S$  fixe Hager Et Sinniger (1986)



**Figure 3.4 :** variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de FROUDE  $F_1$  pour les marche positive et négative dans un canal rectangulaire prismatique (.....) ressaut type A, (-)ressaut type B et  $B_{min}$ , (---)la limite inférieure de l'apparition du ressaut sur marche positive

### III.3.Travaux de HAGER et BRETZ (1987) :

Comparé a un ressaut hydraulique dans un canal prismatique et à fond horizontale, le bassin amortisseur doit forcer l'apparition du ressaut quelques soient les conditions hydrauliques. En particulier, le ressaut hydraulique ne doit pas sortir du bassin amortisseur la stabilité d'un bassin amortisseur est la capacité de l'ouvrage de maintenir la position du ressaut sous des hauteurs d'eau aval hu variables, en fixant la hauteur amont  $h_1$  et le nombre de Froude  $F_1$  incident correspondant.

Soit  $\Delta Y = Y_A - Y_B$  le changement maximal admissible de la hauteur d'eau aval, ou  $Y_A$  caractérise le ressaut type A et  $Y_B$  le ressaut type B. une estimation de  $\Delta Y$  est selon HAGER et BRETZ (1987)

$$\Delta Y = S/6 \quad \text{marche positive} \quad (3.4)$$

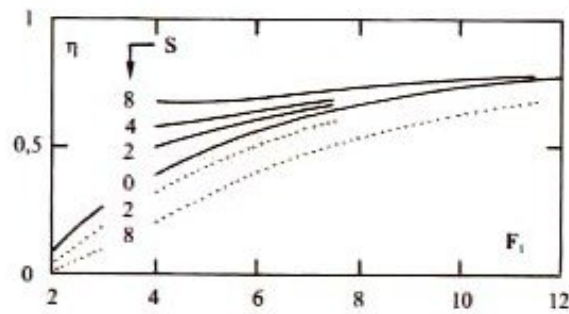
$$\Delta Y = 13S/12 \quad \text{marche négative} \quad (3.5)$$

HAGER Et BRETZ (1987) montre que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude  $F_1$ .

La dissipation relative d'énergie  $\eta = \Delta H / H_1$  est définie par la perte de charge  $\Delta H$  à travers le ressaut hydraulique comparée à énergie amont, soit  $H_1 = h_1 + q^2 / (2gh_1^2)$ .

La figure 3.5 représente  $\eta = \eta (F_1, S)$  pour les deux types de marche. On constate que  $\eta$  dépend fortement de  $S$  et  $F_1$ . Pour  $F_1$  et  $S$  fixes, l'efficacité minimale est donnée par le ressaut hydraulique type A est celle la plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique type  $B_{min}$

Sur la marche négative.



**Figure 3.5 :** efficacité  $\eta = \Delta H / H_1$  en fonction de  $F_1$  et de  $S$  (.....) ressaut type A marche négative , ( $s=0$ ) ressaut type B sur marche positive (---) ressaut type B-min sur marche négative

La capacité de bassin d'amortisseur correspondant à son extension longitudinale à condition que le ressaut se trouve entièrement dans le dissipateur. les indications suivantes se réfèrent à la longueur du rouleau, la répartition de la vitesse à l'extrémité aval du rouleau est loin d'être uniforme. En ajoutant encore 20 à 40% de la longueur du rouleau  $L_r$ , cette répartition devient presque uniforme, la vitesse  $v_2$  auprès du fond étant sensiblement égale à  $q/h_2$

les essais sur modèle réduit montre que la longueur relation  $\lambda = L_r / (h_2 + s)$  ne varie pas systématiquement avec  $F_1$ . Pour les positions extrêmes, HAGER et BRETZ (1987) ont obtenu les valeurs moyennes suivantes :

$$\lambda = 4,75 \text{ pour ressaut type A} \quad (3.6)$$

pour le ressaut type A, la fin du rouleau se trouve par définition au niveau de la marche pour le ressaut de type B le pied du ressaut se trouve à peu près à une distance  $L_r/2$  à l'amont de la

marche. De plus, avec :  $U = \sqrt{2F_1} - \frac{1}{2}$ , la longueur du fond protégée  $L_p$  se calcule par :

$$\lambda_p = 6 \left( U - \frac{6S}{5} \right) \quad (3.7)$$

Avec :  $\lambda_p = L_r / h_1$

#### III.4. Travaux de DEBABECHE et al (2009) :

L'étude propose d'analyser expérimentalement, les caractéristiques du ressaut hydraulique forcé par marche positive, évoluant dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de  $90^\circ$ . L'objectif principal de cette étude est de trouver les relations fonctionnelles, exprimées en termes adimensionnels, liant ces caractéristiques

### III.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :

Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut La figure 3.6 représente la variation de  $(Y_A-1)$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, tel que  $Y_A = (h_2+s)/h_1$  est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut de type A. La courbe en trait continu représente la relation  $Y_A-1=f(F_1)$ , qui est exprimée par la relation (3.8). La représentation graphique des points expérimentaux des rapports  $Y_A$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  a abouti à une courbe unique :

$$Y_A - 1 = 3,41 \text{Ln} \left( \frac{F_1 + 4}{5} \right) \quad (3.8)$$

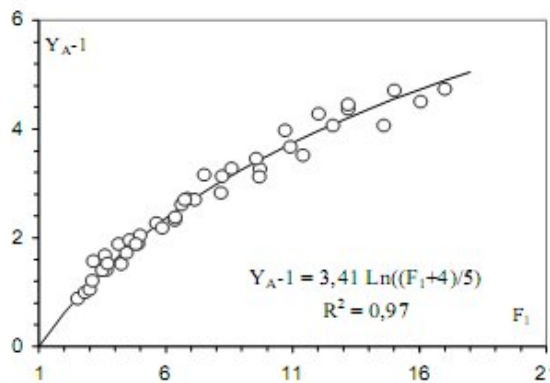


Figure 3.6 : Variation expérimentale de  $(Y_A - 1)$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour le ressaut de type A. (o) points expérimentaux. (—) Courbe selon l'équation (3.8).

### III.4.2. Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de Froude :

L'analyse des mesures expérimentales a également montré, que la fonction  $s/h_1=f(F_1)$  est de type logarithmique:

$$S_A = \frac{s}{h_1} = 2,94 \text{Ln} \left( \frac{F_1 + 4}{5} \right) \quad (3.9)$$

"Ln" désigne le logarithme népérien et la fonction a été ajustée de telle sorte que :  $F_1 = 1$  donne  $S_A = 0$ . Sur la figure 4 sont représentées à la fois les mesures expérimentales de la hauteur relative  $S_A$  de la marche positive en fonction de  $F_1$  et la courbe expérimentale en trait continu traduisant la variation de la hauteur relative  $S_A$  de la marche positive du ressaut nécessaire pour avoir un ressaut de type A.

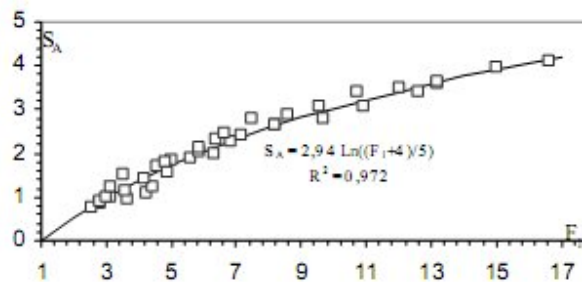


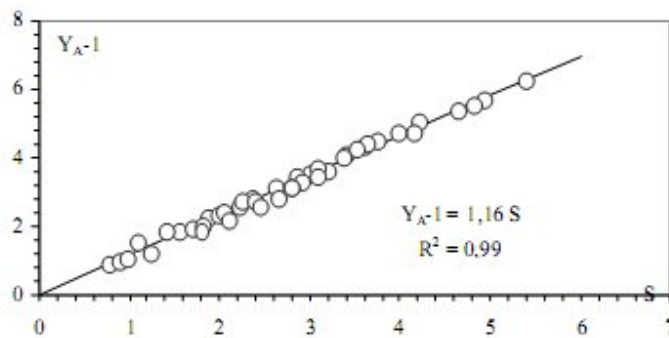
Figure 3.7 : Variation de la hauteur relative  $S_A$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon l'équation (3.9).

Comme pour le cas du ressaut contrôlé par marche positive, on a établi une relation unique reliant la hauteur relative  $S_A$  de la marche positive et le rapport des hauteurs conjuguées  $Y_A$  du ressaut de type A.

La représentation graphique de la relation  $Y_A - 1 = f(S_A)$  a abouti à une courbe unique, comme l'indique la figure 3.7. Un ajustement linéaire a permis d'écrire que :

$$Y_A = 1 + 1,16S_A \quad (3.10)$$

Pour l'ajustement de cette droite, on a pris en considération la condition :  $S_A=0 \Rightarrow Y_A=1$ .



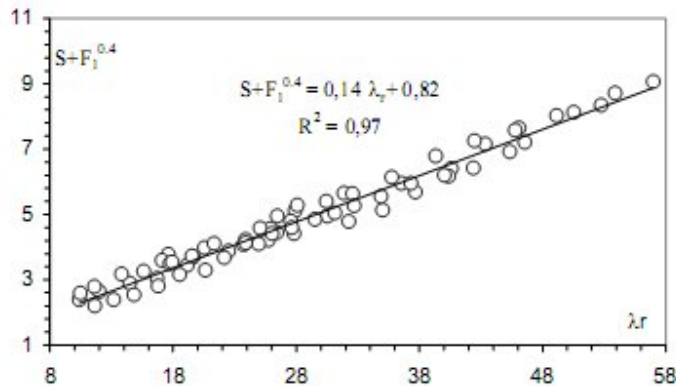
**Figure 3.8:** Variation de  $(Y_A - 1)$  en fonction de la hauteur relative  $S_A$  de la marche positive. (o) Points expérimentaux. (—) Droite d'équation :  $Y_A - 1 = 1,16 S_A$ .

La droite (3.11) peut également être retrouvée, en faisant le rapport des équations (3.9) et (3.10) :

$$\frac{(Y_A - 1)}{S_A} = \frac{3,14}{2,94} \approx 1,16 \quad (3.11)$$

Position relative de la marche positive comme pour le cas du ressaut contrôlé par marche positive, nous avons établi une relation générale pour le ressaut de type A. Cette relation peut également s'écrire sous la forme  $\varphi(S_A, F_1, \lambda r) = 0$ , tels que  $S_A = s/h_1$  et  $\lambda r = L_r/h_1$ . Pour le ressaut de type A, la position  $L_s$  de la marche correspond à la longueur  $L_r$  du rouleau de surface. L'analyse des mesures expérimentales obtenues a montré que la meilleure représentation graphique adimensionnelle de la fonction  $\varphi$  est celle indiquée par la figure 6. Les points expérimentaux se situent sur une droite d'équation :  $S_A + F_1^{0,4} = c \lambda r + d$ . Les valeurs des constantes  $c$  et  $d$  ont été obtenues par un ajustement linéaire. L'analyse des mesures expérimentales a montré que les trois variables adimensionnelles  $F_1$ ,  $S_A$  et  $\lambda r$  intervenant au phénomène sont liées par la relation (3.12) :

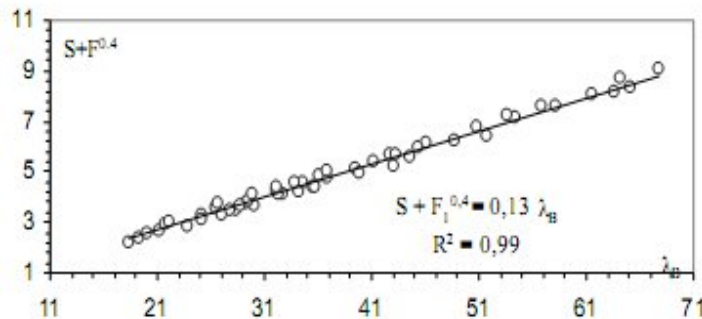
$$S_A + F_1^{0,4} = 0,14 \lambda r + 0,82 \quad (3.12)$$



**Figure 3.9 :** Variation de  $(S_A + F_1^{0.4})$  en fonction de la position relative  $\lambda_r = L_r/h_1$  de la marche positive. (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (3.12).

### III.4.3. Longueur relative du bassin :

Une relation générale a été également établie entre la longueur relative  $\lambda_B$  du bassin, la hauteur relative  $S_A$  de la marche positive et le nombre de Froude  $F_1$ . La longueur  $L_B$  étant la distance qui sépare le pied du ressaut de l'aval du rouleau où s'effectue la mesure de la profondeur conjuguée  $h_2$ . Sur la figure 3.10 sont représentées à la fois les mesures expérimentales et la courbe expérimentale en trait continu traduisant la variation de  $(S_A + F_1^{0.4})$  en fonction de la longueur relative  $\lambda_B = L_B/h_1$  de la marche positive, du ressaut type A.



**Figure 3.10:** Variation de  $(S_A + F_1^{0.4})$  en fonction de la longueur relative  $\lambda_B = L_B/h_1$  de la marche positive. (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (3.13).

L'analyse statistique des mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés non linéaire a montré que les trois variables adimensionnelles  $F_1$ ,  $S_A$  et  $\lambda_B$  intervenant au phénomène sont liées par la relation (3.13) :

$$S + F_1^{0.4} = 0,13 \lambda_B \quad (3.13)$$

### **III.5.Conclusion :**

Nous avons présente, à travers ce chapitre, les principaux travaux entrepris pour l'étude du ressaut hydraulique forcé par marche évaluant dans un canal rectangulaire. Nous avons abordé, en premier lieu ; travaux de HAGER et SINNIGER (1986), que montrent le rapport des hauteurs conjuguées varie pour la marche positive en fonction du nombre de Froude amont  $F_1$  et de la hauteur adimensionnelle de la marche  $S=s/h_1$ . Dans un second temps, les HAGER et BRETZ (1987), examiné les ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre du Froude  $F_1$ . L'étude montre que l'efficacité relative minimale est donnée par le ressaut hydraulique type-A est celle la plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique type B-min sur marche négative.

A la fin de ce chapitre nous avons exposé les travaux de DEBABECHE et al. (2009), concernant l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique évaluant dans un canal triangulaire. Ceci est concerne la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude, la hauteur relative de la marche positive en fonction de nombre de Froude et la longueur relative du bassin en fonction de nombre de Froude, les courbes d'ajustement créés, montrent un écart important, entre le ressaut de type A forcé par marche positive et contrôlé par marche positive.



# CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

La première partie de notre étude a eu pour objectif de passer en revue l'état des connaissances des principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques ayant trait à notre étude. A travers trois chapitres, on a essayé de présenter une synthèse bibliographique plus ou moins exhaustive, sur le ressaut hydraulique incliné et le ressaut forcé et contrôlé par marche dans deux types de profils de canaux prismatiques, à savoir : le canal trapézoïdal, le canal rectangulaire et triangulaire.

Le premier chapitre a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique, dont nous avons examiné en première position les caractéristiques : ses hauteurs initiales et finales, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau.

Nous avons montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de BELANGER qui exprime le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  à l'amont du ressaut

Le second chapitre de cette partie bibliographique, a permis d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique évoluant dans les canaux inclinés. On s'intéressée, dans un premier temps au ressaut hydraulique évoluant dans un canal inclinée n'a pratiquement été étudié qu'uniquement dans le cas du canal à section droite rectangulaire (Rajaratnam, 1966; Mc Corcodal, 1994; Pagliara. S. et peruginelli, A., 2000, Beiram et Chamani, 2006...). Selon Rajaratnam (1966), les études de ce type de ressaut a été déjà élaborée auparavant par Darcy et Bazin (1865), ainsi que par Riegel et Beebe (1917) qui sont toujours d'actualité, dans le second temps nous avons examiné les Travaux de Debabeche et al (2009) au Il a été montré que l'inclinaison du canal, n'a pas d'influence sur les relations  $\lambda(F_1)$  et  $\lambda_r(F_1)$ . En outre, l'analyse statistique des mesures expérimentales a montré que les deux relations suivent une loi de type linéaire, de la forme  $y = ax + b$ . Par ailleurs l'étude expérimentale a montré que l'inclinaison du canal n'avantage pas la dissipation d'énergie.

Nous avons présente, à travers ce chapitre Le troisième, les principaux travaux entrepris pour l'étude du ressaut hydraulique forcé par marche évaluant dans un canal rectangulaire. Nous avons abordé, en premier lieu travaux de; Hager et Sinniger (1986) ;

Hager et Bretz (1987) montre que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude  $F_1$ . La dissipation relative d'énergie  $\eta = \Delta H / H_1$  est définie par la perte de charge  $\Delta H$  à travers le ressaut hydraulique comparée à l'énergie amont, soit  $H_1 = h_1 + q^2 / (2gh_1^2)$ .

En seconde lieu, nous avons, présenté l'étude de Debabeche et al (2009), objectif d'étudier expérimentalement le ressaut de type A forcé par une marche positive, dans un canal de section droite triangulaire à angle d'ouverture de  $90^\circ$ .

Une loi de type logarithmique est proposée pour évaluer le rapport  $Y$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les trois types de ressaut. En outre, la représentation graphique des mesures expérimentales montre que pour chacune des configurations de ressauts suscitées,  $(Y-1)$  augmente au fur et à mesure que la hauteur relative  $S$  du seuil croît, suivant une courbe unique linéaire dont la pente varie d'une configuration à l'autre. Par ailleurs, une relation de type puissance, liant la hauteur relative ( $S$ ) de la marche positive, le nombre de Froude  $F_1$  et la longueur relative du bassin a été trouvée pour les trois types de ressaut étudiés. En outre, pour les nombres de Froude supérieurs à 9, le ressaut forcé par marche positive évolue dans un bassin plus court que son homologue contrôlé par seuil. Par ailleurs, la représentation graphique du rendement en fonction du nombre de Froude incident, montre que les points de mesures du ressaut contrôlé par seuil épais et par marche positive sont presque confondus. Ainsi on peut conclure que le rendement est quasi indépendant de la forme du seuil.

---

## **DEUXIEME PARTIE**

RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL DANS UN  
CANAL TRAPEZOÏDAL A PENTE VARIABLE

**CHAPITRE I : ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE  
CONTROLE PAR SEUIL DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL  
A PENTE VARIABLE**

**CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE  
DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL A PENTE VARIABLE**

---

# INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE

La deuxième partie de notre étude, propose d'examiner par voie expérimentale le ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal trapézoïdal à pente variable

Cette étude a pour principal objectif d'analyser et de déterminer l'effet de la pente du canal sur les caractéristique de ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal a pente variable L'étude expérimentale a été menée sous cinq hauteurs initiales :  $h_1$  (mm) = 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60mm. Pour chaque hauteur  $h_1$  choisie, on donne au canal six positions d'inclinaison d'angle  $\alpha$  correspondant chacune à une valeur bien déterminé de la pente positive, de sorte que la tangente de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  par rapport à l'horizontal, prend les valeurs suivantes (en %) : -1,-0.5, 0, 0.5, 1.5, 2, Une gamme assez pratique de nombres de Froude incident a été ainsi obtenue :  $2 < F_1 < 14$ .

Cette partie est divisée en deux chapitres :

- Le premier chapitre de cette partie de notre étude sera consacré à la description du modèle expérimentale qui a servi de base à l'étude du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, à pente variable.
- Le deuxième chapitre aura pour objectif d'étudier par voie expérimentale les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal trapézoïdal à pente positive et celle du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal trapézoïdal à pente variable. L'expérience sera faite, pour les deux types de pente (pente positive-pente négative).
- Le troisième chapitre et le dernier chapitre de cette présente partie sera entièrement destiné à l'analyse théorique du ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal de section droite triangulaire, à pente positive a permis de montrer que le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident peut être exprimé en fonction de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du canal par rapport à l'horizontal, du rapport  $Y=h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées du ressaut ( $h_1$  et  $h_2$  étant les hauteurs du niveau d'eau respectivement à l'extrémité amont et aval), et de la longueur relative  $\lambda=Lj/h_1$  du ressaut, tel que :  $F_1 = f(Y, \lambda, \alpha)$ . Cette relation fonctionnelle a été établie par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut, en tenant compte des hypothèses simplificatrices citées précédemment.

## Chapitre I

### **ETUDE EXPERIMENTALE ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL A PENTE VARIABLE**

#### **I.1. Introduction :**

Le présent chapitre a pour but d'étudier par voie expérimentale les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal à pente variable. Nous décrirons en premier lieu le protocole expérimental, constitué du canal trapézoïdal, des appareils et instruments utilisés pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique. En second lieu, nous passerons à la procédure expérimentale suivie durant les essais. Nous exposerons enfin les résultats obtenus.

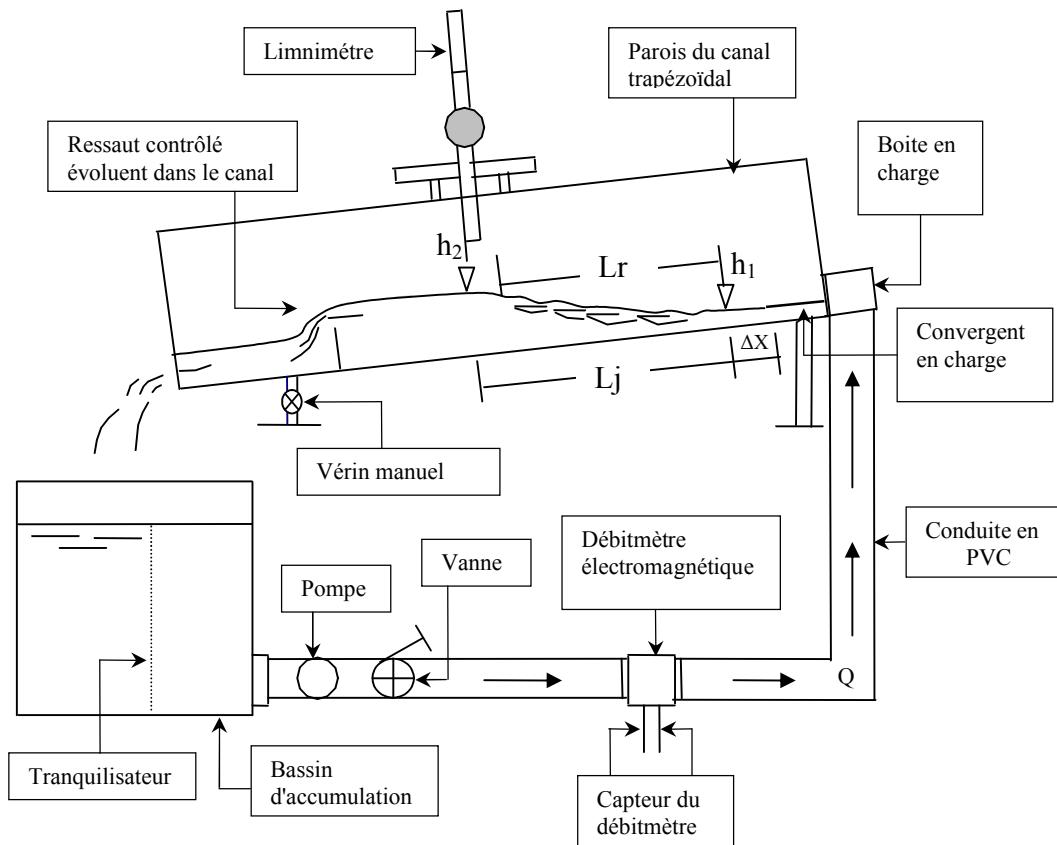
#### **I.2. Description du modèle :**

##### **I.2.1. Description du canal :**

Le canal de mesures (figures 1.1 et 1.2) qui nous a servi de banc d'essai est de section trapézoïdale, il est constitué essentiellement par une structure métallique rigide, sur laquelle est fixé latéralement, des deux cotés une série de 6 panneaux transparents en plexiglas permettant les prises de vue et observations. Ces panneaux sont reliés entre eux par collage au silicone. L'étanchéité est assurée par des joints en caoutchouc et par le silicone. Un vérin manuel est utilisé pour varier la pente du canal.

Le banc d'essais est constitué d'un grand canal rectangulaire dans lequel est inséré un canal de mesure de section trapézoïdale, caractérisé par une largeur de base 20cm, de longueur 6m et un angle d'inclinaison des parois latérales de  $72,68^\circ$  ; relié à un bassin d'accumulation par le moyen d'une conduite circulaire de 115 mm de diamètre. Celle-ci est reliée à une boîte métallique fermée, sur laquelle est insérée une ouverture en tôle de section trapézoïdale débouchant dans le canal. Le rôle de ce dernier est de générer un écoulement incident à grande vitesse. La section de sortie de celle-ci est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale  $h_1$  du ressaut. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe axiale (figure 1.5) débitant jusqu'à 44 l/s.

Le réglage des débits volumes s'effectue par manipulation de la vanne et sont mesurés à l'aide d'un débitmètre à affichage numérique (figure 1.8).



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



**Figure 1.2 :** Photographie du canal de mesure utilisé.



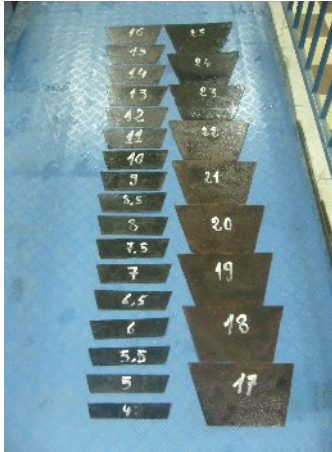
*Figure 1.3 : Photographie de la boîte en charge et vanne de manipulation.*



*Figure 1.4 : Photographie d'une série de convergent*



*Figure 1.5 : Pompe centrifuge.*



a)



b)

*Figure 1.6 : a) photographie des séries du seuil de mesure  
b) Photographie d'un vérin manuel*

### **I.2.2. Débitmètre électromagnétique :**

Le débitmètre électromagnétique est un dispositif destiné à la mesure des débits. il est composé d'un capteur de mesures (Figure 1.7) placé au travers de l'écoulement, raccorder par un câble électrique à un convertisseur de mesures a affichage digital (Figure1.8).selon le cas le capteur de mesures présente un diamètre nominal  $D=100$  mm, pour cela le débit volume mesuré est inscrit dans l'intervalle : 2,356 l/s jusqu'à 30,00 l/s



*Figure 1.7 : photographie du capteur de mesure du débitmètre électromagnétique*



*Figure 1.8 : a) photographie du convertisseur du débitmètre électromagnétique  
b) photographie de l'écran d'affichage des débits*



Le principe de fonctionnement de cet appareil est fondé sur la loi d'induction de Faraday. Le liquide qui traverse le débitmètre constitue un élément conducteur qui génère une tension induite par le champ magnétique créé par les bobines d'induction de cet appareil électromagnétique (figure 1.9). Cette tension est linéairement proportionnelle à la vitesse de passage du liquide.

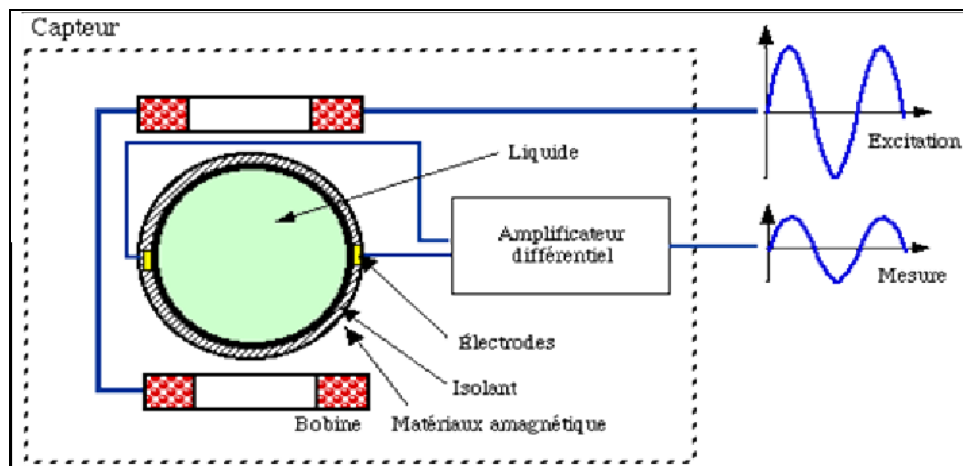


Figure 1.9: Schéma électrique du capteur du débitmètre électromagnétique

L'induction magnétique, est produite par deux bobines placées de part et d'autre de la conduite de mesure. La conduite est en matériaux magnétique et est revêtue sur sa surface intérieure d'une couche isolante. Deux électrodes de mesure sont placés aux extrémités du diamètre perpendiculaire au champ. Les bobines sont alimentées par une tension alternative afin d'éviter une polarisation des électrodes.

### I.2.3. Limnimétrie :

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à la hauteur due à la section de la sorte du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans ( $L_r$ ) canal de mesure ont été évaluées par un limnimétrie.

La lecture sur le limnimétrie s'effectue en deux étapes : on procède d'abord à la lecture de la graduation sur la règle, située immédiatement en haut du zéro du vernier, puis on effectue la lecture du nombre de cinquantième en face de la division qui coïncide ou qui est la plus rapproché d'une division de la règle.

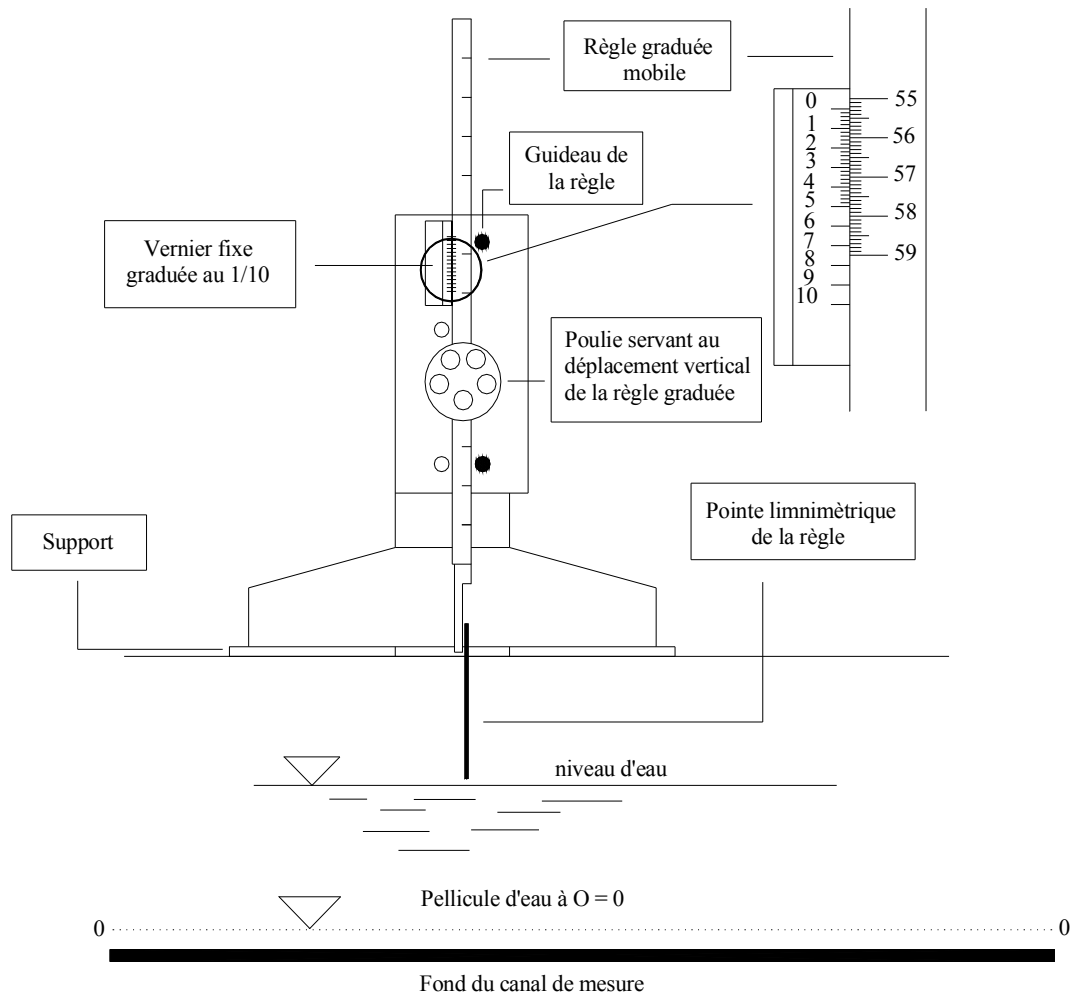


Figure 1.10 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.

### I.3. Résultats expérimentaux :

#### I.3.1. Procédure expérimentale :

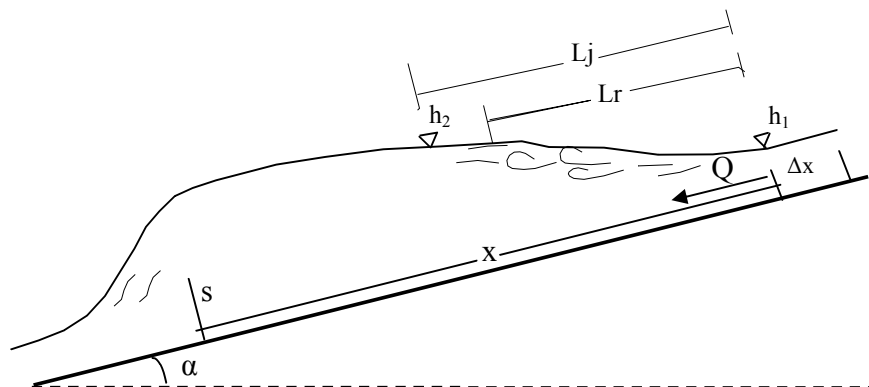
Les caractéristiques étudiées dans un ressaut hydraulique contrôlé par seuil à pente variable sont : le débit volume ( $Q$ ), la hauteur initiale  $h_1$ , mesurée au pied de ressaut, la hauteur finale  $h_2$ , mesurée au droit de la longueur du rouleau, la hauteur ( $s$ ) du seuil, l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du canal par rapport à l'horizontal, la longueur ( $L_r$ ) du rouleau, mesurée à la fin de la formulation du ressaut et la longueur ( $L_j$ ) du ressaut, mesurée dans le même endroit de la hauteur finale ( $h_2$ ).

Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, le rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées du ressaut, la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil, la longueur relative  $\lambda_j = L_j/h_1$  du ressaut.

L'étude expérimentale a été menée sous cinq hauteurs initiales :  $h_1$  (mm) = 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60mm. Pour chaque hauteur  $h_1$  choisie, on donne au canal six positions d'inclinaison d'angle  $\alpha$  correspondant chacune à une valeur bien déterminée de la pente positive, de sorte que la tangente de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  par rapport à l'horizontal, prend les valeurs suivantes (en %) : -1,-0.5,0, 0.5,1.5, 2, . Une gamme assez pratique de nombres de Froude incident a été ainsi obtenue :  $2 < F_1 < 14$ .

L'accroissement du nombre de Froude  $F_1$  entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval ainsi que l'augmentation des longueurs  $L_r$  du rouleau et ( $L_j$ ) du ressaut ; pour ramener le pied du ressaut à sa position d'origine (à la sortie de l'écoulement), il est nécessaire d'augmenter la hauteur du seuil  $s$  se trouvant à l'extrémité aval du canal.

Les figures 1.10 et 1.11 illustrent deux configurations typiques de ressaut contrôlé par seuil mince en canal trapézoïdal, incliné d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontal, pour la même hauteur initiale  $h_1 = 35$  mm et à débit volume croissant.



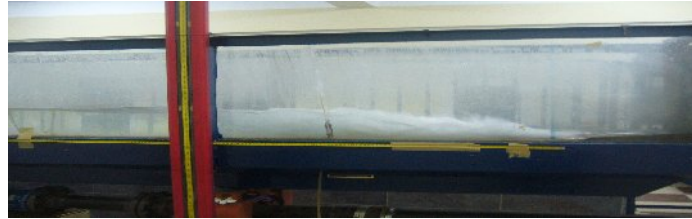
**Figure 1.11:** Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal à pente positive.



**Figure 1.12:** photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé à pente négative  
 $F_1 = 9,05$ ;  $s = 3$  cm;  $L_j = 154$  cm;  $h_2 = 18,4$  cm;  $\tan(\alpha) = -0,01$



**Figure 1.13** : photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé à pente nulle  
 $F_1 = 6,63$ ;  $s = 7$  cm;  $L_j = 110$  cm;  $h_2 = 13,7$  cm ;  $\tan(\alpha) = 0$



**Figure 1.14** : photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé à pente positive  
 $F_1 = 8,96$ ;  $s = 17$  cm;  $L_j = 164$  cm;  $h_2 = 20,8$  cm ;  $\tan(\alpha) = 0,01$

Pour obtenir les résultats expérimentaux, nous avons suivis les étapes suivantes :

1. Mesure de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  par rapport à l'horizontal ;
2. Calculer du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, par application de la relation :

$$F_1 = \frac{\sqrt{Q^2 [b \times (1 + 2M)]}}{\sqrt{g [bh^*_1 (1 + M)]^3}}$$

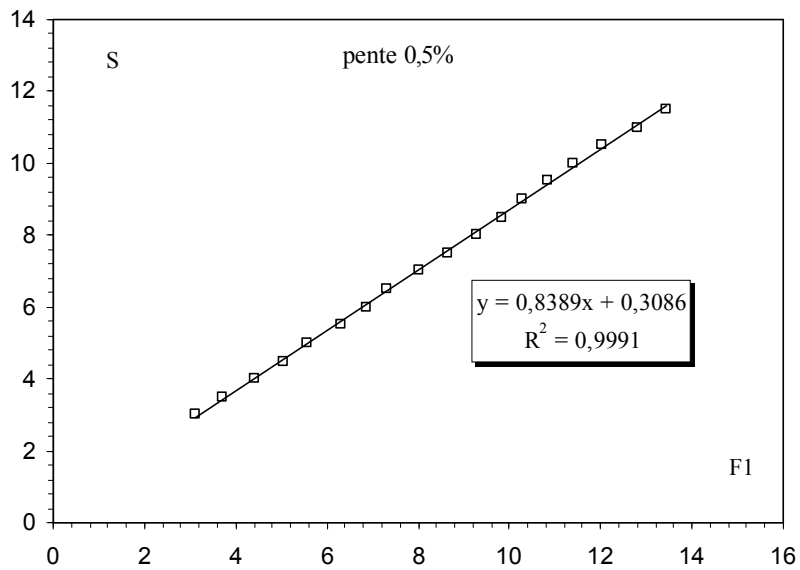
3. Mesure de la longueur  $L_r$  du rouleau ;
4. Mesure de la longueur  $L_j$  du ressaut ;
5. Mesure de la hauteur géométrique  $s$  du seuil ;
6. Mesure de la hauteur conjuguée aval  $h_2$  du ressaut ;
7. Mesure du débit volume ;

### I.3.2. Analyse des résultats expérimentaux :

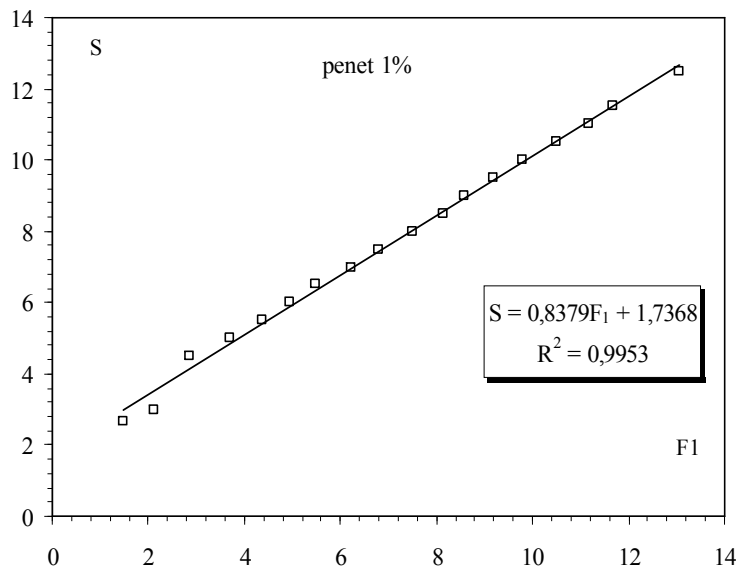
#### I.3.2.1. Ressaut hydraulique a pente positive et négative :

##### I.3.2.1.1. Variation de la hauteur relative du seuil $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ :

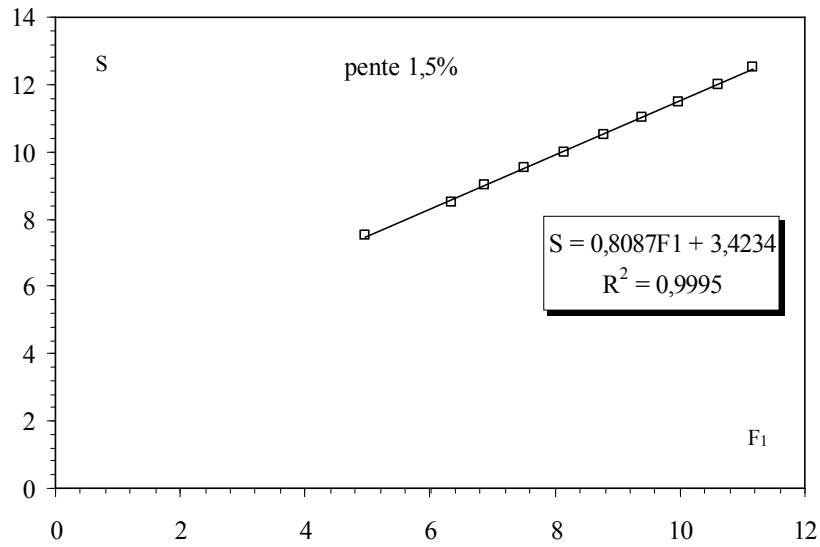
Les figures de (1.15) à (1.19) montrent la variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour six angles d'inclinaison  $\alpha$  distincts, tels que :  $\tan(\alpha) = 0.00, 0.005, 0.015, 0.01, 0.02, -0.005, -0.01$ .



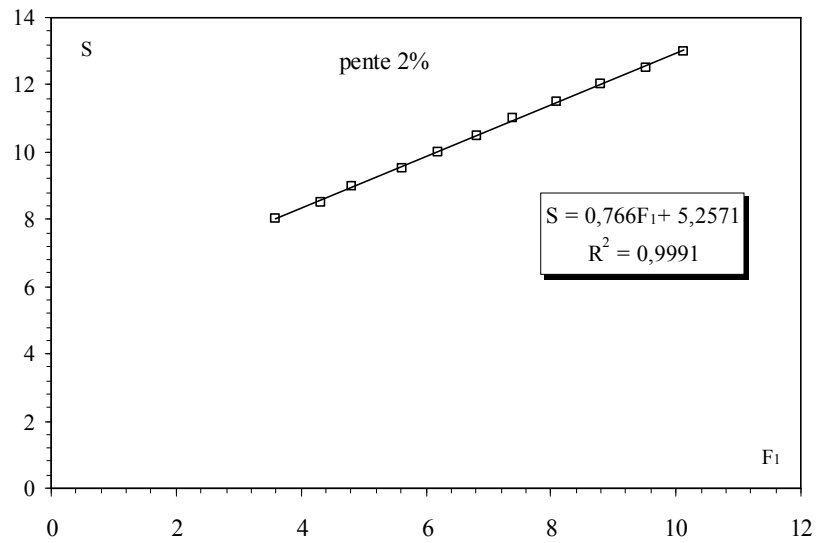
**Figure 1.15 :** Variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , Pour  $\tan(\alpha) = 0,005$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.



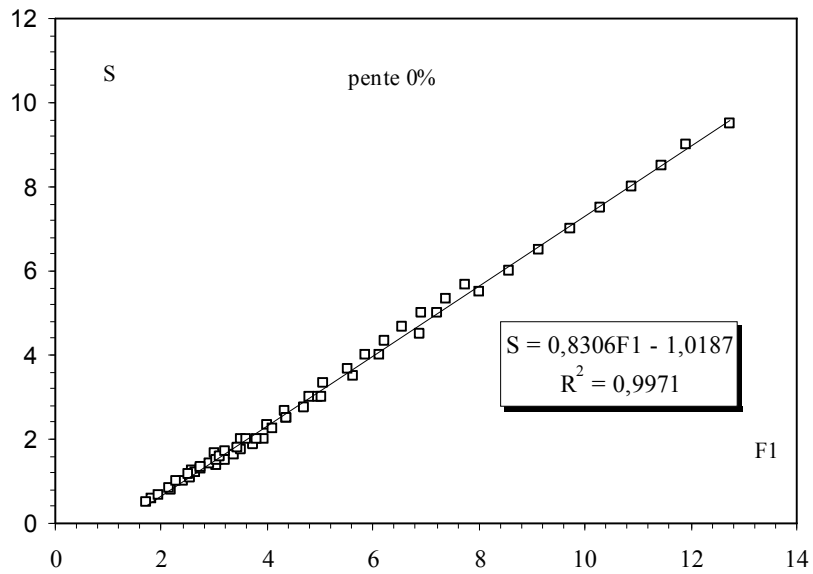
**Figure 1.16 :** Variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour  $\tan(\alpha) = 0,01$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.



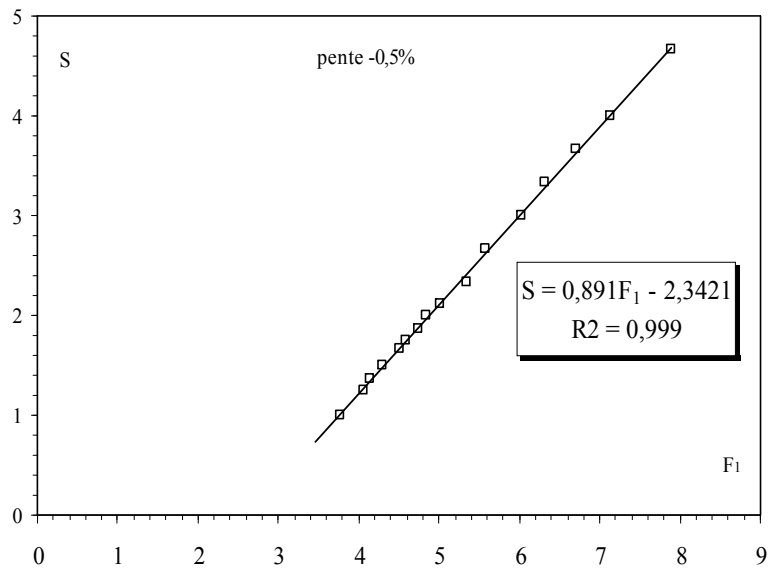
**Figure 1.17 :** Variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour  $\tan(\alpha) = 0,015$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement



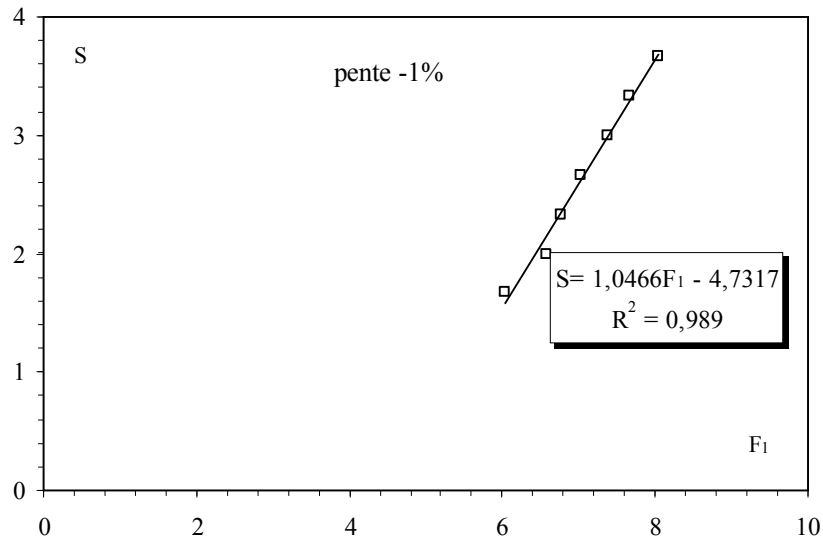
**Figure 1.18:** Variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , Pour  $\tan(\alpha) = 0,02$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.



**Figure 1.19:** Variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , Pour  $\tan(\alpha) = 0$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.



**Figure 1.20 :** Variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , Pour  $\tan(\alpha) = -0,005$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement



**Figure 1.21:** Variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ ,  
 Pour  $\tan(\alpha) = -0,01$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement

Les données ayant servi au traçage des figures 1.15 à 1.21 sont groupées au tableau 1.1.

**Tableau 1.1 :** Mesures expérimentales pente positive ayant servi au traçage des courbes de  $S$  en fonction de  $F_1$

tang ( $\alpha$ ) = 0,005		tang ( $\alpha$ ) = 0,01		tang ( $\alpha$ ) = 0,015		tang ( $\alpha$ ) = 0,02	
$F_1$	S	$F_1$	S	$F_1$	S	$F_1$	S
4,46	3	4,17	4,5	3,65	5,5	3,46	7
5,02	3,5	4,92	5	4,30	6	3,99	7,5
5,62	4	5,51	5,5	4,86	6,5	4,82	8
6,25	4,5	6,08	6	5,57	7	5,47	8,5
6,61	5	6,54	6,5	6,11	7,5	5,92	9
7,27	5,5	7,23	7	6,76	8	6,62	9,5
7,77	6	7,67	7,5	7,33	8,5	7,14	10
8,20	6,5	8,35	8	7,76	9	7,69	10,5
8,81	7	8,96	8,5	8,36	9,5	8,20	11
9,39	7,5	9,34	9	8,93	10	8,84	11,5
9,93	8	9,90	9,5	9,50	10,5	9,47	12
10,47	8,5	10,43	10	10,04	11	10,11	12,5
10,90	9	11,09	10,5	10,58	11,5	10,65	13
11,32	9,5	11,68	11	11,20	12		
11,85	10	12,08	11,5	11,72	12,5		
12,45	10,5	12,70	12				
13,12	11	13,39	12,5				
13,70	11,5						



*Tableau 1.2: Mesures expérimentales pente négative ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F<sub>1</sub>*

tang (α) = 0,00		tang (α) = - 0,005		tang (α) = - 0,01	
F <sub>1</sub>	S	F <sub>1</sub>	S	F <sub>1</sub>	S
4,38	1,5	5,55	1,50	8,34	4,5
5,12	2	6,06	2,00	8,73	5
5,52	2,5	6,57	2,50	9,11	5,5
6,04	3	7,06	3,00	9,43	6
6,63	3,5	7,63	3,50	9,93	6,5
7,07	4	8,14	4,00	10,32	7
7,76	4,5	8,81	4,50	10,82	7,5
8,05	5	9,21	5,00	11,16	8
8,76	5,5	9,85	5,50	11,77	8,5
9,35	6	10,44	6,00	12,17	9
9,79	6,5	10,91	6,50	12,58	9,5
10,41	7	11,58	7,00	13,24	10
10,88	7,5	12,04	7,50	6,03	10,5
11,49	8	12,71	8,00	6,57	11
11,97	8,5	13,49	8,50	6,78	11,5
12,41	9	4,52	1,67	7,02	12
13,08	9,5	4,97	2,00	7,38	12,5
		5,34	2,33		
		5,58	2,67		
		6,03	3,00		
		6,32	3,33		
		6,70	3,67		
		7,14	4,00		
		7,50	4,33		
		7,89	4,67		
		3,46	0,75		
		3,77	1,00		
		4,06	1,25		
		4,15	1,38		
		4,29	1,50		
		4,46	1,63		
		4,58	1,75		
		4,74	1,88		
		4,84	2,00		
		5,01	2,13		
		5,08	2,25		
		2,76	0,60		
		3,05	0,80		
		3,25	1,00		
			1,20		

Selon les figures 1.15 à 1.21, l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire de la forme  $s/h_1 = a F_1 + b$ .

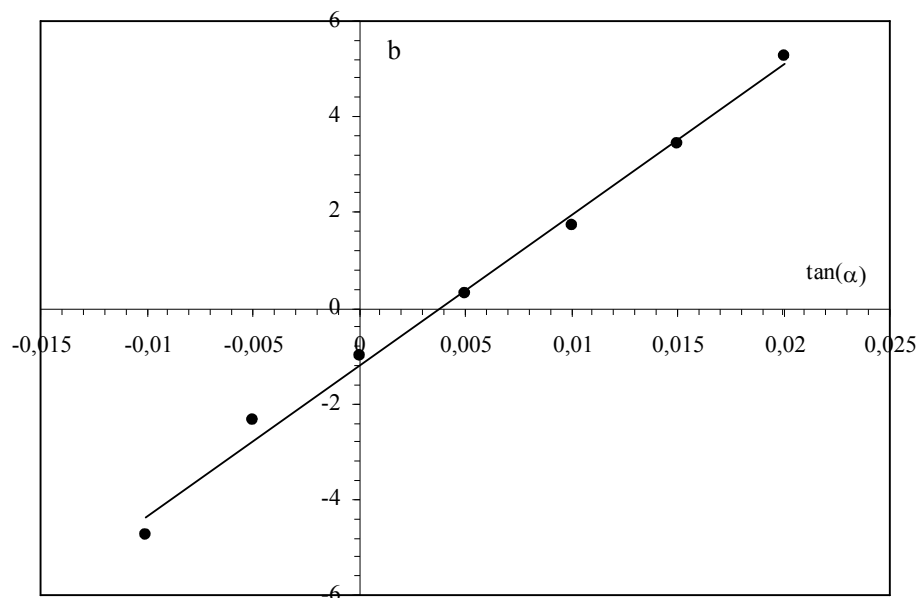
Le tableau 1.3 représente le paramètre 'a' pour les quatre valeurs de pentes considérées. Les paramètres a sont presque égaux, et leur moyenne arithmétique est  $a \approx 0,828$  tandis que

**Tableau 1 .3:** Valeurs des paramètres a et b

tang ( $\alpha$ )	a	b
0,005	0,838	0,3
0,01	0,837	1,736
0,015	0,808	3,42
0,02	0,766	5,25
0,00	0,83	-1,01
-0,005	0,89	-2,34
-0,01	1,04	-4,73

La figure 1.21 montre que la variation du paramètre b en fonction de la pente du canal, suit parfaitement une loi linéaire que l'on peut écrire comme suit :

$$b = 315,76 \tan(\alpha) - 1,20 \quad ; \quad R^2 = 0,997 \quad (1.1)$$



**Figure 1. 22 :** Variation du paramètre 'b' en fonction de  $\tan(\alpha)$ .

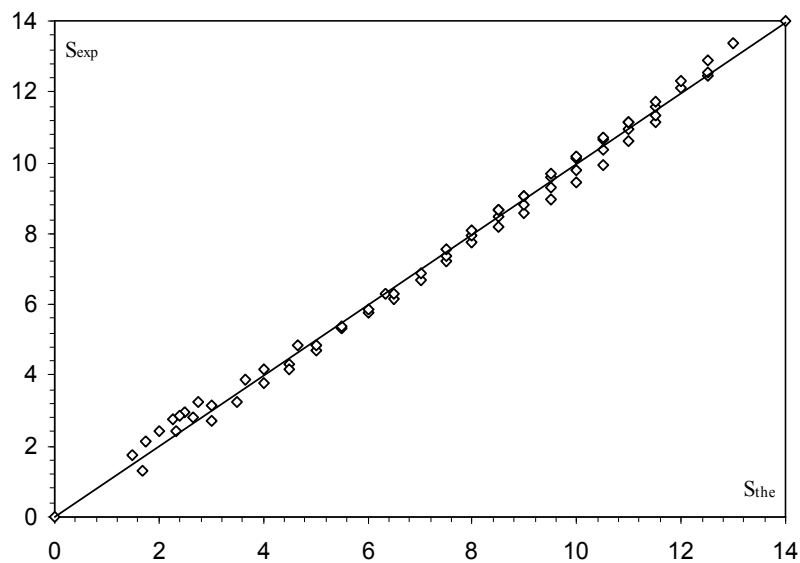
En remplaçant les paramètres  $a$  par leurs expressions respectives on obtient la relation générale suivante :

$$s/h_1 = 0,828F_1 + 315,76 \tan(\alpha) - 1,2 \quad (1.2)$$

Pour  $3,46 \leq F_1 \leq 13,17$  et  $-0,005 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$ .

Rapport de forme  $M = \frac{mh_1}{b}$  est donnée par :  $0,031 \leq M \leq 0,093$ .

La figure 1.22 confirme que la relation (1.2) représente un bon ajustement pour la détermination de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil, connaissant le nombre de Froude incident  $F_1$ , et l'inclinaison ( $\alpha$ ) du canal.



**Figure 1.23 :** Variation de la relation  $f(F_1, \alpha)$  en fonction de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil. (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation :  $f(F_1, \alpha) = s/h_1$ .  
Pente positive

La figure 1.24 montre que les points issus de l'équation (1.2) se répartissent de manière quasi uniforme autour de la première bissectrice.

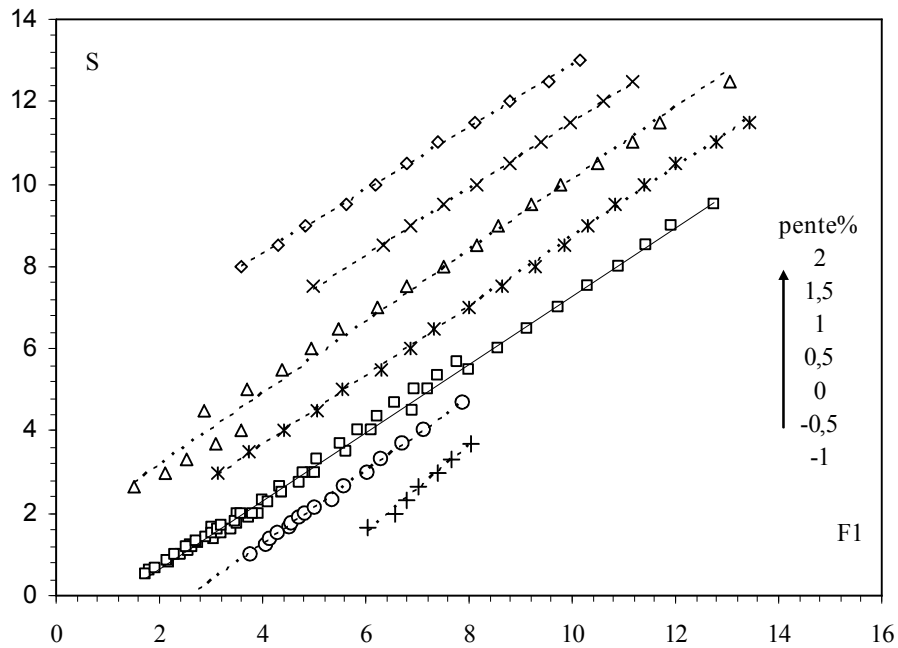
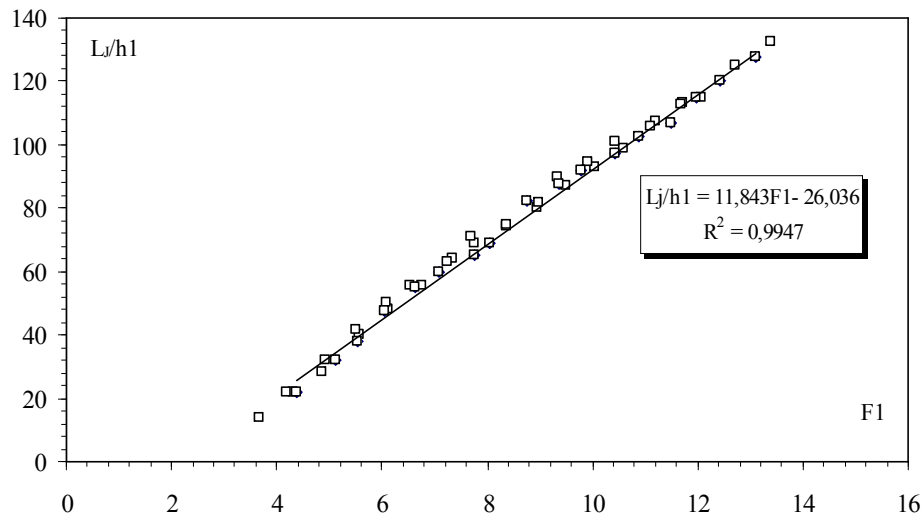


Figure 1.24: Variation expérimentale de  $Y ( F_1 )$  pour différentes valeurs de  $\tan(a)$ .

### I.3.2.1.2. Variation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ :

La longueur  $L_j$  a été considérée comme étant la distance séparant la section initiale du ressaut et la section finale (où s'effectue la mesure de  $h_2$ ). L'objectif principal de cette partie de l'étude est de quantifier la longueur relative  $L_j/h_1$  dans la gamme de valeurs testées de la pente du canal. La représentation de la relation  $L_j/h_1 = f(F_1)$ , a permis de montrer que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative  $L_j/h_1$  du ressaut.

La figure 1.25 montre la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure 1.25:** Variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour  $-0,005 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$ .

Bien que le nuage de points soit assez dense, dû essentiellement à la difficulté de l'estimation de la longueur  $L_j$ , l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à une relation linéaire d'équation :

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_1} = 11,84F_1 - 26,03 \quad (1.3)$$

Pour  $3,46 \leq F_1 \leq 13,17$  et  $-0,005 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$ .

Rapport de forme  $M = \frac{mh_1}{b}$  est donnée par :  $0,031 \leq M \leq 0,093$ .

**Tableau 1.4 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage de la figure 1.22**

<b>tan (α) = 0,005</b>		<b>tan (α) = 0,01</b>		<b>tan (α) = 0,015</b>		<b>tan (α) = 0,02</b>	
<b>F<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>j</sub>/h<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>j</sub>/h<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>j</sub>/h<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>j</sub>/h<sub>1</sub></b>
4,46	23,00	4,17	22,00	3,65	14,00	3,46	13,50
5,02	30,00	4,92	32,00	4,30	22,00	3,99	22,50
5,62	40,50	5,51	41,50	4,86	28,50	4,82	32,50
6,25	45,00	6,08	50,00	5,57	40,00	5,47	46,00
6,61	54,00	6,54	55,50	6,11	48,00	5,92	50,00
7,27	63,00	7,23	63,00	6,76	55,50	6,62	56,51
7,77	68,50	7,67	71,00	7,33	64,00	7,14	64,01
8,20	73,50	8,35	75,00	7,76	69,00	7,69	68,51
8,81	80,00	8,96	82,00	8,36	74,00	8,20	77,51
9,39	85,00	9,34	89,50	8,93	80,00	8,84	84,01
9,93	90,50	9,90	94,50	9,50	87,00	9,47	91,01
10,47	97,00	10,43	101,0	10,04	93,01	10,11	99,01
10,90	102,0	11,09	106,0	10,58	99,01	10,65	105,0
11,32	107,5	11,68	113,0	11,20	107,5		
11,85	115,0	12,08	115,0	11,72	113,5		
12,45	120,0	12,70	125,0				
13,12	129,0	13,39	132,5				
13,70	135,0						

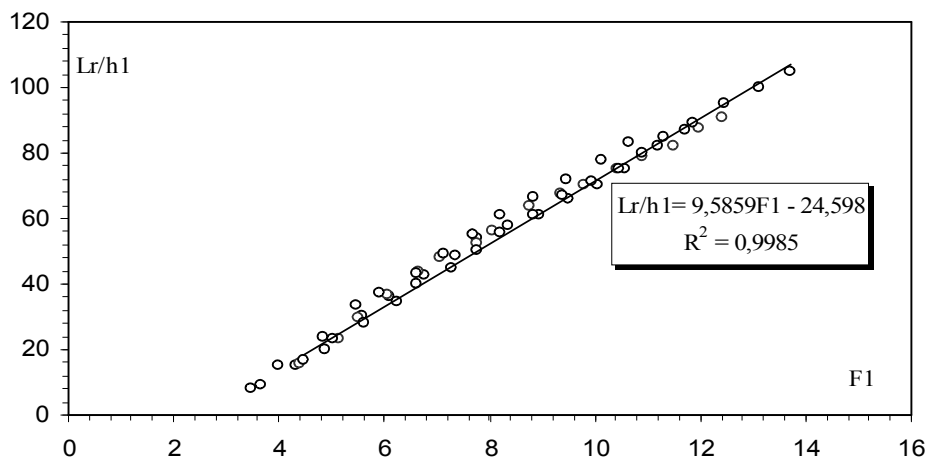
**Tableau 1.5 : Mesures expérimentales de la pente négative ayant servi au traçage de la figure 1.22**

<b>tan (α) = 0,00</b>		<b>tan (α) = - 0,005</b>		<b>tan (α) = - 0,01</b>	
<b>F<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>j</sub>/h<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>j</sub>/h<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>j</sub>/h<sub>1</sub></b>
4,38	22	5,55	47,5	8,34	77,0
5,12	32	6,06	52,5	8,73	83,0
5,52	38	6,57	60,0	9,11	88,5
6,04	47,5	7,06	65,0	9,43	94,0
6,63	55	7,63	70,0	9,93	100,0
7,07	60	8,14	75,0	10,32	104,0
7,76	65	8,81	80,0	10,82	109,0
8,05	69	9,21	88,5	11,16	114,0
8,76	82,5	9,85	94,5	11,77	120,0
9,35	87,5	10,44	100,0	12,17	124,5
9,79	92	10,91	104,0	12,58	129,0
10,41	97	11,58	111,0	13,24	132,5
10,88	102,5	12,04	115,0	6,03	69,3
11,49	107	12,71	120,0	6,57	73,3
11,97	115	13,49	126,5	6,78	76,7
12,41	120	4,52	48,3	7,02	80,0
13,08	127,5	4,97	55,0	7,38	82,7
		5,34	58,3		
		5,58	61,7		
		6,03	65,0		
		6,32	68,3		
		6,70	71,7		
		7,14	75,0		
		7,50	78,3		
		7,89	83,3		
		3,46	37,5		
		3,77	40,0		
		4,06	44,5		
		4,15	48,7		
		4,29	50,0		
		4,46	51,2		
		4,58	52,5		
		4,74	54,0		
		4,84	56,0		
		5,01	57,5		
		5,08	58,7		
		2,76	33,0		
		3,05	36,0		
		3,25	39,4		

### I.3.2.1.3. Variation de la longueur relative $L_r/h_1$ du rouleau de surface en fonction du nombre de 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. L'analyse de la relation  $L_r/h_1 = f(F_1)$ , a permis également de montrer, que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative du rouleau.

La figure 1.26 montre la variation de la longueur relative  $L_r/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure 1. 26:** Variation de la longueur relative  $L_r/h_1$  du rouleau en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour  $-0,005 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$ .

La figure 1.26 montre que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident, engendre celle de la longueur relative du rouleau. Par ailleurs, l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir également à une relation linéaire d'équation :

$$\lambda_r = \frac{L_j}{h_1} = 9,58F_1 - 24,59 \quad (1.4)$$

Pour  $3,46 \leq F_1 \leq 13,17$  et  $-0,005 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$ .

Rapport de forme  $M = \frac{mh_1}{b}$  est donnée par :  $0,031 \leq M \leq 0,093$ .



Tableau 1.6: Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure 1.23.

tang (α) = 0,00		tang (α) = 0,005		tang (α) = 0,01		tang (α) = 0,015		tang (α) = 0,02	
F <sub>1</sub>	L <sub>r</sub> /h <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	L <sub>r</sub> /h <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	L <sub>r</sub> /h <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	L <sub>r</sub> /h <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	L <sub>r</sub> /h <sub>1</sub>
4,38	15,5	4,46	17,00	4,17	15,50	3,65	9,001	3,46	8,001
5,12	23,5	5,02	23,00	4,92	23,00	4,30	15,00	3,99	15,00
5,52	29,5	5,62	28,00	5,51	30,50	4,86	20,00	4,82	24,00
6,04	36,5	6,25	34,50	6,08	37,00	5,57	30,00	5,47	33,50
6,63	44	6,61	40,00	6,54	42,50	6,11	36,00	5,92	37,50
7,07	48	7,27	45,00	7,23	48,50	6,76	42,50	6,62	43,50
7,76	52,5	7,77	50,50	7,67	53,00	7,33	48,50	7,14	49,00
8,05	56	8,20	55,50	8,35	59,50	7,76	54,00	7,69	55,01
8,76	64	8,81	61,00	8,96	65,00	8,36	58,00	8,20	61,01
9,35	67,5	9,39	67,00	9,34	69,00	8,93	61,00	8,84	66,51
9,79	70,5	9,93	71,50	9,90	74,50	9,50	66,00	9,47	72,01
10,41	75	10,47	75,00	10,43	80,00	10,04	70,00	10,11	78,01
10,88	79	10,90	80,00	11,09	85,00	10,58	75,00	10,65	83,01
11,49	82	11,32	85,00	11,68	90,00	11,20	82,00		
11,97	87,5	11,85	89,00	12,08	94,00	11,72	87,00		
12,41	91	12,45	95,00	12,70	100,0				
13,08	95	13,12	100,0	13,39	106,5				
		13,70	105,0						

### I.3.2.2. Rendement du ressaut hydraulique :

Le rendement  $\eta$  du ressaut est défini par le rapport de la perte de charge  $\Delta H$  qu'il occasionne à la charge totale dans sa section initiale :

$$\eta = \Delta H/H_1 \quad (1.5)$$

avec :  $\Delta H = H_1 - H_2$

$H_1$  et  $H_2$  désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut. Celles-ci sont définies par les relations :

$$H_1 = h_1 \times \cos\alpha + \frac{V_1^2}{2g}$$

$$H_2 = h_2 \times \cos\alpha + \frac{V_2^2}{2g}$$

En tenant compte de l'équation de continuité ( $Q=vA$ ), ces deux dernières relations s'écrivent :

$$H_1 = h_1 \times \cos\alpha + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \quad (1.6)$$

$$H_2 = h_2 \times \cos\alpha + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad (1.7)$$

Avec  $A_1 = bh_1 + mh_1^2$  et  $A_2 = bh_2 + mh_2^2$

Le nombre de Froude de l'écoulement incident dans un canal trapézoïdal est défini par la relation :

$$F_1^2 = \frac{Q^2 [b \times (1 + 2M)]}{g [bh_1 (1 + M)]^3} \quad (1.8)$$

En tenant compte des relations précédentes, le rendement du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal à pente variable, s'écrit comme suit :

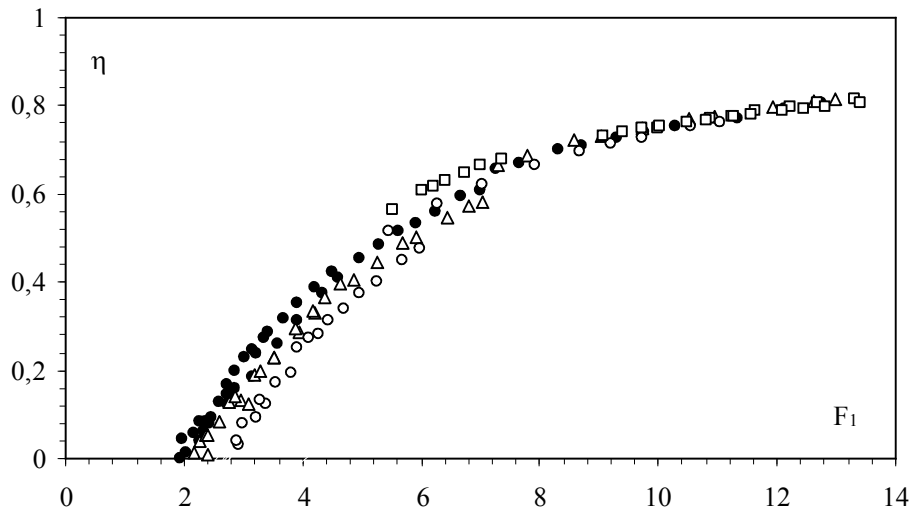
$$\eta = 1 - \frac{Yh_1 \cos(\alpha) + \frac{Q^2}{2g(bh_1 Y \times (1 + YM))^2}}{h_1 \cos(\alpha) + \frac{Q^2}{2g(bh_1 \times (1 + M))^2}}$$

$$\frac{F_2^2}{F_1^2} = \frac{[(1 + 2YM)][(1 + M)]^3}{[Y^3(1 + YM)]^3 [(1 + 2M)]}$$

$$\eta = 1 - \frac{Yh_1 \cos(\alpha) + F_1^2 \frac{(h_1 \cos(\alpha))}{2Y^2} \left[ \frac{[(1 + M)^3]}{(1 + 2M)[(1 + YM)^2]} \right]}{h_1 \cos(\alpha) + \frac{F_1^2 h_1 \cos(\alpha)(1 + M)}{2(1 + 2M)}}$$

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \left[ \frac{(1 + M)^3}{(1 + 2M)(1 + MY)^2} \right]}{1 + \frac{F_1^2 (1 + M)}{2(1 + 2M)}} \quad (1.9)$$

$Y = h_2/h_1$  étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.



**Figure 27 :** Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .  
 $\tan \alpha = 0,002$  (o) ;  $\tan \alpha = 0,01$  ( $\Delta$ ) ;  $\tan \alpha = 0,00$  ( $\bullet$ ) ;  $\tan \alpha = -0,01$  ( $\square$ )

La figure 1.27 montre la variation du rendement en fonction de nombre de Froude, pour différentes inclinaisons du canal.

On remarque que pour le même nombre de Froude  $F_1$ , le rendement  $\eta$  augmente lorsque la pente diminue.

On peut donc conclure que l'inclinaison négative du canal est un avantage pour la dissipation d'énergie.

Les données ayant servi au traçage la figure 1.27 sont groupées au tableau 1.5.

Tableau 1.7 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage la figure 1.11.

$\tan\alpha = 0,00$		$\tan\alpha = 0,005$		$\tan\alpha = 0,01$		$\tan\alpha = 0,015$		$\tan\alpha = 0,02$		$\tan\alpha = -0,005$		$\tan\alpha = -0,01$	
$F_{\text{lexp}}$	$\eta$	$F_{\text{lexp}}$	$\eta$	$F_{\text{lexp}}$	$\eta$	$F_{\text{lexp}}$	$\eta$	$F_{\text{lexp}}$	$\eta$	$F_{\text{lexp}}$	$\eta$	$F_{\text{lexp}}$	$\eta$
3,09	0,29	3,13	0,26	2,86	0,18	3,58	0,29	2,66	0,08	5,55	0,54	8,34	0,71
3,93	0,40	3,73	0,34	3,70	0,32	4,37	0,39	3,59	0,26	6,06	0,58	8,73	0,73
4,37	0,45	4,40	0,43	4,37	0,40	4,97	0,46	4,32	0,36	6,57	0,61	9,11	0,74
4,96	0,50	5,07	0,49	4,94	0,46	5,71	0,52	4,82	0,42	7,06	0,64	9,43	0,75
5,62	0,55	5,56	0,53	5,47	0,50	6,35	0,56	5,61	0,49	7,63	0,67	9,93	0,76
6,11	0,58	6,31	0,58	6,21	0,56	6,87	0,59	6,19	0,53	8,14	0,69	10,32	0,77
6,89	0,63	6,85	0,61	6,79	0,60	7,51	0,63	6,81	0,58	8,81	0,72	10,82	0,78
7,22	0,64	7,33	0,64	7,50	0,64	8,16	0,66	7,38	0,61	9,21	0,73	11,16	0,79
8,01	0,68	8,01	0,67	8,15	0,67	8,79	0,69	8,10	0,64	9,85	0,75	11,77	0,80
8,58	0,70	8,64	0,70	8,57	0,68	9,39	0,71	8,81	0,67	10,44	0,77	12,17	0,81
9,13	0,72	9,28	0,72	9,19	0,70	9,97	0,72	9,53	0,70	10,91	0,77	12,58	0,81
9,73	0,74	9,86	0,73	9,79	0,72	10,61	0,74	10,13	0,72	11,58	0,79	13,24	0,82
10,30	0,75	10,29	0,74	10,50	0,74	11,17	0,75	2,89	0,08	12,04	0,80	6,03	0,59
10,90	0,77	10,82	0,76	11,18	0,76	3,33	0,24	3,27	0,17	12,71	0,81	6,57	0,62
11,44	0,78	11,39	0,77	11,68	0,77	3,49	0,23	3,78	0,26	13,49	0,82	6,78	0,63
11,92	0,79	12,01	0,78	12,32	0,78	4,03	0,32	4,24	0,32	4,52	0,44	7,02	0,65
12,74	0,80	12,81	0,80	13,06	0,80	4,47	0,38	4,78	0,39	4,97	0,49	7,38	0,66
3,02	0,19	13,45	0,81	2,13	0,02	4,75	0,41	5,23	0,44	5,34	0,52	7,66	0,68
3,52	0,26	2,73	0,16	2,53	0,10	5,26	0,46	5,56	0,47	5,58	0,54		
4,00	0,34	3,20	0,24	3,10	0,20	5,66	0,49	5,87	0,49	6,03	0,57		
4,33	0,38	3,64	0,30	3,59	0,28	6,16	0,54	6,37	0,54	6,32	0,59		
4,79	0,44	3,99	0,34	3,98	0,33	6,46	0,55	6,67	0,56	6,70	0,62		
5,07	0,47	4,52	0,42	4,42	0,38	6,82	0,58	2,67	0,05	7,14	0,64		
5,51	0,51	4,88	0,46	4,72	0,41	7,14	0,59	2,92	0,08	7,50	0,66		
5,85	0,54	5,26	0,49	5,20	0,47	7,79	0,63	3,32	0,17	7,89	0,68		
6,24	0,57	5,72	0,53	5,44	0,48	2,65	0,04	3,67	0,23	3,46	0,30		
6,56	0,59	5,99	0,55	5,86	0,52	3,00	0,13	3,96	0,27	3,77	0,35		
6,93	0,61	6,36	0,57	6,39	0,57	3,38	0,21	4,36	0,34	4,06	0,40		
7,39	0,64	6,62	0,59	6,60	0,57	3,67	0,25	4,60	0,36	4,15	0,40		
7,76	0,66	6,98	0,61	7,25	0,62	3,94	0,28	4,95	0,40	4,29	0,42		
2,59	0,10	7,52	0,64	7,66	0,64	4,19	0,31	2,71	0,02	4,46	0,44		
3,05	0,21	7,81	0,65	7,91	0,65	4,60	0,37	2,94	0,07	4,58	0,45		
3,21	0,25	2,37	0,08	3,32	0,22	4,97	0,41	3,22	0,13	4,74	0,47		
3,39	0,28	2,76	0,16	3,71	0,29	2,44	0,00	3,50	0,19	4,84	0,48		
3,52	0,30	3,14	0,22	3,94	0,31	2,78	0,07			5,01	0,50		
3,73	0,33	3,38	0,25	4,37	0,38	3,01	0,11			5,08	0,50		
3,81	0,33	3,78	0,32	4,68	0,41	3,23	0,15			2,76	0,13		
4,12	0,38	4,00	0,34	4,91	0,44	3,54	0,22			3,05	0,20		
4,37	0,41	4,26	0,38	3,07	0,15					3,25	0,23		
4,72	0,45	4,55	0,41	3,28	0,18					3,62	0,31		
4,72	0,45	4,89	0,45	3,60	0,24								
5,02	0,48	3,27	0,23										
2,19	0,03	3,46	0,25										
2,42	0,07												
2,55	0,10												
2,65	0,11												
2,76	0,13												
2,91	0,16												
3,03	0,18												

#### I.4. Exemple d'application :

Un exemple d'application consisterait à déterminer les caractéristiques d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal trapézoïdal à pente variable, connaissant le débit volumique  $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ; la profondeur conjuguée amont du ressaut  $h_1 = 0,3 \text{ m}$ ; la cotangente  $e$  de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal  $m = 0,311$ ; la largeur de fond de canal  $b = 1,7 \text{ m}$  et sachant que le rapport de forme  $M = mh_1/b$  doit être compris entre 0,031 et 0,094 et le nombre de Froude compris entre 3,46 et 13.

Nombre de Froude  $F_1$

$$F_1 = \left[ \frac{Q^2}{g} \left( \frac{(b + 2mh_1)}{(bh_1 + mh_1^2)^3} \right) \right]^{1/2} = 5,55$$

##### I.4.1 Ressaut contrôlé par seuil mince à pente positive ( $\alpha=1\%$ ) :

❖ hauteur relative du seuil

$$S = \frac{s}{h_1} = 0,828F_1 + 315,76 \tan(\alpha) - 1,2 \quad \text{d'où la hauteur du seuil } s = 1,69 \text{ m}$$

##### I.4.2 Ressaut contrôlé par seuil mince à pente nulle ( $\alpha=0\%$ ) :

❖ hauteur relative du seuil

$$S = \frac{s}{h_1} = 0,828F_1 - 1,2 \quad \text{d'où la hauteur du seuil } s = 1,02 \text{ m}$$

##### I.4.3 Ressaut contrôlé par seuil mince à pente négative ( $\alpha=-1$ ) :

$$S = \frac{s}{h_1} = 0,828F_1 + 315,76 \tan(\alpha) - 1,2 \quad \text{d'où la hauteur du seuil } s = 0,072 \text{ m}$$

Il ressort de cet exemple d'application que pour le même nombre de Froude  $F_1$ , la profondeur conjuguée d'aval, la hauteur du seuil sont plus réduites dans le ressaut dans un canal trapézoïdal à pente négative que leurs homologues contrôlés par seuil mince à pente positive et nulle.

### **I.5. Conclusion :**

L'expérimentation a été menée sous sept (07) hauteurs initiales  $h_1$ , vingt sept (27) seuils  $s$  de hauteurs différentes, et sept (07) inclinaisons du canal par rapport à l'horizontale. Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue.

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour sept valeurs distinctes de la pente du canal. Sept nuages de points distincts, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la pente du canal. L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport  $S$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire de la forme  $s/h_1 = a(F_1) + b$ .

Dans un second temps l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique à savoir la longueur du ressaut et la longueur du rouleau de surface. Il a été montré que l'inclinaison du canal, n'a pas d'influence sur les relations  $\lambda_j(F_1)$  et  $\lambda_r(F_1)$ . En outre, l'analyse statistique des mesures expérimentales a montré que les deux relations suivent une loi de type linéaire.

Aussi, l'étude expérimentale s'est intéressée à la dissipation d'énergie cinétique. Celle-ci étant représentée par le rendement. En effet, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que le ressaut dans un canal trapézoïdal à pente négative est un avantage pour la dissipation d'énergie.

## Chapitre II

### ETUDE THEORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL A PENTE VARIABLE

#### II.1 Introduction :

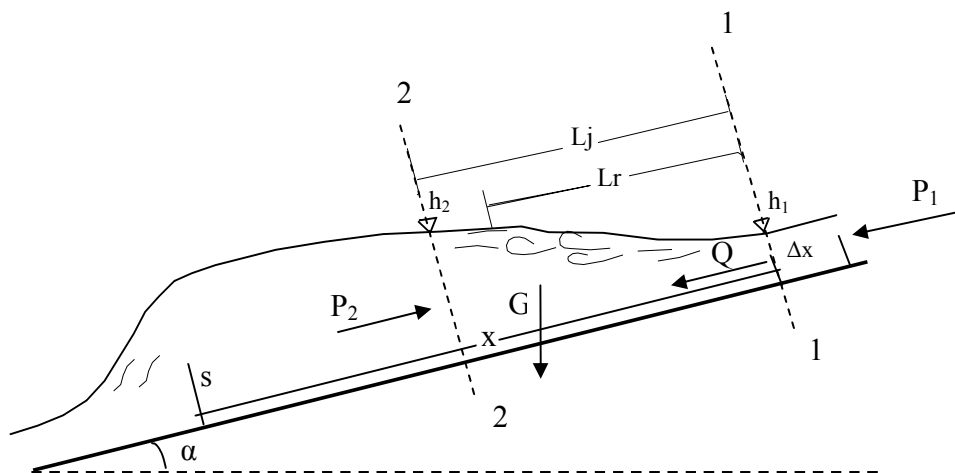
Cette partie de notre étude, sera consacrée à l'analyse théorique du ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal trapézoïdal, à pente positive a permis de montrer que le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident peut être exprimé en fonction de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du canal par rapport à l'horizontal, du rapport  $Y=h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées du ressaut.

( $h_1$  et  $h_2$  étant les hauteurs du niveau d'eau respectivement à l'extrémité amont et aval), et de la longueur relative  $\lambda_j=L_j/h_1$  du ressaut, tel que :  $F_1 = f(Y, \lambda_j, \alpha)$ .

Cette relation fonctionnelle a été établie par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut, en tenant compte des hypothèses simplificatrices citées précédemment.

#### II. 2. Equation de la quantité de mouvement :

Nous avons appliqué l'équation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite trapézoïdal à angle incliné d'une pente positive par rapport à l'horizontale (Figure 2.1).



*Figure 2.1 : Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal à pente positive*

L'équation de la quantité de mouvement appliquée entre les sections 1-1 et 2-2 s'écrit :

$$\rho Q \vec{v}_1 - \rho Q \vec{v}_2 = \sum \vec{F}_{\text{ext}} \quad (2.1)$$

$\sum \bar{F}_{\text{ext}}$  : représente la somme des forces extérieures. Ces forces sont :

- La force de pression  $P_1$  appliquée à la section 1-1.
- La force de pression  $P_2$  appliquée à la section 2-2.
- Le poids  $G$  appliquée au centre de gravité du volume d'eau formé par le ressaut.

La relation (2.1) s'écrit :

$$\rho Q v_1 + P_1 + G \sin \alpha = \rho Q v_2 + P_2 \quad (2.2)$$

Les forces  $P_1$  et  $P_2$  sont appliquées, selon la figure (2.2), respectivement aux centres de gravité des sections trapézoïdaux 1 et 2 ; le poids  $G$  est appliqué au centre de gravité du ressaut. Les forces de pression  $P_1$  et  $P_2$  ainsi que le poids  $G$  de l'eau peuvent être exprimées, en appliquant les lois de l'hydrostatique :  $P_1 = \omega \bar{h}_1 A_1$ ,  $P_2 = \omega \bar{h}_2 A_2$ , et  $G = \omega V$ .

Où :  $\omega = \rho g$  représente le poids spécifique du liquide en écoulement,  $\bar{h}_1$ ,  $\bar{h}_2$  représentent respectivement les distances des centres de gravité des sections transversales 1 et 2 à partir de la surface libre de l'écoulement ;  $A_1$ ,  $A_2$  représentent respectivement l'aire de la section mouillée 1, 2 et  $V$  représente le volume d'eau inscrit entre les deux sections 1 et 2.

En remplaçant les expressions de  $P_1$ ,  $P_2$ , et  $G$  dans la relation (2.2), on obtient :

$$\rho Q v_1 + \omega \bar{h}_1 A_1 + \omega V \sin \alpha = \rho Q v_2 + \omega \bar{h}_2 A_2 \quad (2.3)$$

L'équation de continuité indique que la vitesse moyenne de l'écoulement s'écrit, en fonction du débit volume  $Q$  et de l'aire de la section mouillée  $A$  :  $v = Q/A$ . Par conséquent, les vitesses moyennes de l'écoulement  $v_1$  et  $v_2$  respectivement aux sections amont et aval du ressaut s'expriment :  $v_1 = Q/A_1$  et  $v_2 = Q/A_2$ .

En tenant compte de toutes ces considérations la relation (2.3) peut s'écrire, en divisant tous ses membres par  $\rho g$  :

$$\frac{Q^2}{g A_1} + \bar{h}_1 A_1 + V \sin \alpha = \frac{Q^2}{g A_2} + \bar{h}_2 A_2 \quad (2.4)$$

Mais à cause de l'inclinaison du canal d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontal, la hauteur initiale et finale s'écrit  $h_1$  et  $h_2$

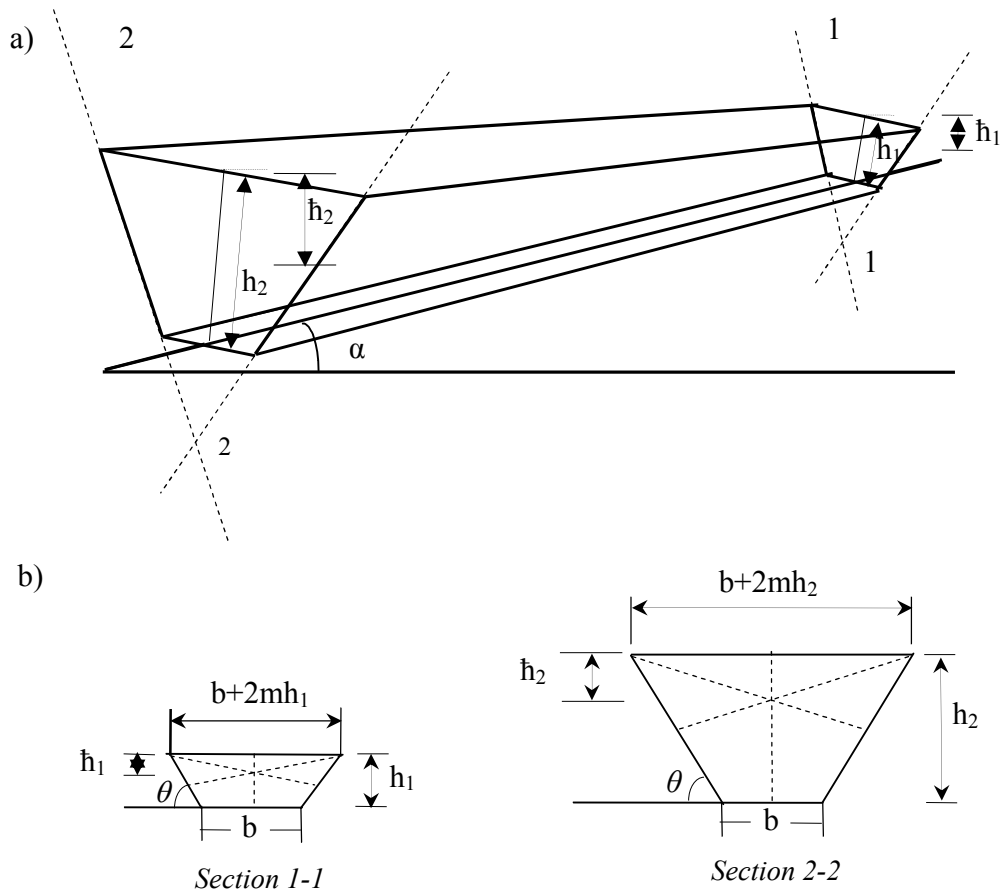
Les sections initiale et finale sont :

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

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

Les centres de gravité des sections initiales et finales sont :





**Figure 2.2 :** a) Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut.  
 b) Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut.

$$\bar{h}_1 = \cos\alpha \frac{h_1^2}{6} \frac{3b + 2mh_1}{A_1} \quad \bar{h}_2 = \cos\alpha \frac{h_2^2}{6} \frac{3b + 2mh_2}{A_2}$$

Le volume d'eau inscrit entre les deux sections 1 et 2

$$V = \left[ \frac{A_1 + A_2}{2} \right] \times L_j \quad (2.5)$$

Tels que :  $Y = h_2/h_1$  et  $M = mh_1/b$

$$A_1 = bh_1 + mh_1^2$$

$$A_1 = bh_1 \times (1 + mh_1/b)$$

$$A_1 = bh_1 \times (1 + M)$$

$$A_2 = bh_1 Y \times (1 + YM)$$

$$V = bh_1 \left[ \frac{(1 + M) + Y(1 + YM)}{2} \right] \times L_j \quad (2.6)$$

### II.3. Nombre de Froude :

L'autre caractéristique du ressaut hydraulique qui va nous servir de base à notre étude théorique est le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, calculé à la section initiale 1-1, c'est-à-dire au pied du ressaut. Ce nombre s'exprime en règle générale, pour un canal horizontal, par la relation (2.7) :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial h_1} \quad (2.7)$$

La relation (2.7) montre que le nombre de Froude  $F_1$  est une fonction de quatre paramètres tels que :

- $Q$  représente le débit volume de l'écoulement ;
- $g$  est l'accélération de la pesanteur ;
- $A_1$  est l'aire de la section transversal mouillée au pied de ressaut ;
- $\frac{\partial A_1}{\partial h_1}$  représente la dérivée partielle de l'aire de la section mouillée  $A_1$  au pied du ressaut

par rapport à la hauteur  $h_1$ . Pour notre cas, il s'agit d'une section trapézoïdal et par

conséquent :  $\frac{\partial A_1}{\partial h_1} = b \times (1 + M)$ .

$$F_1^2 = \frac{Q^2 [b \times (1 + 2M)]}{[g b h_1 (1 + M)]^3} \quad (2.8)$$

$$\frac{F_2^2}{F_1^2} = \frac{\frac{[b \times (1 + 2YM)]}{[b h_1 Y (1 + YM)]^3}}{\frac{[b \times (1 + 2M)]}{[b h_1 (1 + M)]^3}} \quad (2.9)$$

$$\frac{F_2^2}{F_1^2} = \frac{[(1 + 2YM)] [(1 + M)]^3}{[Y^3 (1 + YM)]^3 [(1 + 2M)]}$$

La relation entre  $F_1^2$  et  $F_2^2$

$$F_2^2 = F_1^2 \frac{[(1 + 2YM)] [(1 + M)]^3}{[Y^3 (1 + YM)]^3 [(1 + 2M)]} \quad (2.10)$$

En tenant compte des relations (2.6), (2.7), (2.8) (2.9) et (2.10) à la relation (2.4) devient :

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{h}_1 A_1 + V \sin \alpha = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{h}_2 A_2$$

L'application de l'équation de la quantité de mouvement entre deux sections délimitant un ressaut hydraulique à pente variable et évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale mène à écrire la relation (2.11) ; cette relation montre que ce type de ressaut est régi par :

- le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident à la section amont du ressaut ;
- les hauteurs conjuguées  $h_1$  et  $h_2$  respectivement à l'amont et à l'aval du ressaut ;
- la pente du canal par rapport à l'horizontal (l'angle  $\alpha$ ).
- La longueur  $L_j$  du ressaut.

Un arrangement de la relation (2.11) permet d'écrire le nombre de Froude sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 F_1^2 \left[ \frac{[bh_1(1+M)]^2}{b(1+2M)} \right] + \frac{bh_1^2 \cos \alpha}{6} (3+2M) + bh_1 \left[ \frac{(1+M)+Y(1+YM)}{2} \right] \times L_j \sin \alpha &= F_1^2 \frac{[(1+2YM)](1+M)^3}{[Y^3(1+YM)](1+2M)} \left[ \frac{[bhY_1(1+YM)]^2}{b(1+2YM)} \right] + \frac{bY^2 h_1^2}{6} \cos \alpha (3+2YM) \quad (2.11) \\
 F_1^2 \left[ \frac{[bh_1^2(1+M)^2]}{(1+2M)} \right] + \frac{bh_1^2}{6} \cos \alpha (3+2M) + bh_1 \left[ \frac{(1+M)+Y(1+YM)}{2} \right] \times L_j \sin \alpha &= F_1^2 \left[ \frac{[bh^2(1+M)^3]}{Y(1+YM)(1+2M)} \right] + \frac{bY^2 h_1^2}{6} \cos \alpha (3+2YM) \\
 F_1^2 \left( bh_1^2 \frac{(1+M)^2}{(1+2M)} \right) \times \left[ 1 - \left( \frac{1+M}{Y(1+YM)} \right) \right] + \frac{bh_1^2 \cos \alpha}{6} [(3+2M) - Y^2(3+2YM)] &= -\frac{bh_1^2}{h_1} \left[ \frac{(1+M)+Y(1+YM)}{2} \right] \times L_j \sin \alpha \\
 F_1^2 \left[ 1 - \left( \frac{1+M}{Y(1+YM)} \right) \right] &= \frac{1}{2} \cos \alpha \left( \frac{(1+2M)}{(1+M)^2} \right) \left( \left[ Y^2 \left( 1 + \frac{2}{3} YM \right) - \left( 1 + \frac{2}{3} M \right) \right] - \left[ \frac{(1+M)+Y(1+YM)}{2} \right] \times \frac{L_j}{h_1} \operatorname{tg} \alpha \right) \\
 F_1^2 \left[ 1 - \left( \frac{1+M}{Y(1+YM)} \right) \right] &= \frac{1}{2} \cos \alpha \left( \frac{(1+2M)}{(1+M)^2} \right) \left( \left[ Y^2 \left( 1 + \frac{2}{3} YM \right) - \left( 1 + \frac{2}{3} M \right) \right] - ((1+M)+Y(1+YM)) \times \lambda \times k \times \operatorname{tg} \alpha \right) \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

La relation (2.12) exprime le nombre de Froude  $F_1$  en fonction du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées, de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du canal par rapport à l'horizontale et la longueur relative  $\lambda=L_j/h_1$  d'un ressaut hydraulique à pente variable, évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale.

L'approche théorique proposée pour le cas du ressaut classique montre que le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident dépend exclusivement du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  en appliquant toujours l'équation de la quantité de mouvement.

En remplaçant  $\alpha = 0$  dans la relation (2.12), on obtient :

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

Les valeurs du coefficient  $k$  obtenu en introduisant les données expérimentales dans l'équation (2.13), sont présentées dans le tableau 2.1 :

$$k = \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{(1+2M)}{(1+M)^2} \right) \cos \alpha \left[ Y^2 \left( 1 + \frac{2}{3} YM \right) - \left( 1 + \frac{2}{3} M \right) \right] - F_1^2 \left[ 1 - \left( \frac{1+M}{Y(1+YM)} \right) \right]}{\frac{1}{2} \left( \frac{(1+2M)}{(1+M)^2} \right) ((1+M)+Y(1+YM)) \times \lambda \times \sin \alpha} \quad (2.13)$$

**Tableau 2.1 : Valeurs du coefficient k selon la relation 2.13 Pente positive**

tang (α) = 0,005			tang (α) = 0,01			tang (α) = 0,015			tang (α) = 0,02		
F <sub>1</sub>	Y	K	F <sub>1</sub>	Y	K	F <sub>1</sub>	Y	K	F <sub>1</sub>	Y	K
10,44	9,30	0,57	4,35	5,70	0,57	3,55	4,70	0,49	2,16	2,80	0,50
12,97	12,30	0,57	4,94	6,50	0,72	4,41	5,90	0,86	2,79	3,75	0,97
13,40	12,80	0,55	5,52	7,25	0,93	4,95	6,65	0,74	3,66	5,00	0,93
13,93	13,40	0,51	6,25	8,20	0,95	5,74	7,70	0,91	4,40	6,10	0,98
14,51	14,15	0,79	6,79	8,90	0,84	6,45	8,65	1,08	4,88	6,75	0,96
15,12	14,75	0,51	7,44	9,70	0,70	6,91	9,25	0,98	5,71	7,85	1,03
5,32	4,63	0,60	8,07	10,50	0,71	7,50	10,00	0,89	6,33	8,70	1,10
5,67	5,17	1,20	8,50	11,05	0,76	8,09	10,75	0,80	6,95	9,50	1,09
6,20	5,77	0,88	9,12	11,80	0,77	8,72	11,55	0,82	7,57	10,35	1,14
6,56	6,20	0,80	9,74	12,55	0,82	9,28	12,25	0,77	8,22	11,20	1,06
6,94	6,67	0,84	10,37	13,30	0,68	9,89	13,00	0,82	8,88	12,05	1,01
7,40	7,23	0,96	11,18	14,25	0,92	10,53	13,80	0,84	9,58	12,95	0,98
7,67	7,63	1,31	11,66	14,80	0,88	11,19	14,60	0,96	10,13	13,65	0,94
8,04	8,10	1,41	12,24	15,50	0,80	2,12	2,67	0,06	2,18	2,87	1,27
8,30	8,47	1,62	12,83	16,20	0,61	2,62	3,40	0,61	2,63	3,53	1,23
8,66	8,87	1,48	3,14	4,03	0,57	3,32	4,37	0,56	3,15	4,27	1,32
9,20	9,37	1,04	3,64	4,70	0,76	3,65	4,83	1,13	3,42	4,70	1,08
9,49	9,80	1,39	4,08	5,27	1,02	4,15	5,53	1,08	3,95	5,43	1,14
5,08	5,05	0,94	4,62	5,97	1,41	4,57	6,10	1,04	4,44	6,10	1,18
5,35	5,38	1,01	4,90	6,33	1,35	4,90	6,53	1,12	4,96	6,80	1,15
5,64	5,75	1,22	5,27	6,80	1,00	5,43	7,20	1,17	5,47	7,47	1,21
5,98	6,15	1,21	5,67	7,30	1,47	5,87	7,77	1,25	5,80	7,90	1,22
3,49	3,44	0,64	6,11	7,83	1,50	6,33	8,33	1,17	6,14	8,33	1,25
3,78	3,80	0,87	6,52	8,33	1,17	6,77	8,87	1,37	6,61	8,97	1,18
4,23	4,36	1,22	6,87	8,77	1,50	7,05	9,23	1,25	6,99	9,33	1,29
3,01	3,10	0,62	7,40	9,40	1,21	7,46	9,73	1,35	2,54	3,25	1,22
			7,79	9,87	1,16	7,96	10,33	1,16	2,86	3,75	1,17
			8,07	10,20	1,21	1,98	2,43	0,48	3,20	4,23	1,40
			3,42	4,35	0,93	2,43	3,10	1,16	3,48	4,70	1,09
			3,77	4,80	0,81	2,88	3,73	1,33	3,84	5,20	1,13
			4,08	5,20	1,17	3,17	4,13	1,14	4,19	5,68	1,22
			4,44	5,65	0,97	3,47	4,55	0,94	4,52	6,10	1,12
			4,79	6,08	1,12	3,82	5,03	1,12	4,85	6,53	1,24
			4,97	6,30	0,97	4,16	5,48	1,27	5,23	7,00	1,28
			2,88	3,60	0,78	4,49	5,90	1,44	2,22	2,92	0,54
			3,22	4,04	1,07	4,85	6,35	1,34	2,62	3,48	1,13
			3,51	4,40	1,47	5,26	6,85	1,40	2,92	3,90	1,15
			3,83	4,80	1,53	2,59	3,30	0,87	3,16	4,24	1,18
			2,36	2,92	1,05	2,96	3,80	1,16	3,42	4,58	1,16
			2,54	3,17	0,84	3,24	4,16	1,36	3,70	4,92	1,17
			2,85	3,55	1,09	3,47	4,46	1,41	1,77	2,25	0,10
			3,07	3,82	1,78	3,75	4,80	1,31	1,99	2,57	0,64
						2,05	2,58	0,45	2,25	2,95	0,94
									2,49	3,32	0,85

**Tableau 2.2 : Valeurs du coefficient k selon la relation 2.13**  
*Pente négative*

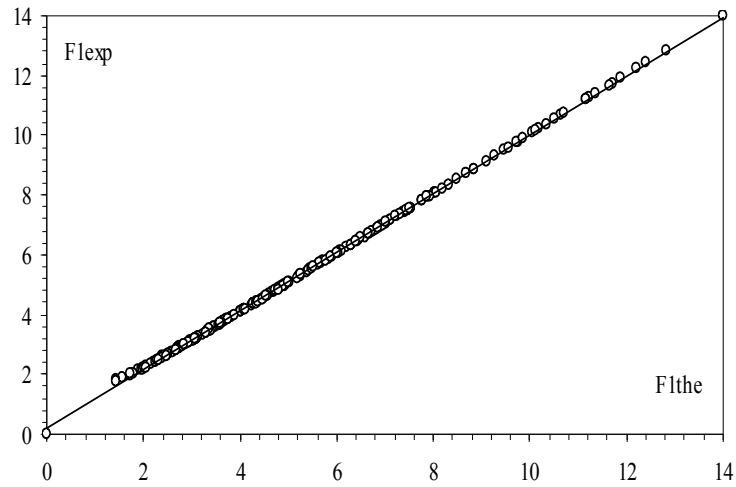
tang (α) =- 0,005			tang (α) =- 0,01		
F <sub>1</sub>	Y	K	F <sub>1</sub>	Y	K
5,55	6,80	-1,43	5,95	6,83	-1,36
6,08	7,45	-1,18	6,45	7,40	-1,45
6,55	8,00	-1,42	6,72	7,70	-1,25
4,60	5,47	-0,94	6,91	7,90	-1,37
5,05	6,00	-0,91	7,27	8,30	-1,35
5,33	6,33	-1,42	7,55	8,60	-1,35
5,59	6,63	-1,26	7,91	9,00	-1,36
6,05	7,17	-1,18			
6,34	7,50	-1,13			
6,72	7,93	-1,11			
7,08	8,33	-1,54			
7,35	8,63	-1,96			
7,80	9,13	-1,59			
3,49	4,05	-1,73			
2,97	3,38	-0,41			
3,21	3,66	-0,71			
3,42	3,90	-0,61			
3,72	4,24	-1,09			

Le tableau 2.1 et 2.2 montre que le coefficient de correction k est sans aucun doute une valeur constante. En éliminant quelques valeurs extrêmes, la moyenne arithmétique de toutes les valeurs de k donne la constante ±1,03.

L'équation (2.14) devient alors comme suit :

$$F_{1Th} = \left( \frac{\frac{1}{2} \cos \alpha \left( \frac{(1+2M)}{(1+M)^2} \right) \left( \left[ Y^2 \left( 1 + \frac{2}{3} YM \right) - \left( 1 + \frac{2}{3} M \right) \right] \pm 1,30((1+M) + Y(1+YM)) \times k \times \operatorname{tg} \alpha \right)}{\left[ 1 - \left( \frac{1+M}{Y(1+YM)} \right) \right]} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

A fin de vérifier la validité de l'équation semi théorique (2.12), celle-ci est confrontée au nombre de Froude expérimentale calculé en application de la relation (2.14).



**Figure 2.3 :** Variation du nombre de Froude expérimental  $F_{1exp}$  en fonction du nombre de Froude théorique  $F_{1th}$  calculée selon la relation (2.14).  
 (—) Première bissectrice d'équation :  $F_{1exp} = F_{1th}$ .

La figure 2.3 montre que les points obtenus se répartissent de manière quasi uniforme autour de la première bissectrice.

Par ailleurs, les écarts relatifs entre les nombres de Froude expérimental  $F_{1exp}$  et les nombres de Froude théorique  $F_{1th}$  sont calculés et présentés au tableau 2.1, afin d'examiner la validité de la relation semi théorique (2.14) issue de notre développement théorique.

Les valeurs de  $F_{1exp}$  sont calculées par la relation (2.13) en se basant sur les données expérimentales du tableau 2.1 et tableau 2.2.

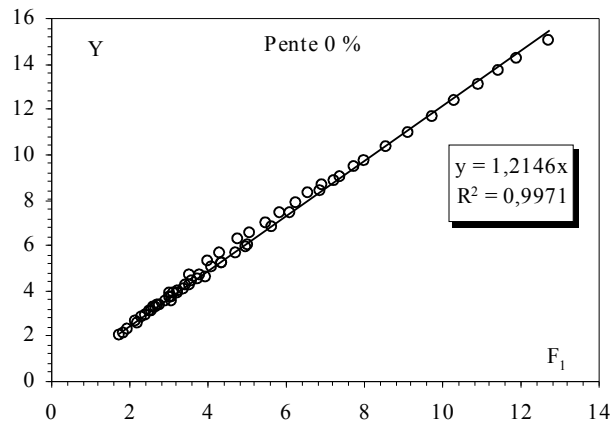
#### **II.4. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ et de l'angle d'inclinaison $\alpha$ du canal :**

L'équation semi théorique (2.14) étant implicite en Y, il serait préférable de trouver une relation approchée permettant de trouver aisément le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident et de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du canal. Ainsi connaissant  $F_1$ ,  $h_1$  et  $\alpha$ , la relation recherchée permet l'évaluation de Y et par conséquent de la hauteur conjuguée  $h_2$ .

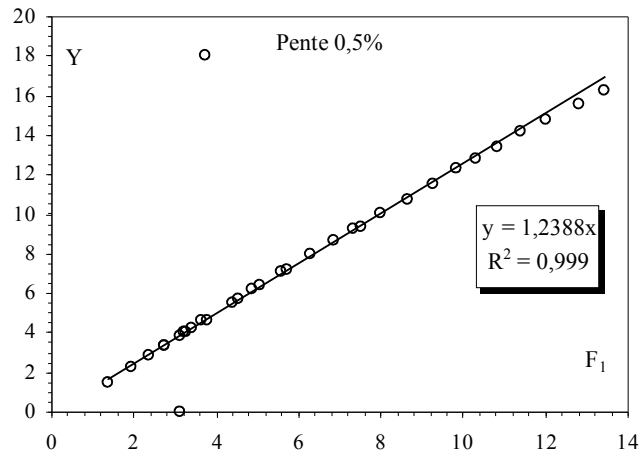
L'analyse des mesures expérimentales, montre que chaque nuage de points suit l'allure d'une courbe unique. Un ajustement par la méthode des moindres carrés linéaires montre que cette courbe est de la forme  $Y = a F_1$ .

Les données expérimentales sont représentées au tableau 2.3.

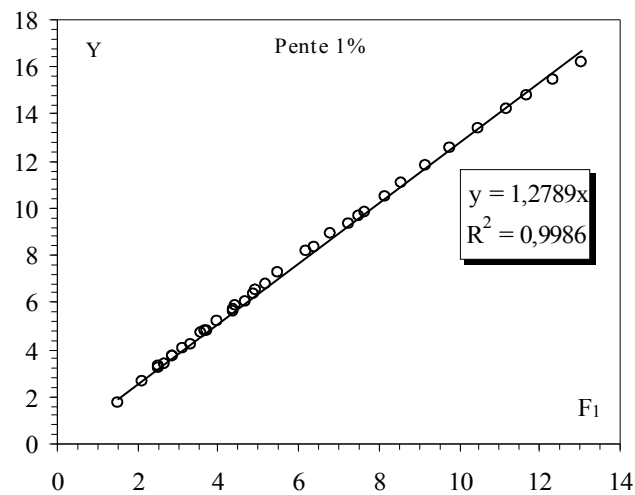
Les figures 2.4 à 2.10 montrent l'ajustement de la relation  $Y = a F_1$  pour les sept inclinaisons du canal trapézoïdal.



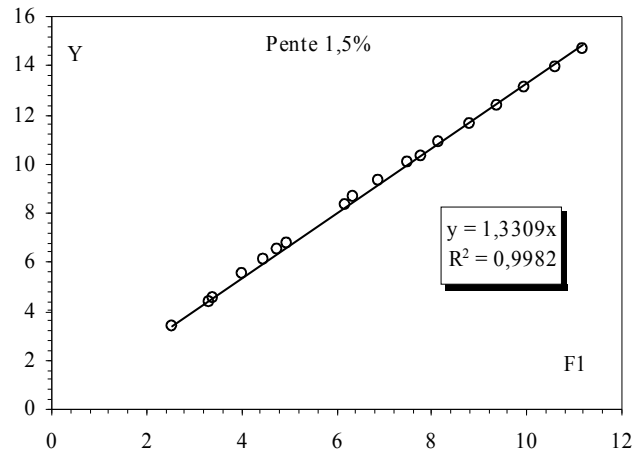
**Figure 2.4 :** Variation de  $Y(F_1)$  pour  $\tan(\alpha) = 0,00$ . (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.



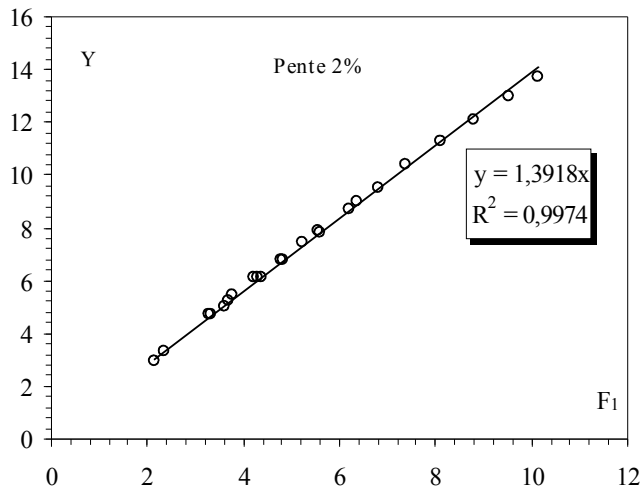
**Figure 2.5:** Variation de  $Y(F_1)$  pour  $\tan(\alpha) = 0,005$ . (o) points expérimentaux; (—) Courbes d'ajustement.



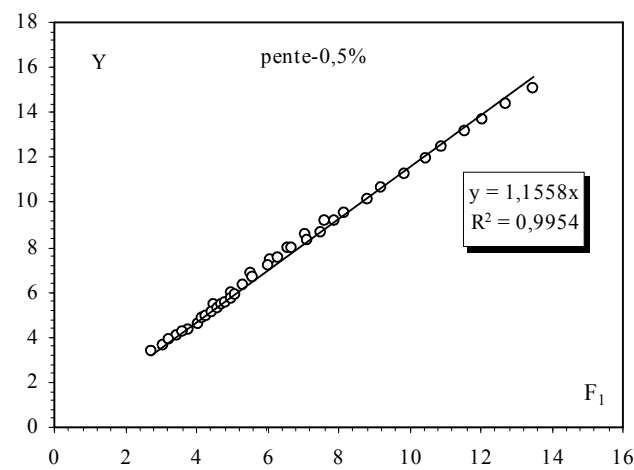
**Figure 2.6:** Variation de  $Y(F_1)$  pour  $\tan(\alpha) = 0,01$ . (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.



**Figure 2.7 :** Variation de  $Y(F_1)$  pour  $\tan(\alpha) = 0,015$ . (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.

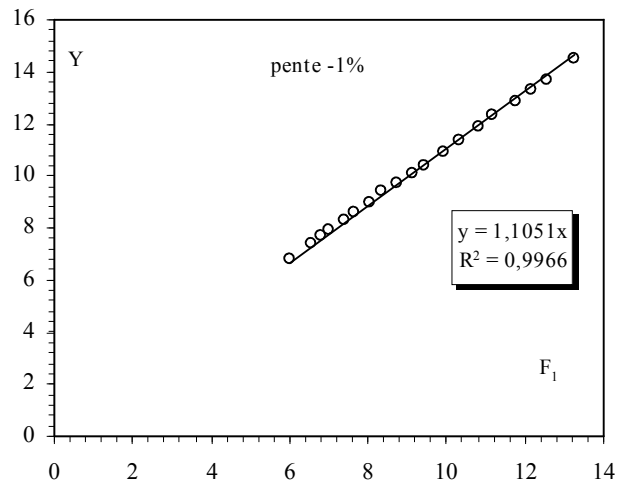


**Figure 2.8 :** Variation de  $Y(F_1)$  pour  $\tan(\alpha) = 0,02$ . (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.



**Figure 2.9 :** Variation de  $Y(F_1)$  pour  $\tan(\alpha) = -0,005$ . (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement





**Figure 2.10 :** Variation de  $Y(F_1)$  pour  $\tan(\alpha) = -0,01$ . (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

L'analyse des mesures expérimentales, montre que chaque nuage de points suit l'allure d'une courbe unique. Un ajustement par la méthode des moindres carrés linéaires montre que cette courbe est de la forme

$$Y = aF_1 \quad (2,15)$$

Les données expérimentales sont représentées au tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Valeurs des paramètres a

<b>tang (<math>\alpha</math>)</b>	<b>a</b>
0,005	1,23
0,01	1,27
0,015	1,33
0,02	1,39
0,00	1,2146
- 0 ,005	1,15
- 0,01	1,105

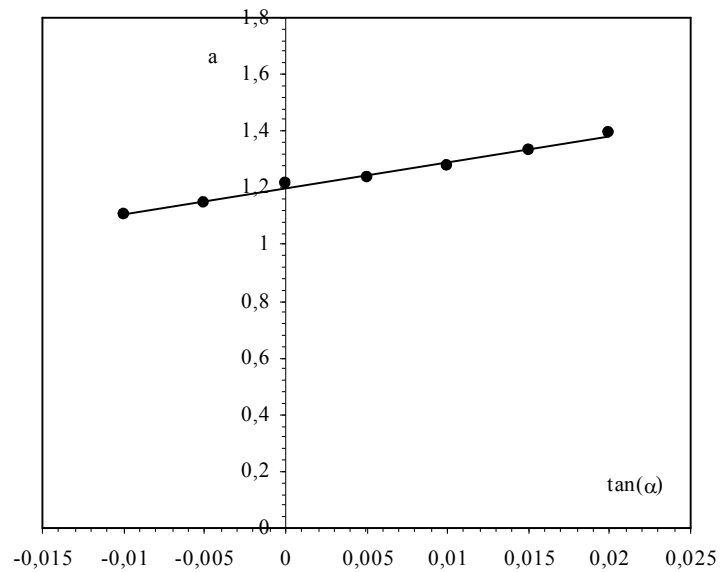


Figure .2.11 : Variation du paramètre a en fonction de tang (α).

La figure 2.11 montre clairement que la variation de b en fonction de la pente du canal tan (α) suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

$$a = 9,180 \tan(\alpha) + 1,19 \quad ; \quad R^2 = 0,99 \quad (2.16)$$

Remplaçant les paramètres a par leurs expressions respectives dans la relation  $Y = a F_1$ , on obtient :

$$Y = [9,180 \tan(\alpha) + 1,19] F_1 \quad (2.17)$$

Pour  $3,46 \leq F_1 \leq 13,17$  et  $-0,005 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$ .

Rapport de forme  $M = \frac{mh_1}{b}$  est donnée par :  $0,031 \leq M \leq 0,093$ .

La relation approchée (2) étant implicite dans (Y), nous fournissons un moyen simple et pratique pour la détermination du rapport (Y) des hauteurs conjuguées, connaissant le nombre de Froude incident  $F_1$  et l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du canal. Cette relation s'applique pour des nombres de Froude ( $F_1$ ) variant entre 2 et 14.

La figure 2.11 montre les courbes d'ajustements issues de la relation (2.16), appliquées aux points expérimentaux.

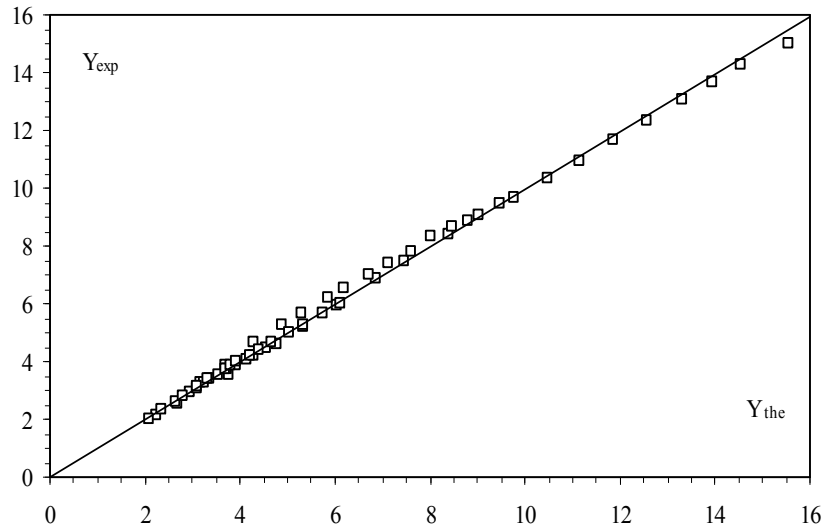


Figure 2.12: Variation de rapport des hauteurs conjuguées expérimentales  $F_{1exp}$  en fonction Rapport des hauteurs conjuguées théorique  $Y_{th}$  calculée selon la relation (2.17).  
 (—) Première bissectrice d'équation :  $Y_{exp} = Y_{th}$ .

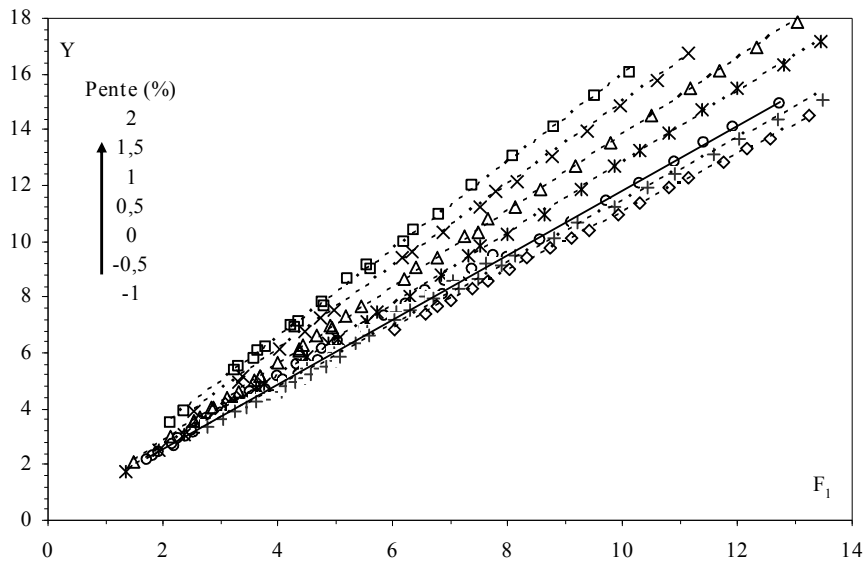


Figure 2.13 : Variation expérimentale de  $Y (F_{1the})$  pour différentes valeurs de  $\tan(\alpha)$ .

En effet, pour obtenir le rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  issu de la relation approchée 2.33, on a utilisé les couples de valeurs  $(F_{1th}, Y)$  du tableau 1.4.

## II.5. Exemple d'application :

Un exemple d'application consisterait à déterminer les caractéristiques d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal trapézoïdal, connaissant le débit volumique  $Q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ ; la profondeur conjuguée amont du ressaut  $h_1 = 0,3 \text{ m}$ ; la cotangente  $e$  de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal  $m = 0,311$ ; la largeur de fond de canal  $b = 1,7 \text{ m}$  et sachant que le rapport de forme  $M = mh_1/b$  doit être compris entre 0,031 et 0,094 le nombre de Froude compris entre 2 et 13.

Nombre de Froude  $F_1$

$$F_1 = \left[ \frac{Q^2}{g} \left( \frac{(b + 2mh_1)}{(bh_1 + mh_1^2)^3} \right) \right]^{1/2} = 4,44$$

### II.5.1. Ressaut contrôlé par seuil dans un canal trapézoïdal à pente positive ( $\alpha = 1\%$ ) :

\* Rapport des hauteurs conjuguées Y

$Y = [9,180 \tan(\alpha) + 1,19] F_1 = 5,69$  d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut

$h_2 = 1,70 \text{ m}$

### II.5.2. Ressaut contrôlé par seuil dans un canal trapézoïdal à pente nulle ( $\alpha = 0\%$ ) :

\* Rapport des hauteurs conjuguées Y

$Y = [9,180 \tan(\alpha) + 1,19] F_1 = 5,28$  d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut

$h_2 = 1,58 \text{ m}$

### II.5.3. Ressaut contrôlé par seuil dans un canal trapézoïdal à pente négative ( $\alpha = -1\%$ ) :

\* Rapport des hauteurs conjuguées Y

$Y = [9,180 \tan(\alpha) + 1,19] F_1 = 1,46$  d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut

$h_2 = 1,46 \text{ m}$

Il ressort de cet exemple d'application que pour le même nombre de Froude  $F_1$ , la profondeur conjuguée d'aval, la hauteur conjuguée  $h_2$  sont plus réduites dans le cas du ressaut à pente négative que leurs homologues contrôlés par seuil à pente positive et nulle.

## **II.6. Conclusion :**

Les mesures expérimentales ont permis d'estimer le coefficient de correction  $k$ , donné comme étant le rapport du volume réel et du volume calculé du ressaut. En effet, une valeur moyenne constante  $k=1,03$  a été trouvée, pour les sept (07) pentes étudiées, permettent de conclure la fiabilité de la relation (2.18). En outre, la relation générale (2.18) se présente sous une forme implicite vis à vis du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées et son application nécessite par conséquent l'utilisation d'un procédé itératif. Cette considération nous a conduit à proposer de remplacer la relation (2.14) par une relation approchée explicite (2.33) permettant la détermination aisée du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du canal. La relation approchée (2.18) a été comparé également avec la relation théorique (2.14).

## CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Nous avons analysé expérimentalement, à travers ce chapitre, deux types de ressaut à savoir ; ressaut hydraulique à pente variable. En premier chapitre, nous avons abordé la description du modèle expérimental, qui a servi de base à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique. Nous avons abordé également dans ce chapitre, la procédure expérimentale suivie afin d'aboutir à des résultats significatifs. Nous avons décrit ensuite, l'appareillage utilisé pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique, moyennant des schémas et des photographies. L'expérimentale s'est intéressée, à la variation de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour sept valeurs distinctes de la pente du canal. Sept nuages de points distincts, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la pente tang ( $\alpha$ ) du canal. L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport  $S$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident suit une loi de type logarithmique de la forme  $s/h_1 = a (F_1) + b$ .

L'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique à savoir la longueur du ressaut et la longueur du rouleau de surface. Il a été montré que l'inclinaison du canal, n'a pas d'influence sur les relations  $\lambda_j(F_1)$  et  $\lambda_r(F_1)$ . En outre, l'analyse statistique des mesures expérimentales a montré que les deux relations suivent une loi de type linéaire, de la forme  $y = ax + b$ . Par ailleurs l'étude expérimentale a montré que l'inclinaison positive du canal est un avantage pour la dissipation d'énergie.

La relation (2.12) exprime le nombre de Froude  $F_1$  en fonction du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées, de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du canal par rapport à l'horizontale et la longueur relative  $\lambda = L_j/h_1$  d'un ressaut hydraulique à pente variable, évoluant dans un canal trapézoïdal.

En second chapitre, nous avons consacré à l'analyse théorique du ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal trapézoïdal, à pente variable qui nous a permis de montrer que le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident peut être exprimé en fonction de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du canal par rapport à l'horizontal, du rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées du ressaut.

( $h_1$  et  $h_2$  étant les hauteurs du niveau d'eau respectivement à l'extrémité amont et aval), et de la longueur relative  $\lambda_j = L_j/h_1 =$  du ressaut, tel que :  $F_1 = f(Y, \lambda_j, \alpha)$ .

Cette relation fonctionnelle a été établie par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut, en tenant compte des hypothèses simplificatrices citées précédemment.

Les mesures expérimentales ont permis d'estimer le coefficient de correction  $k$ , donné comme étant le rapport du volume réel et du volume calculé du ressaut. En effet, une valeur moyenne constante  $k=1,03$  a été trouvée, pour les sept (07) pentes étudiées, permettent de conclure la fiabilité de la relation (2.18). En outre, la relation générale (2.18) se présente sous une forme implicite vis à vis du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées et son application nécessite par conséquent l'utilisation d'un procédé itératif. Cette considération nous a conduit à proposer de remplacer la relation (2.14) par une relation approchée explicite (2.33) permettant la détermination aisée du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du canal. La relation approchée (2.18) a été comparé également avec la relation théorique (2.14).

Aussi, l'étude expérimentale s'est intéressée à la dissipation d'énergie cinétique. On peut donc conclure que l'inclinaison négative du canal est un avantage pour la dissipation d'énergie.

---

## **TROISIEME PARTIE**

### **RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE ET FORCE PAR MARCHE POSITIVE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL**

**CHAPITRE I : ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE  
CONTROLE ET FORCE TYPE -A PAR MARCHE POSITIVE  
DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL**

**CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE  
FORCE PAR MARCHE POSITIVE DANS UN CANAL  
TRAPEZOÏDAL**

---



## INTRODUCTION DE LA TROISIÈME PARTIE

La troisième partie de notre étude, concerne notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé et de type -A, forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal, par voie expérimentale et par voie théorique concernant le ressaut hydraulique forcé de type A.

Cette étude a pour objectif d'analyser et de déterminer les caractéristiques intervenant au phénomène de ressaut hydraulique, cette partie est divisée en deux chapitres.

Le premier chapitre abordera l'étude expérimentale des deux types de ressaut cités ci-dessus, tandis que le dernier chapitre s'intéressera à l'étude théorique du ressaut hydraulique forcé de type A.

- Le premier chapitre de cette partie de notre étude sera consacré à l'analyse expérimentale des deux types de ressaut, à savoir le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut de type -A, forcé par marche positive.

Cette étude aura pour objectif de déterminer l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, l'étude expérimentale permet de trouver des relations empiriques exprimant la variation des paramètres adimensionnels intervenants dans ce type de ressaut.

Trois volets seront alors étudiés :

- Ressaut hydraulique contrôle par marche positive
- Ressaut hydraulique forcé par marche positive
- Etude comparative entre les trois types :
  - ressaut contrôle par seuil mince paroi ;
  - ressaut contrôlé par marche positive ;
  - ressaut forcé par marche positive ;
- Le deuxième chapitre de cette partie s'intéressera à l'étude théorique du ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal.

Cette étude est d'établir d'une manière pratique la relation fonctionnelle  $f(F_1, Y, S) = 0$ , où  $F_1$  représente le nombre de Froude de l'écoulement incident dans la section du pied du ressaut,  $Y$  représente le rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  ( $h_1$  et  $h_2$  les hauteurs du ressaut respectivement à l'amont et à l'aval) et  $S=s/h_1$  est la hauteur relative de la marche positive ( $s$  la hauteur absolue de la marche).

En utilisant l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut. La relation établie devra faire l'objet d'une comparaison à celle obtenue pour le cas du ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal trapézoïdal en posant  $S = 0$ .

## Chapitre I

### **ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE ET FORCE TYPE - A PAR MARCHE POSITIVE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL**

#### **I.1. Introduction :**

Le présent chapitre a pour but d'étudier par voie expérimentale les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par marche positive dans un canal trapézoïdal et celles du ressaut hydraulique de type -A un canal trapézoïdal.

Deux sous chapitre seront abordés dans ce chapitre : la description du modèle expérimentale, la description des essais et les résultats expérimentaux.

#### **I.2. Description du modèle :**

##### **I.2.1. Description du canal :**

Le canal expérimental (figure 1.1) et (figure 1.2) est constitué d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure de section droite trapézoïdal symétrique d'angle d'inclinaison des talus de  $73^\circ$ , par une conduite de PVC circulaire de 115 mm de diamètre. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe (figure 1.5) qui alimente un convergent en charge débouchant dans le canal de mesure. Le canal de mesure de section trapézoïdal et de longueur 5 m est relié, dans sa partie d'aval, à un second canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale (figure 1.6), permettant la mesure directe du débit.



*Figure 1.1 : Photographie du canal de mesure utilisé (vu latérale).*



*Figure 1.2 : Photographie du canal de mesure utilisé (vu e plan).*



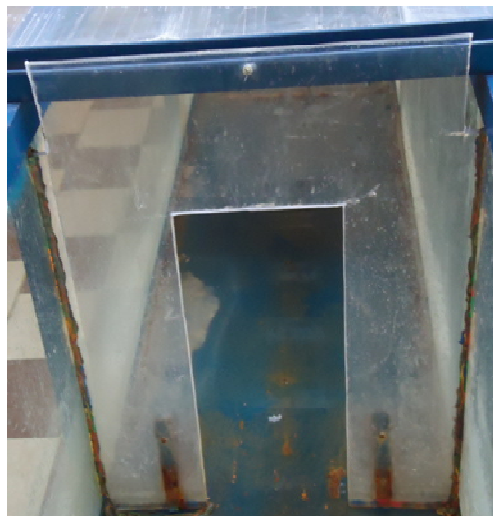
*Figure 1.3 : Photographie de la boîte en charge et vanne de manipulation.*



*Figure 1.4 : Photographie d'une série de convergent*



*Figure 1.5 : Pompe centrifuge.*



*Figure 1.6 : déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale*

### I.2.2. Mesure du débit :

Comme il a été cité précédemment, le canal de mesure de section trapézoïdal est relié, dans sa partie aval, à un second canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérales (figure 1.6), réalisé et testé par Hachemi Rachedi (2006), permettant la détermination du débit volume  $Q$ . Cette procédure est assurée par l'injection des hauteurs déversantes ( $h$ )

Dans la formule (2.1) en assurant la condition d'application de celle ci qui est :

$$\beta < 0.45, \text{ avec } \beta = b/B.$$

$$Q = 0,3794B\sqrt{2g}\beta\left(1 + 0,16496\beta^{2,0716}\right)^{3/2} h_{dev}^{3/2} \quad (1.1)$$

$$\text{Avec : } \beta = \frac{b}{B}$$

$Q$  : le débit en ( $m^3/s$ );

$B$ : la largeur du canal en (m) ;

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

$\beta$  : Rapport de forme ;

$b$  : largeur de l'échancrure ;

$h$  : la hauteur de la lame d'eau.

La condition d'application de cette relation est :  $\beta < 0,45$

### I.2.3. Limnimétrie :

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à la hauteur due à la section de la sortie du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été évaluées par un limnimétrie.

La lecture sur le limnimétrie s'effectue en deux étapes : on procède d'abord à la lecture de la graduation sur la règle, située immédiatement en haut du zéro du vernier, puis on effectue la lecture du nombre de cinquantième en face de la division qui coïncide ou celle qui est la plus rapprochée d'une division de la règle.



*Figure 1.7 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.*

### I.2.4. les marches positives :

Afin d'obtenir un nombre important de points mesures, nous avons confectionné 12 marches positives de longueur 1m et de différents hauteur  $S$  (cm) 3.6 ; 4.7 ; 5.6 ; 6.5 ; 7.5 ; 9 ; 10 ; 11.6 ; 12.7 ; 13.9 ; 14.2 ; 15.9



*Figure 1.8: photographie des séries des marches positive*

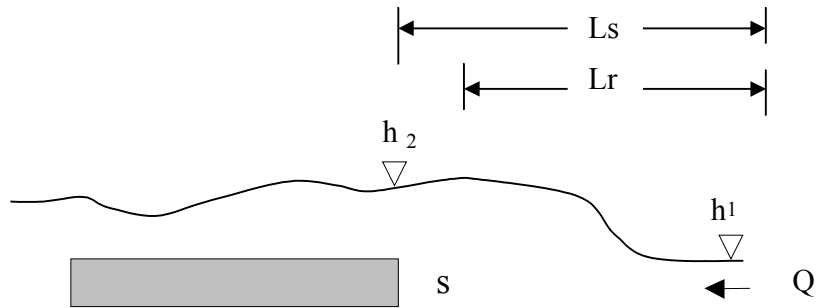
### **I.3. Résultats expérimentaux :**

#### **I.3.1. Procédure expérimentale :**

L'étude expérimentale s'intéresse au ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive dans canal trapézoïdal, dix marches positives :  $s$  (mm) = 3,6 ; 4,7 ; 5,6 ; 6,5 ; 7,5 ; 9 ; 10 ; 11,6 ; 12,7 ; 13,9. L'expérimentation a été menée sous cinq hauteurs initiales de l'écoulement :  $h_1$ (mm) = 20; 30; 40; 50; 60; Une large gamme du nombre de Froude Incident a été ainsi obtenue, correspondant  $2 < F_1 < 14$ . La formation du ressaut contrôlé et forcé est conditionnée par la mise en place d'une marche positive, l'aval de l'écoulement. A cet effet, des marches de différentes hauteurs ont été utilisées  $h_1$ . Les caractéristiques hydrauliques et géométriques qui intéressent la présente étude expérimentale sont : le débit volume  $Q$ , la hauteur  $h_1$  de l'écoulement incident, la hauteur finale  $h_2$  du ressaut, la longueur  $L_j$ .

Pour une hauteur  $s$  de la marche positive placée à l'extrémité aval du canal et pour une hauteur  $h_1$  de l'écoulement incident, l'augmentation du débit volume  $Q$  provoque l'apparition d'un ressaut. Le couple  $(Q, h_1)$  permet en outre le calcul du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour la valeur donnée d'ouverture du canal trapézoïdal. L'accroissement de  $F_1$  entraîne, la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation de sa longueur  $L_j$ . Ainsi, chaque valeur du nombre de Froude  $F_1$  correspond à une valeur de la longueur  $L_j$  de ressaut ainsi qu'une valeur de la hauteur  $s$  de la marche. Les principales caractéristiques étudiées dans un ressaut hydraulique provoqué par marche positive sont : le débit volume  $Q$ , la profondeur initiale  $h_1$ , la profondeur finale  $h_2$ , la hauteur  $s$  de la marche, la longueur  $L_r$  du rouleau, la position  $L_s$  de la marche. Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le nombre de Froude de l'écoulement incident  $F_1$ , le rapport  $Y=h_2/h_1$  des profondeurs conjuguées du ressaut, la hauteur relative  $S=s/h_1$  de la marche positive.





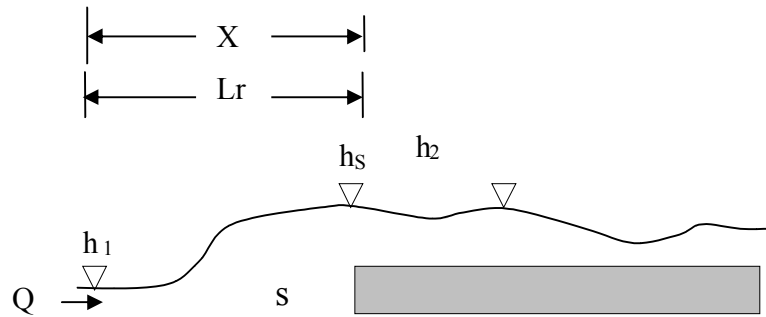
**Figure 1.9:** Schéma du ressaut hydraulique contrôlé par marche positive



**Figure 1.10 :** photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive  
 $F_1 = 8,87$ ;  $s = 17$  cm;  $L_j = 164$  cm;  $h_2 = 20,8$  cm



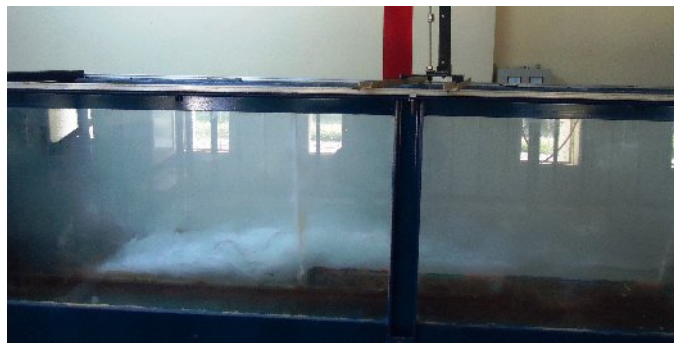
**Figure 1.11:** photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive  
 $F_1 = 8,96$ ;  $s = 17$  cm;  $L_j = 164$  cm;  $h_2 = 20,8$  cm



**Figure 1.12 :** Schéma du ressaut hydraulique forcé de type A par marche positive



**Figure 1.13:** photographie d'un ressaut hydraulique forcé type -A par marche  
 $F_1 = 8,96$ ;  $s = 17$  cm;  $L_j = 164$  cm;  $h_2 = 20,8$  cm



**Figure 1.14:** photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive  
 $F_1 = 8,96$ ;  $s = 17$  cm;  $L_j = 164$  cm;  $h_2 = 20,8$  cm

Pour obtenir les résultats expérimentaux, nous avons suivi les étapes suivantes :

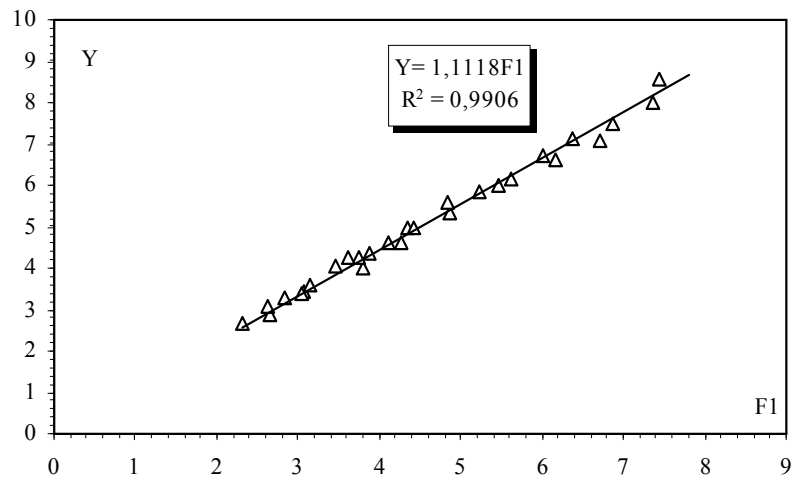
1. Calculer du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, par application de la relation :  $F_1^2 = 2Q^2 \cos^5 \alpha / (gh_1^5)$  ;
2. Mesurer de la longueur  $L_r$  du rouleau ;
3. Mesurer de la longueur  $L_j$  du ressaut ;
4. Mesurer de la hauteur conjuguée aval  $h_2$  du ressaut ;
5. Mesurer de la lame d'eau au-dessus du déversoir rectangulaire à paroi latérale;
6. Calculer du débit volume correspondant, par application de la relation (1.1)

### I.3.2. Analyse des résultats expérimentaux :

#### I.3.2.1. Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive :

##### I.3.2.1.1. Variation de la hauteur relative du seuil $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ :

La représentation graphique des résultats expérimentaux, des paramètres de la fonction  $Y = f(F_1)$ , sont données par la (Figure 1.15). Ces paramètres adimensionnels sont le rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  et le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure 1.15 :** Variation du rapport  $Y$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , ( $\Delta$ ) points expérimentaux (—) Courbes d'ajustement.

L'ajustement des valeurs expérimentales par la méthode des moindres carrés linéaires à montrer que la loi de la variation de  $Y$  en fonction de  $F_1$  est de type linéaire, la droite obtenue passe par l'origine et elle est donnée par la relation :

$$Y = 1,1118F_1 \quad (1.1)$$

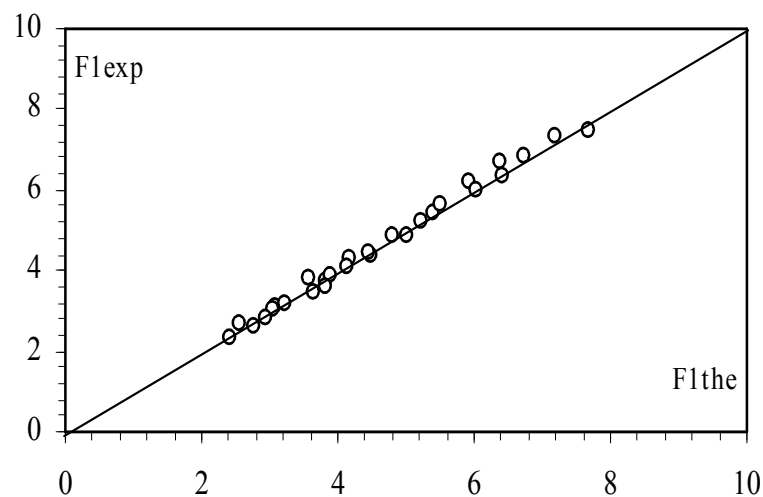
L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la courbe  $Y = f(F_1)$  est donné par le tableau 1.1 :

**Tableau 1.1 :** Mesurer expérimentales ayant servi au traçage du graphique de(Y) en fonction de  $F_1$ .

F1	Y	F1	Y
4.87	5.35	7.81	9.33
5.56	5.85	3.07	3.42
6.17	6.60	3.75	4.27
6.70	7.10	3.88	4.35
7.35	8.00	4.10	4.62
7.57	9.1	4.42	4.97
5.46	6.00	4.84	5.57
3.79	4.00	5.22	5.82
4.27	4.63	2.66	2.86
4.33	5.00	3.04	3.40
4.52	5.50	3.13	3.60
5.61	6.13	3.47	4.06
6.02	6.73	3.60	4.26
6.36	7.13	2.32	2.68
6.86	7.50	2.62	3.07
7.44	8.57	2.82	3.28

Comparaison entre la relation théorique et les résultats expérimentaux

La figure 1.16 représente graphiquement la variation de nombre de Froude expérimentaux  $F_{1exp}$  en fonction de celles théoriques  $F_{1the}$ , montre que les points obtenus se répartissent d'une manière quasi uniforme autour de la première bissectrice.

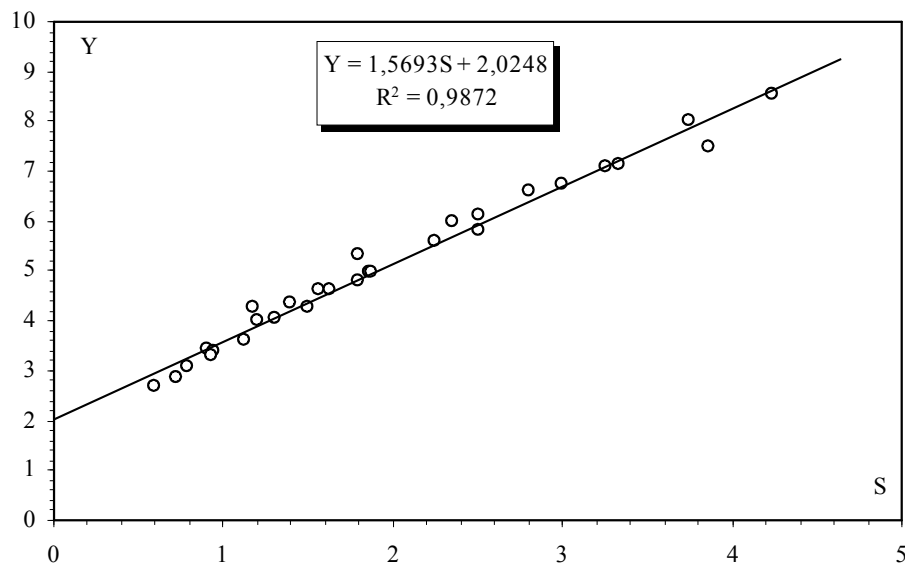


**Figure 1.16:** Variation du rapport  $F_{1the}$  en fonction du nombre de Froude  $F_{1exp}$ , (O) points expérimentaux (—) Courbes d'ajustement.

Par contre, la représentation graphique des résultats obtenus par la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées (Y) en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  de la marche positive, a donné une droite qui ne passe pas par l'origine (1.17).

L'ajustement des données expérimentales par la méthode du moindre carré linéaire a donné la relation (1.2).

$$Y = 1,5639S + 2,0248 \quad (1.2)$$



**Figure 1.17 :** Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative S de la marche positive. (O) points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.2)

Les données expérimentales qui en servi au traçage de la fonction  $Y = f(S)$ , sont regroupées dans le tableau 1.2 :

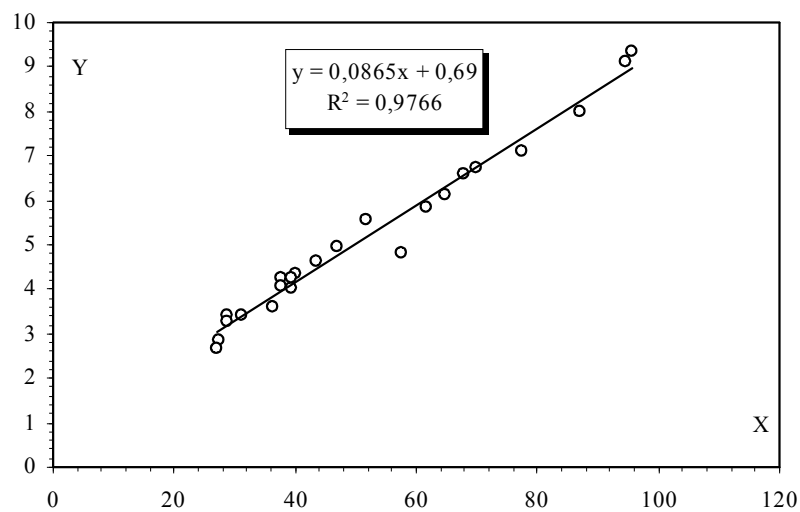
**Tableau 1.2 :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique  $Y = f(S)$

Y	S	Y	S
5.35	1.80	9.33	4.63
5.85	2.35	3.42	0.90
6.60	2.80	4.27	1.28
7.10	3.25	4.35	1.40
8.00	3.75	4.62	1.63
9.10	4.50	4.97	1.87
6.00	2.35	5.57	2.25
4.00	1.20	5.82	2.50
4.63	1.57	2.86	0.72
5.00	1.87	3.40	0.94
5.50	2.17	3.60	1.12
6.13	2.50	4.06	1.30

6.73	3.00	4.26	1.50
7.13	3.33	2.68	0.60
7.50	3.87	3.07	0.78
8.57	4.23	3.28	0.93

L'analyse des résultats expérimentales a montré qu'il ya une relation entre le rapport Y des hauteurs conjuguées et la position relative  $X = x/h_1$  de la marche positive, cette relation est exprimé par une droite de la forme  $Y = a X + b$ , l'ajustement des données expérimentales de la fonction  $Y = f(X)$ , par la méthode des moindres carrés linéaire a aboutie à une droite, qui est représenté par la relation (1.3) :

$$Y = 0,0865X + 0,069 \quad (1.3)$$



**Figure 1.18:** Variation expérimentale du rapport Y en fonction de la position relative X de la marche positive.

(O) points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.3)

Les mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la fonction  $Y = f(X)$ , sont représentées par le tableau 12 :

**Tableau 1.3 :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction  $Y = f(X)$

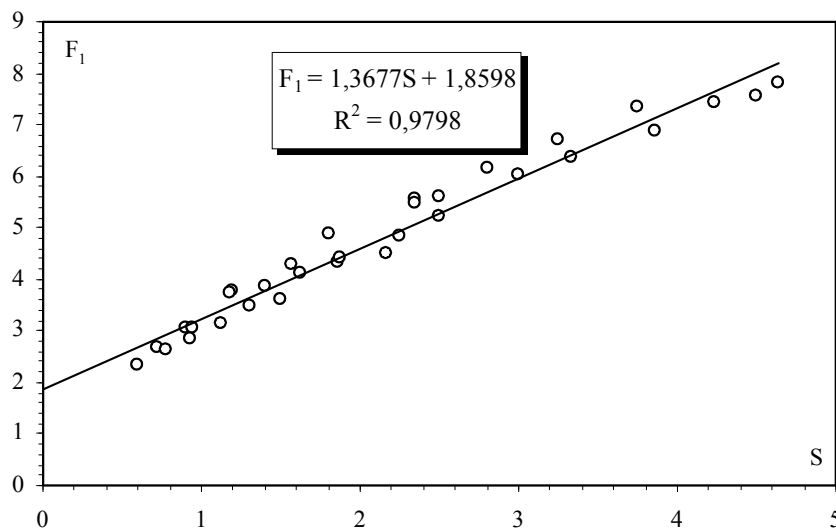
Y	X	Y	X
6.60	68.00	4.62	43.50
7.10	77.50	4.97	47.00
8.00	87.00	5.57	51.75
9.1	94.50	5.82	61.75
4.00	39.33	2.86	27.40
4.63	53.67	3.40	31.20
6.13	64.67	3.60	36.40
6.73	70.00	4.06	37.60
9.33	95.67	4.26	39.40
3.42	28.75	2.68	27.17
4.27	37.75	3.07	24.17
4.35	40.25	3.28	28.67

**I.3.2.1.2. Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de Froude :**

A partir des résultats expérimentaux obtenus on a établi une relation linéaire, liant le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident et la hauteur relative  $S = s/h_1$  de la marche positive. Le but de cette relation est de déterminer la hauteur relative de la marche positive, en connaissant le débit volume  $Q$  et la hauteur initiale  $h_1$  du ressaut.

La (Figure 1.19) illustre la forme de la courbe obtenue. L'ajustement des couples de valeurs expérimentales ( $S, F_1$ ), par la méthode des moindres carrés linéaires a montré que la fonction  $F_1 = f(S)$  est une droite qui est représentée par la relation (1.4) :

$$F_1 = 1,3677S + 1,8598 \quad (1.4)$$



**Figure 1.19:** Variation expérimentale de nombre de Froude  $F_1$  en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  de la marche positive. (o) points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation



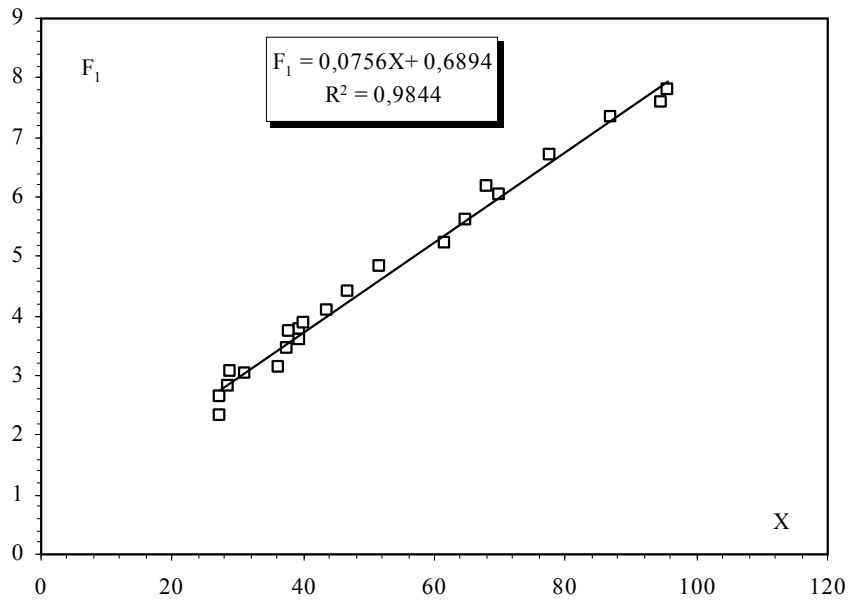
Les mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la fonction  $F_1 = f(S)$ , sont représentés par le tableau 1.4 : **Tableau 1.4** : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction  $F_1 = f(S)$

$F_1$	S	$F_1$	S
4,87	1,80	7,81	4,63
5,56	2,35	3,07	0,90
6,17	2,80	3,75	1,28
6,70	3,25	3,88	1,40
7,35	3,75	4,10	1,63
7,57	4,50	4,42	1,87
5,46	2,35	4,84	2,25
3,79	1,20	5,22	2,50
4,27	1,57	2,66	0,72
4,33	1,87	3,04	0,94
4,52	2,17	3,13	1,12
5,61	2,50	3,47	1,30
6,02	3,00	3,60	1,50
6,36	3,33	2,32	0,60
6,86	3,87	2,62	0,78
7,44	4,23	2,82	0,93

### I.3.2.1.3. Position relative de la marche en fonction de nombre de Froude :

L'analyse des résultats expérimentales nous a permis d'établir une autre relation entre le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident et la position relative  $X = x/h_1$  de la marche positive. Dans la pratique on a besoin d'une telle relation, pour déterminer l'emplacement des marches positives pour contrôler notre ressaut. La (Figure 1.20) montre que la représentation graphique des points expérimentaux de la fonction  $F_1 = f(X)$  s'aligne sur une droite qui ne passe pas par l'origine. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés linéaires a abouti à la relation (1.5) d'une droite linéaire de la forme  $Y = aX + b$

$$F_1 = 0.0756X + 0.68 \quad (1.5)$$



**Figure 1.20:** Variation expérimentale du nombre de Froude  $F_1$  en fonction de la position relative  $X = x/h_1$  de la marche positive. ( $\square$ ) points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.5).

Les mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la fonction  $F_1 = f(X)$ , sont représentés par le tableau 1.5 :

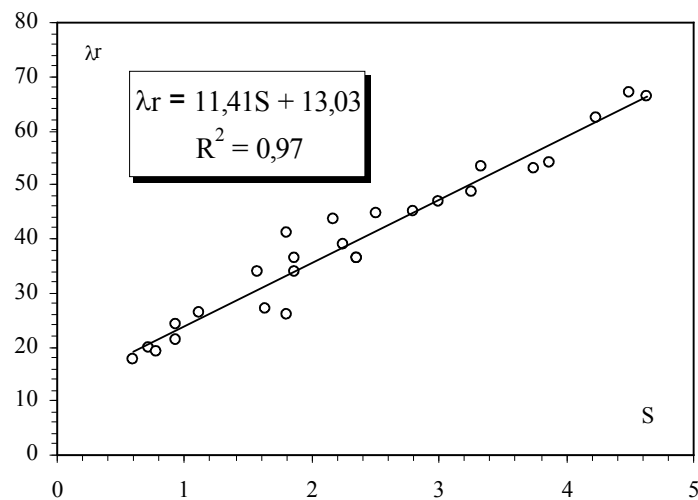
**Tableau 1.5 :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction  $F_1 = f(X)$

$F_1$	$X$	$F_1$	$X$
6.17	68.00	4.10	43.50
6.70	77.50	4.42	47.00
7.35	87.00	4.84	51.75
7.57	94.50	5.22	61.75
3.79	39.33	2.66	27.40
4.27	53.67	3.04	31.20
5.61	64.67	3.13	36.40
6.02	70.00	3.47	37.60
7.81	95.67	3.60	39.40
3.07	28.75	2.32	27.17
3.75	37.75	2.62	24.17
3.88	40.25	2.82	28.67

### I.3.2.1.4. Longueur relative du rouleau $\lambda_r$ en fonction de la hauteur de la marche :

Les résultats expérimentaux ont abouti à une autre relation, liant la longueur relative du rouleau  $\lambda_r = L_r/h_1$  et la hauteur relative  $S = s/h_1$  de la marche positive. La (Figure 1.21) montre que la représentation graphique de la fonction  $\lambda_r = f(S)$  est de la forme  $y = aX + b$ , l'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés linéaires a abouti à la relation (1.6) :

$$\lambda_r = 11,41S + 13,03 \quad (1.6)$$



**Figure 1.21 :** Variation expérimentale de la longueur relative du rouleau  $\lambda_r = L_r/h_1$  en fonction de la hauteur  $S = s/h_1$  de la marche positive.  
(o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.6).

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction  $\lambda_r = f(S)$ , sont représentés sur le tableau (1.6) :

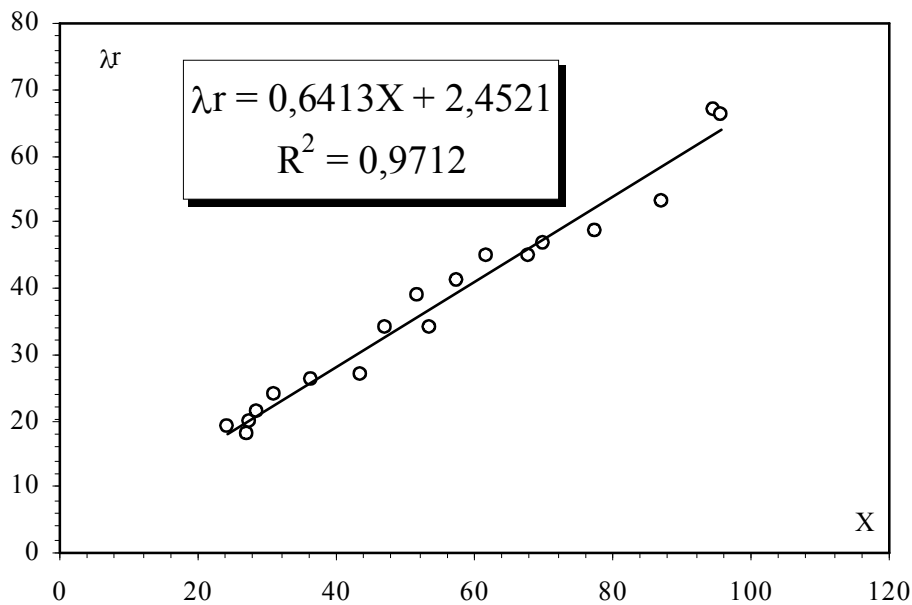
**Tableau 1.6 :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction  $\lambda_r = f(S)$

$\lambda_r$	S	$\lambda_r$	S
26	1.80	54.0	3.87
36.5	2.35	62.33	4.23
45.0	2.80	66.33	4.63
48.5	3.25	27.0	1.63
53.0	3.75	34.0	1.87
67.0	4.50	39.0	2.25
41.0	1.80	44.75	2.50
36.5	2.35	19.80	0.72
34.0	1.57	24.00	0.94
36.33	1.87	26.20	1.12
43.67	2.17	17.83	0.60

46.67	3.00	19.17	0.78
53.33	3.33	21.17	0.93

L'analyse des résultats expérimentaux du ressaut contrôlé par marche positive évaluant dans un canal trapézoïdal, nous a donné une relation entre la longueur relative du rouleau  $\lambda_r$  et la position relative  $X = x/h_1$  de la marche positive. La courbe obtenue est une droite de la forme  $Y = aX + b$ , l'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés linéaires a montré que la fonction  $\lambda_r = f(X)$  est une droite qui ne passe pas par l'origine. Cette droite est donnée par la relation (1.7) :

$$\lambda_r = 0,64X + 2,45 \quad (1.7)$$



**Figure 1.22 :** Variation expérimentale de la longueur relative  $\lambda_r = Lr/h_1$  en fonction de la position relative  $X = x/h_1$  de la marche positive.  
(o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.7).

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction  $\lambda_r = f(X)$ , sont représentés sur le tableau (1.7) :

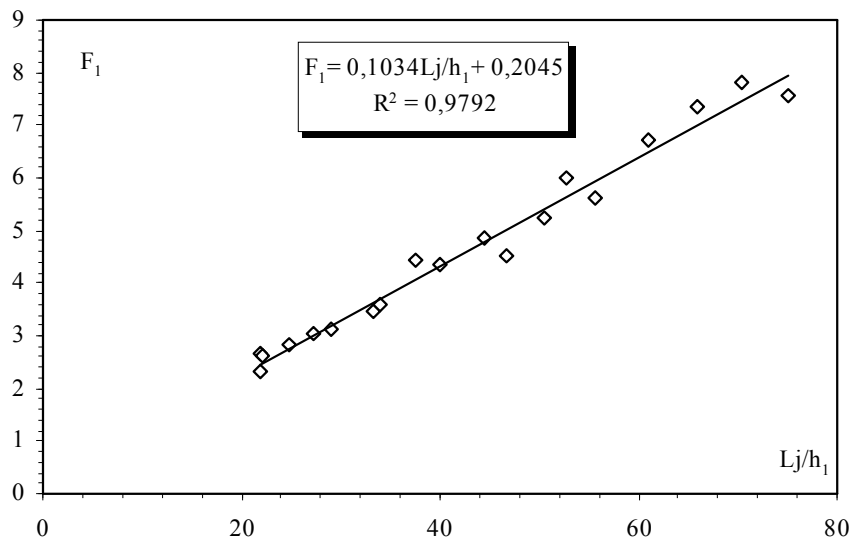
**Tableau 1.7:** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction  $\lambda_r = f(X)$

$\lambda_r$	X	$\lambda_r$	X
45,00	68,00	34,00	47,00
48,50	77,50	39,00	51,75
53,00	87,00	44,75	61,75
67,00	94,50	19,80	27,40
41,00	57,50	24,00	31,20
34,00	53,67	26,20	36,40
46,67	70,00	17,83	27,17
66,33	95,67	19,17	24,17
27,00	43,50	21,17	28,67

**I.3.2.1.5. Longueur relative du ressaut  $\lambda_j$  :**

Dans notre étude bibliographique on a montré que la limite aval du ressaut ne peut être déterminée que par la voie de l'expérimentale. Cette limite est laquelle ou la protection du bassin amortisseur n'est plus nécessaire. Les résultats obtenus par notre étude expérimentale a montré qu'il ya une relation entre la longueur relative  $\lambda_j = L_j/h_1$  du ressaut et le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident (Figure 1.23). L'ajustement des points expérimentaux par la méthode du moindre carré linéaire a montré que la fonction  $\lambda_j = L_j/h_1$  est une droite son équation est donnée par la relation (1.8) :

$$F_1 = 0,103 \lambda_j + 0,204 \quad (1.8)$$



**Figure 1.23:** Variation expérimentale de la longueur relative  $\lambda_j = L_j/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .  
 (◊) Points expérimentaux. (—) Courbe tércée selon la relation (1.8)

Les résultats expérimentaux en taux qui ont servi au traçage de la fonction  $\lambda_r = f(X)$ , sont représentés sur le tableau (1.8) :

**Tableau 1.8:** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction  $\lambda_r = f(F_1)$

$\lambda_j$	$F_1$	$\lambda_j$	$F_1$
61,00	6,70	50,50	5,22
66,00	7,35	21,80	2,66
75,00	7,57	27,20	3,04
40,00	4,33	29,00	3,13
46,67	4,52	33,20	3,47
55,67	5,61	34,00	3,60
52,67	6,02	21,83	2,32
70,33	7,81	22,17	2,62
37,50	4,42	24,83	2,82
44,50	4,84		

Par ailleurs, la représentation graphique (Figure 1.24) de la fonction  $\lambda_j = f(X)$ , relation liant la longueur relative du  $\lambda_j = L_j/h_1$  du ressaut hydraulique et la position relative  $X = x/h_1$  de la marche positive, a abouti à une courbe unique. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode du moindre carré linéaire nous a montré que la fonction  $\lambda_j = f(X)$  est une droite, qu'est donnée par la relation (1.9) :

$$\lambda_j = 1,354X - 4,87 \quad (1.9)$$

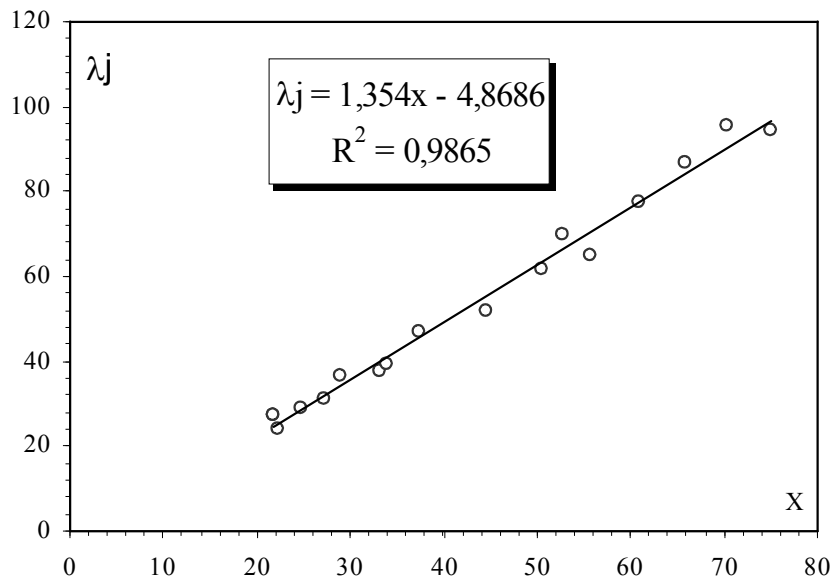


Figure 1.24: Variation expérimentale de la longueur relative  $\lambda_j = L_j/h_1$  du ressaut en fonction de la position relative  $X = x/h_1$  de la marche positive  
(O) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.9)

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction  $\lambda r = f(X)$ , sont représentés sur le tableau (1.9) :

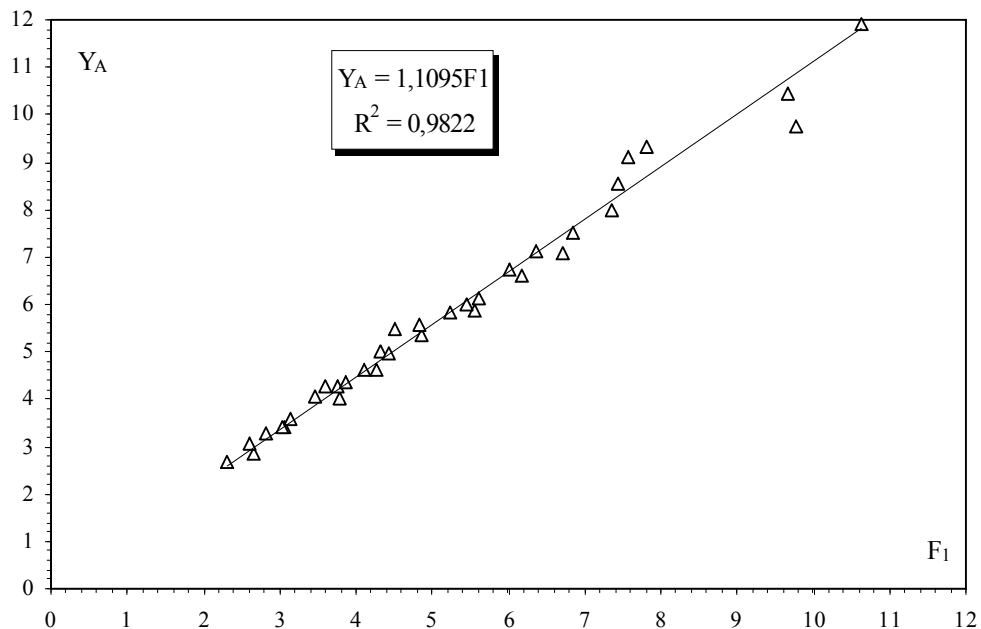
**Tableau 1.9:** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction  $\lambda_j = f(X)$

$\lambda_j$	X	$\lambda_j$	X
61,00	77,50	21,80	27,40
66,00	87,00	27,20	31,20
75,00	94,50	29,00	36,40
55,67	64,67	33,20	37,60
52,67	70,00	34,00	39,40
70,33	95,67	21,83	27,17
37,50	47,00	22,17	24,17
44,50	51,75	24,83	28,67
50,50	61,75		

### I.3.2.2. Ressaut hydraulique forcé type –A :

#### I.3.2.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :

La figure 1.25 représente la variation de  $Y_A$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement, incident tel que  $Y_A = (h_2 + s) / h_1$  est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique forcé type – A, la courbe en trait continu représente la relation  $Y_A = f(F_1)$ , qui est



**Figure 1.25:** Variation du rapport  $Y$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ ,  
( $\Delta$ ) Points expérimentaux Courbe tracée selon la relation (1.10).

La représentation graphique des points expérimentaux des rapports  $Y_A$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  a abouti à une courbe unique :

$$Y_A = 1,109F_1 \quad (1.10)$$

**Tableau 1.10 :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage la fonction  $Y = f(F_1)$ .

F1	Y	F1	Y
3,33	4,5	3,25	3,65
4,40	5,9	3,50	3,90
5,26	6,2	2,65	2,78
5,66	6,6	3,45	3,38
6,81	7,7	3,58	3,68
7,02	8,3	3,62	4,00
3,68	4,75	2,39	2,50
6,17	7,7	2,48	2,94
6,81	8,00	2,63	3,02
3,55	5,35	2,66	3,34
2,55	3,40	2,16	2,12
3,41	3,90	2,45	2,56
3,64	4,07	2,25	2,82
4,17	4,60	2,60	3,10
4,54	5,10	2,88	3,48
4,91	5,80	1,83	2,18
2,42	2,90		
2,69	3,20		
2,96	3,38		

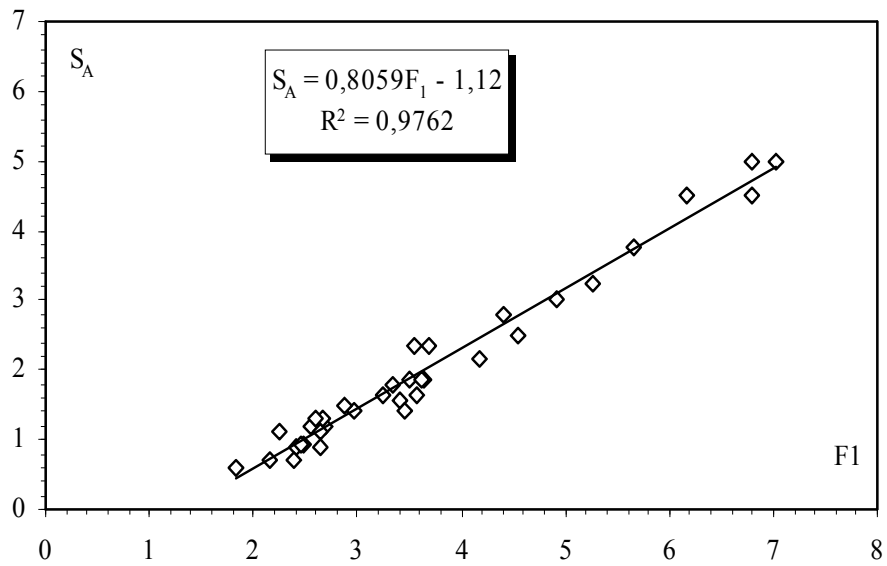
### I.3.2.2.2. Hauteur relative de la marche en fonction de nombre de Froude :

L'analyse des mesures expérimentales a également montré, que la fonction  $s/h_1 = f(F_1)$  est de type linéaire

$$S_A = s/h_1 = 0,805F_1 - 1,12 \quad (1.11)$$

Sur la figure 1.26 sont représentées à la fois de mesure expérimentales de la hauteur relative  $S_A$  de la marche positive pour avoir ressaut hydraulique forcé type A en fonction du nombre de Froude de  $F_1$





**Figure 1.26:** Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude  $F_1$ ,  
 (□) Points expérimentaux Courbe tracée selon la relation (1.11).

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction  $\lambda r = f(X)$ , sont représentés sur le tableau (1.11) :

**Tableau 1.11** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction  $S_A = f(F_1)$

SA	F1	SA	F1
1,80	3,33	2,17	4,17
2,80	4,40	2,50	4,54
3,25	5,26	3,00	4,91
3,75	5,66	0,90	2,42
4,50	6,81	1,18	2,69
5,00	7,02	1,40	2,96
2,35	3,68	1,63	3,25
4,50	6,17	1,88	3,50
5,00	6,81	0,90	2,65
2,35	3,55	1,40	3,45
1,20	2,55	1,63	3,58
1,57	3,41	1,88	3,62
1,87	3,64	0,72	2,39
0,94	2,45	0,94	2,48
1,12	2,25	1,12	2,63
1,30	2,60	1,30	2,66
1,50	2,88	0,72	2,16
0,60	1,83		

### I.3.3. Etude comparative :

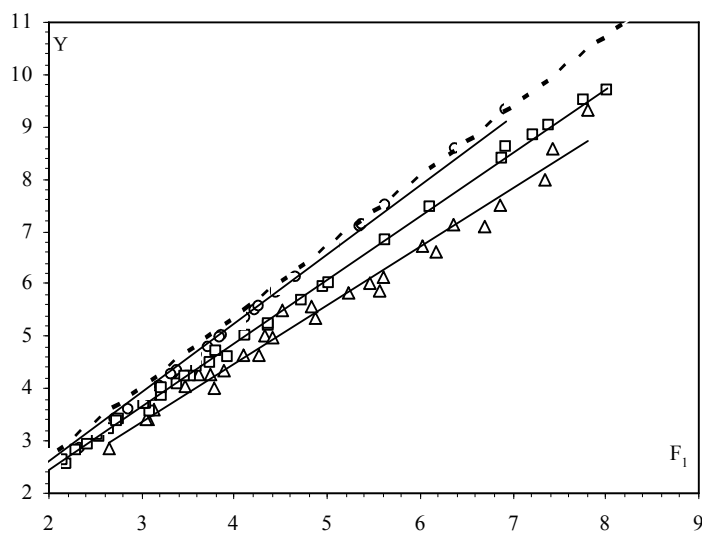
Cette présente étape de notre étude expérimentale, consiste à faire une étude comparative entre le ressaut contrôlé par seuil mince, le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut forcé type A par marche positive.

#### I.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :

La figure 1.27 montre la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les trois types de ressauts cités précédemment.

La relation théorique de Wanoschek et Hager (1989) montre que le nombre de Froude  $F_1$

Incident dépend exclusivement du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  et du rapport de forme  $M$ . La courbe issue de cette relation se présente au-dessus des trois autres courbes expérimentales montrant clairement que la présence d'un obstacle a un effet réducteur significatif sur le ressaut. Cependant, pour une gamme pratique de nombres de Froude la courbe théorique est presque confondue avec la courbe du ressaut contrôlé par seuil mince



**Figure 1.27:** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .  
(o) Ressaut contrôlé par seuil mince. (----) Ressaut contrôlé par seuil mince relation théorique.  
(□) Ressaut contrôlé par marche positive. (Δ) Ressaut forcé de type A par marche positive

Par ailleurs, pour un même nombre de Froude, le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut forcé est inférieur à celui de son homologue contrôlé. Aussi, il est constaté que pour le même type de ressaut, la marche positive a un effet réducteur sur la hauteur du ressaut meilleur que celui du seuil

mince. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode du moindre carré linéaire nous a montré que la fonction  $Y = f(F_1)$ , est une droite, qu'est donnée par la relation (1.13) :

$$Y = aF_1 \quad (1.13)$$

Avec:  $0,031 \leq M \leq 0,094$  et  $2 < F_1 < 8$  où:

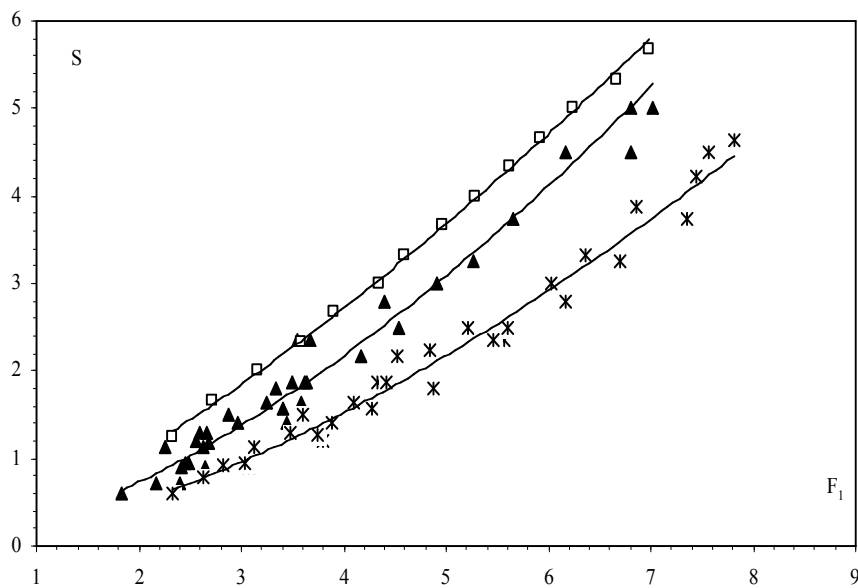
$a = 1,21$  : ressaut contrôlé par seuil mince

$a = 1,13$  : ressaut contrôlé par marche positive

$a = 1,01$  : ressaut forcé par marche positive

### 1.3.3.2. Hauteur relative du seuil et de la marche positive :

La Figure 1.28 montre la variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil et la marche positive en fonction du nombre de Froude  $F_1$



**Figure 1.28:** Variation du rapport  $S$  des hauteurs relatives en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

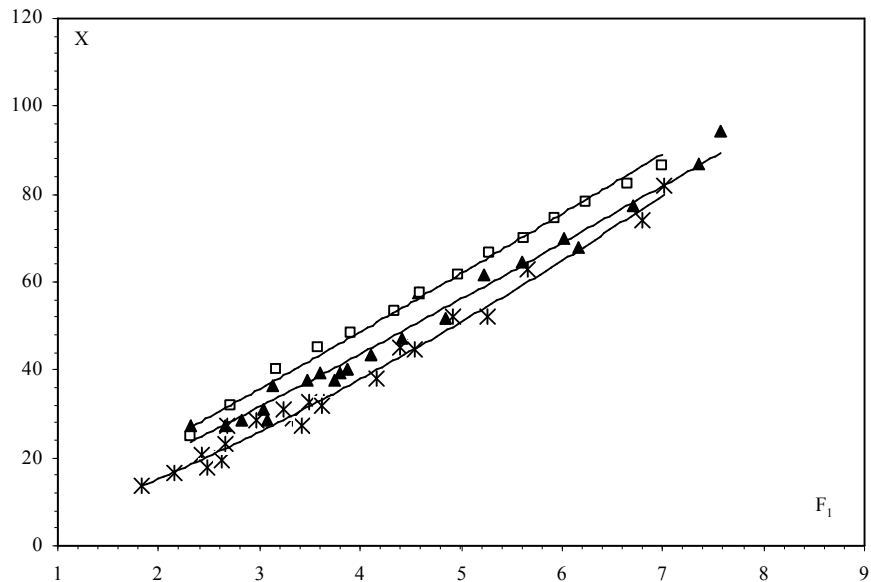
(▲) Ressaut contrôlé par marche. (□) Ressaut contrôlé par seuil mince.

(⋈) Ressaut forcé de type A par marche positive.

Selon la figure 1.28, l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident suit une loi de type puissance de la forme  $s/h_1 = a F_1^b$  et un coefficient de détermination  $R^2 = 0,98$ , Avec:  $0,031 \leq M \leq 0,094$  et  $2 < F_1 < 8$  où:  $a = 0,15$  et  $b = 1,65$  correspond au ressaut forcé par marche positive;  $a = 0,24$  et  $b = 1,57$

correspond au ressaut contrôlé par marche positive et  $a=0,42$  et  $b=1,36$  correspond au ressaut contrôlé par seuil mince .

### I.3.3.3. Position relative du seuil et de la marche positive :



**Figure 1.29:** Variation de la position de la marche en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .  
 (▲) Ressaut contrôlé par marche. (□) Ressaut contrôlé par seuil mince.  
 (x) Ressaut forcé de type A par marche positive.

Par ailleurs, la représentation graphique (Figure 1.29) de la fonction  $X = f(F_1)$ , relation liant les hauteurs relative du ressaut hydraulique et les nombres de Froude incidents a abouti à deux courbes uniques. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés non linéaire nous a montré que la fonction est une droite, donnée par la relation suivante :

$$X = aF_1 - b \quad (1.14)$$

Avec:  $0,031 \leq M \leq 0,094$  et  $2 < F_1 < 8$ :ou

$a=12,86$  et  $b = 6,84$  correspondent au ressaut contrôlé par marche positive,

$a=10,54$  et  $b=5,06$  correspondent au ressaut forcé par marche positive,

$a=12,91$  et  $b=2,52$  correspond au ressaut contrôlé par seuil mince.

### I.3.4. Rendement du ressaut hydraulique :

Le rendement  $\eta$  du ressaut est défini par le rapport de la perte de charge  $\Delta H$  qu'il occasionne à la charge totale dans sa section initiale :

$$\eta = \Delta H / H_1 \quad (1.15)$$

Avec :  $\Delta H = H_1 - H_2$

$H_1$  et  $H_2$  désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut. Celles-ci sont définies par les relations :

$$H_1 = h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \qquad H_2 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

En tenant compte de l'équation de continuité ( $Q=VA$ ), ces deux dernières relations s'écrivent :

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \qquad (1.16)$$

$$H_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \qquad (1.17)$$

Avec  $A_1 = bh_1 + mh_1^2$  et  $A_2 = bh_2 + mh_2^2$

Le nombre de Froude de l'écoulement incident dans un canal trapézoïdal est défini par la relation :

$$F_1^2 = \frac{Q^2 [b \times (1 + 2M)]}{g [bh_1 (1 + M)]^3} \qquad (1.13)$$

En tenant compte des relations précédentes, le rendement du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, s'écrit comme suit :

$$\eta = 1 - \frac{Yh + \frac{Q^2}{2g(bh_1 Y \times (1 + YM))^2}}{h_1 + \frac{Q^2}{2g(bh_1 \times (1 + M))^2}}$$

$$\frac{F_2^2}{F_1^2} = \frac{[(1 + 2YM)] [(1 + M)]^3}{[Y^3 (1 + YM)]^3 [(1 + 2M)]}$$

$$\eta = 1 - \frac{Yh_1 + F_1^2 \frac{(h_1)}{2Y^2} \left[ \frac{[(1 + M)^3]}{(1 + 2M) [(1 + YM)^2]} \right]}{h_1 + \frac{F_1^2 h_1 (1 + M)}{2(1 + 2M)}}$$

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \left[ \frac{(1 + M)^3}{(1 + 2M)(1 + MY)^2} \right]}{1 + \frac{F_1^2 (1 + M)}{2(1 + 2M)}} \qquad (1.18)$$

$Y = h_2/h_1$  étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.

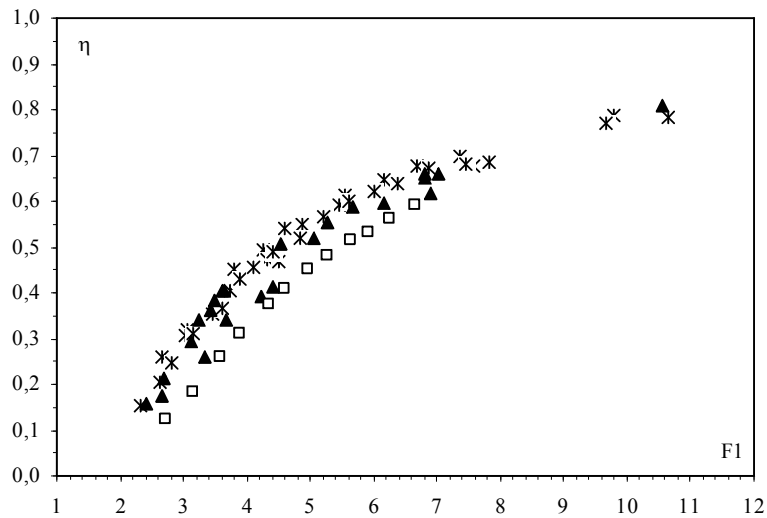


Figure 1.30: Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .  
 (▲) Ressaut contrôlé par marche. (□) Ressaut contrôlé par seuil mince.  
 (⋈) Ressaut forcé de type A par marche positive.

La figure 9 montre que les points de mesure du ressaut forcé de type A, par marche positive sont au-dessus de leurs homologues contrôlés pour une gamme de nombre de Froude incident  $2 < F_1 < 8$ . Cependant, pour les nombres de Froude  $F_1 > 8$ , tout les points de mesures se rejoignent pour former un seul nuage de points.

### I.3.5. Exemple d'application :

Un exemple d'application consisterait à déterminer les caractéristiques d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil et par marche positive, et forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal, connaissant le débit volumique  $Q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ ; la profondeur conjuguée amont du ressaut  $h_1 = 0,5 \text{ m}$ ; la cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal  $m = 0,311$ ; la largeur de fond de canal  $b = 1,7 \text{ m}$  et sachant que le rapport de forme  $M = mh_1/b$  doit être compris entre 0,031 et 0,094.

Nombre de Froude  $F_1$

$$F_1 = \left[ \frac{Q^2}{g} \left( \frac{(b + 2mh_1)}{(bh_1 + mh_1^2)^3} \right) \right]^{1/2} = 2,026$$

### **I.3.5.1. Ressaut contrôlé par seuil mince :**

- Rapport des hauteurs conjuguées Y

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = 1,21F_1 = 2,45 \quad \text{d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut est } h_2 = 1,23 \text{ m.}$$

- Hauteur relative du seuil

$$S = \frac{s}{h_1} = 0,41F_1^{1,358} = 1,07 \quad \text{d'où la hauteur du seuil } s = 0,53 \text{ m}$$

- Position relative du seuil

$$X = \frac{x}{h_1} = 12,914F_1 - 2,52 = 23,33 \quad \text{d'où } x = 11,81 \text{ m}$$

### **I.3.5.2. Ressaut contrôlé par marche positive :**

- Rapport des hauteurs conjuguées Y

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = 1,13F_1 = 2,289 \quad \text{d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut } h_2 = 1,14 \text{ m.}$$

- Hauteur relative de la marche positive

$$S = \frac{s}{h_1} = 0,224F_1^{1,57} = 0,68 \quad \text{d'où la hauteur du seuil } s = 0,34 \text{ m}$$

- Position relative de la marche positive

$$X = \frac{x}{h_1} = 12,874F_1 - 6,84 = 9,61$$

### **I.3.5.3. Ressaut forcé par marche positive :**

- Rapport des hauteurs conjuguées Y

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = 1,01F_1 = 2,046 \quad \text{d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut } h_2 = 1,023 \text{ m.}$$

- Hauteur relative de la marche positive

$$S = \frac{s}{h_1} = 0,164F_1^{1,064} = 0,35 \quad \text{d'où la hauteur du seuil } s = 0,17 \text{ m}$$

- Position relative de la marche positive

$$X = \frac{x}{h_1} = 10,55F_1 - 5,065 = 16,3 \quad \text{d'où } x = 8,15 \text{ m}$$

IL ressort de cet exemple d'application que pour le même nombre de Froude  $F_1$ , la profondeur conjuguée d'aval, la position de la marche et la hauteur du seuil sont plus réduites dans le ressaut forcé que leurs homologues contrôlés par seuils mince et marche positive.

**Tableau 1.12:** Mesures expérimentales ayant servi au traçage la figure 5.11.

<b>Ressaut hydraulique Contrôlé par marche positive</b>	
<b>F1</b>	<b><math>\eta</math></b>
4,87	0,96
5,56	0,97
6,17	0,98
6,70	0,98
7,35	0,99
7,57	0,99
9,78	0,99
9,66	0,99
4,58	0,95
5,46	0,97
3,79	0,91
4,27	0,94
4,33	0,95
4,52	0,96
5,61	0,97
6,02	0,98
6,36	0,98
6,86	0,98
7,44	0,99
7,81	0,99
3,07	0,87
3,75	0,93
3,88	0,93
4,10	0,94
4,42	0,95
4,84	0,96
5,22	0,97
2,66	0,79
3,04	0,86
3,14	0,88
3,47	0,91
3,60	0,92
2,32	0,75
2,62	0,82
2,82	0,85

<b>Ressaut hydraulique forcé type A par marche positive</b>	
<b>F1</b>	<b><math>\eta</math></b>
3,33	0,92
5,16	0,98
4,40	0,97
5,26	0,98
5,66	0,99
6,81	0,99
7,02	0,99
10,27	1,00
2,68	0,83
3,68	0,94
3,59	0,93
4,21	0,96
5,06	0,98
6,17	0,99
6,81	0,99
6,91	0,99
3,13	0,91
3,55	0,93
2,55	0,83
3,41	0,94
3,64	0,95
4,17	0,97
4,54	0,97
4,91	0,98
2,42	0,82
2,69	0,86
2,96	0,90
3,25	0,93
3,50	0,94
2,65	0,87
3,33	0,94
3,45	0,94
3,58	0,95
3,62	0,95
2,39	0,83
2,48	0,83
2,63	0,86
2,66	0,85
2,16	0,77
2,45	0,84
2,25	0,76
2,60	0,85
2,88	0,89
1,83	0,60



#### **I.4. Conclusion :**

Nous avons analysé expérimentalement, à travers ce chapitre, deux types de ressaut à savoir : le ressaut contrôlé par marche et le ressaut de type -A forcé par marche. En premier lieu, nous avons abordé la description du modèle et des essais, par la suite nous avons entamé la présentation de la procédure expérimentale, les caractéristiques des deux types de ressaut cités précédemment ont été, alors, étudiées expérimentalement l'analyse statistique des résultats expérimentaux a montré que la loi de type linéaire présente la meilleure loi qui suit la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.

Par la suite, l'analyse des résultats expérimentales a montré qu'il y a une relation entre le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées et la position relative  $X = x/h_1$  de la marche positive, cette relation est exprimée par une droite de la forme  $Y = aX + b$ . L'ajustement des données expérimentales de la fonction  $Y = f(X)$ , par la méthode des moindres carrés linéaires a abouti à une droite, qui est représentée par la relation  $Y = 0,0865X + 0,069$ .

Les résultats obtenus par notre étude expérimentale ont montré qu'il y a une relation entre la longueur relative  $\lambda_j = L_j/h_1$  du ressaut et le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés linéaires a montré que la fonction  $\lambda_j = L_j/h_1$  est une droite son équation est donnée par la relation

$$\lambda_j = 0,103F_1 + 0,204$$

En second lieu, nous avons entamé l'étude comparative entre le ressaut contrôlé par seuil mince, le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut forcé type A par marche positive. La représentation graphique montre que la fonction  $Y = f(F_1)$ , relation liant le rapport des hauteurs conjuguées  $Y = h_2/h_1$  du ressaut hydraulique et de nombre de Froude a abouti à trois courbes uniques. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés linéaires nous a montré que la fonction  $Y = f(F_1)$ , est une droite, qui est donnée par la relation  $Y = aF_1$  avec  $a = 1,21$  : ressaut contrôlé par seuil mince,  $a = 1,13$  : ressaut contrôlé par marche positive,  $a = 1,01$  : ressaut forcé par marche positive.

L'étude a abordé enfin, la variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, et ceci pour les trois configurations de ressauts étudiés, à savoir le ressaut contrôlé par seuil mince, le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut forcé de type A. L'étude a

montré que les points de mesures expérimentales du ressaut de type A, forcé par marche positive, se présentent légèrement au dessus de ceux contrôlés par marche positive. Par conséquent, l'effet de la dissipation de l'énergie, pour les deux configurations de ressaut, est quasi identique

## Chapitre II

### ETUDE THEORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE FORCÉ TYPE-A PAR MARCHÉ POSITIVE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL

#### II.1. Introduction :

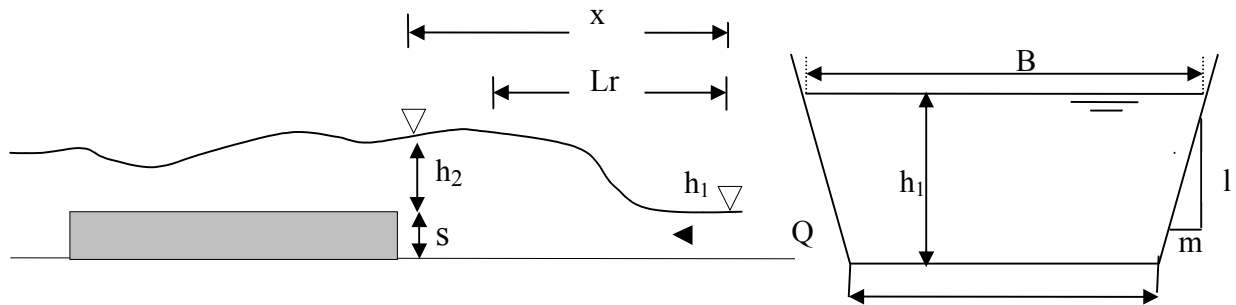
L'étude théorique du ressaut hydraulique de type -A forcé par marche positive évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale, montre que le phénomène de ce type de ressaut est régi par trois paramètres que l'on peut exprimer sous la forme d'une relation fonctionnelle

$f(F_1, Y, S) = 0$ , où  $F_1$  représente le nombre de Froude de l'écoulement incident dans la section du pied du ressaut,  $Y$  représente le rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  ( $h_1$  et  $h_2$  les hauteurs du ressaut respectivement à l'amont et à l'aval) et  $S=s/h_1$  est la hauteur relative de la marche positive ( $s$  la hauteur absolue de la marche).

L'objectif principal de cette étude est d'établir d'une manière pratique la relation fonctionnelle  $f(F_1, Y, S) = 0$ , en utilisant l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut. La relation établie devra faire l'objet d'une comparaison à celle obtenue pour le cas du ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal trapézoïdal en posant  $S = 0$ .

#### II.2. Equation de la quantité de mouvement :

Nous avons montré dans l'étude bibliographique que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. Dans notre cas, il s'agit d'appliquer l'équation de la quantité de mouvement pour un ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive évoluant dans un canal de section trapézoïdal comme le montre la (Figure 2.1). La section transversale de la marche est donc de forme trapézoïdale caractérisée par sa hauteur  $s$ . La face latérale de la marche forme donc un obstacle constituant le siège d'une réaction opposée au sens de l'écoulement. Celle-ci résulte de la pression agissante sur la face latérale de la marche. Cette pression sera étudiée en tant qu'une pression agissante sur une surface plane verticale de forme géométrique trapézoïdale. La réaction créée par la présence de la marche donnera une force de pression  $F_s$  appliquée au centre de gravité. Cette force sera ajoutée aux forces extérieures assurant l'équilibre entre les sections amont et aval du ressaut lors de l'application de l'équation de la quantité de mouvement.



**Figure 2.1 :** Ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal.

L'équation de la quantité de mouvement sera appliquée en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- La distribution des pressions sur les sections amont et aval du ressaut est supposée hydrostatique ;
- La vitesse au niveau des deux sections du ressaut est supposée uniforme ;
- la résistance de l'air est négligée ;
- les pertes de charges par frottement sont négligées.

Tenant compte de toutes ces considérations, l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre les sections 1-1 et 2-2 s'écrit :

$$\rho Q \vec{V}_1 - \rho Q \vec{V}_2 = \Sigma \vec{F}_{ext} \quad (2.1)$$

$\Sigma \vec{F}_{ext}$  : représente la somme des forces extérieures. Ces forces sont :

- la force  $F_1$  appliquée à la section 1-1.
- la force  $F_2$  appliquée au dessus de la marche à la section 2-2.
- la réaction  $F_s$  engendrée par la présence de la marche à la section 2-2.

Par conséquent la relation (2.1) s'écrit :

$$\rho Q V_1 + F_1 = \rho Q V_2 + F_2 + F_s \quad (2.2)$$

Les forces de pression  $F_1$  et  $F_2$  ainsi que la force de réaction  $F_s$  peuvent être exprimées, en appliquant les lois de l'hydrostatique :  $F_1 = \omega \bar{h}_1 A_1$ ,  $F_2 = \omega \bar{h}_2 A_2$  et  $F_s = \omega \bar{s} A_s$ .

Où :  $\omega$  représente le poids volumique du liquide en écoulement,  $\bar{h}_1$ ,  $\bar{h}_2$  et  $\bar{s}$  représentent respectivement la distance entre le centre de gravité de la section transversale 1-1, 2-2 et s et la face

supérieure de l'écoulement (surface libre de l'écoulement) et  $A_1, A_2$  ou  $A_s$  est l'aire de la section mouillée 1, 2 ou s.

En remplaçant les expressions de  $F_1, F_2$  et  $F_s$  dans la relation (8.2), on obtient :

$$\rho QV_1 + \omega \bar{h}_1 A_1 = \rho QV_2 + \omega \bar{h}_2 A_2 + \omega \bar{s} A_s \quad (2.3)$$

En faisant appel à l'équation de continuité, la vitesse moyenne de l'écoulement s'écrit, en fonction du débit volume  $Q$  et de l'aire de la section mouillée  $A$  :  $V = Q/A$ . Ainsi, les vitesses moyennes de l'écoulement  $V_1$  et  $V_2$  respectivement aux sections amont et aval du ressaut s'expriment :  $V_1 = Q/A_1$  et  $V_2 = Q/A_2$ . En tenant compte de ces dernières considérations et sachant que  $\omega = \rho g$ , la relation (1.3) peut s'écrire, en divisant tout ses membres par  $\rho g$  :

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{h}_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{h}_2 A_2 + \bar{s} A_s \quad (2.4)$$

On peut déterminer aisément les expressions de  $A_1, A_2, A_s, \bar{h}_1, \bar{h}_2$  et  $\bar{s}$  en se basant sur la figure 2.2.

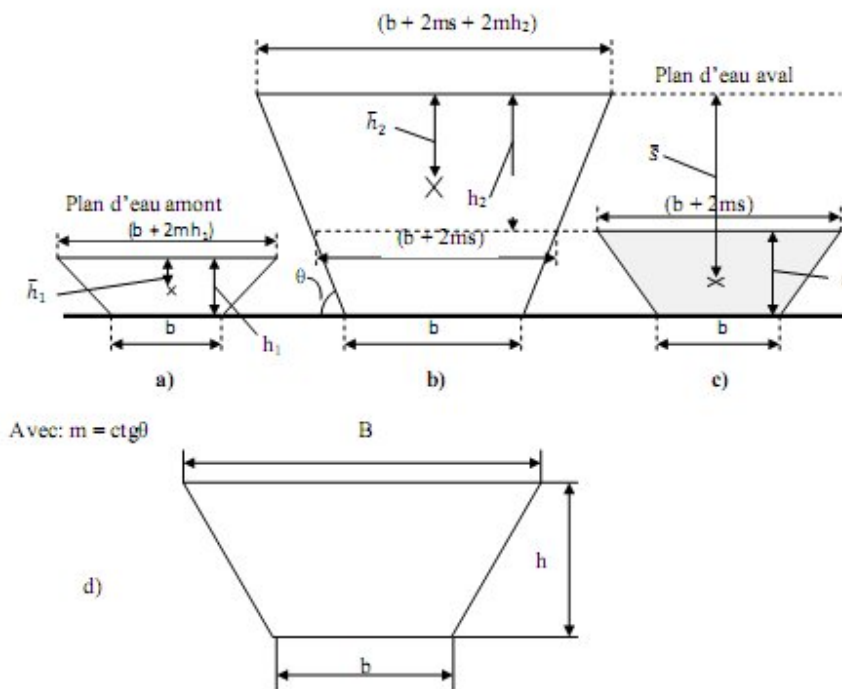


Figure 2.2 : Représentation géométrique des paramètres  $\bar{h}_1, \bar{h}_2$  et  $\bar{s}$ .

La figure 2.2 montre la section au pied du ressaut. Cette section est caractérisée par sa première hauteur conjuguée  $h_1$  et le paramètre  $m$  défini comme la cotangente de l'angle  $\theta$ . L'angle  $\theta$  représente l'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal. Ainsi, l'aire des sections mouillées et les positions des centres de gravites s'écrivent respectivement :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = bh_1 + mh_1^2 \\ A_2 = bh_2 + mh_2^2 \\ A_s = bs + ms^2 \end{array} \right. \quad (2.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6} \left( \frac{3b + 2mh_1}{A_1} \right) \\ \bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6} \left( \frac{3b + 6ms + 2mh_1}{A_2} \right) \\ \bar{s} = h_2 + \frac{s^2}{6} \left( \frac{3b + 2ms}{A_s} \right) \end{array} \right. \quad (2.6)$$

$$M = \frac{mh_1}{b} \quad Y = \frac{h_2}{h_1} \quad S = \frac{s}{h_1}$$

Le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement dans les sections s'exprime par les relations (2.7) :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = \omega \bar{h}_1 A_1 \\ F_2 = \omega \bar{h}_2 A_2 \\ F_s = \bar{s}_1 \omega A_s \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Equation de la Quantité de mouvement

$$\rho QV_1 + \omega \bar{h}_1 A_1 = \rho QV_2 + \omega \bar{h}_2 A_2 + \omega \bar{s} A_s$$

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{h}_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{h}_2 A_2 + \bar{s} A_s$$

Un autre paramètre qui servira de base a notre étude théorique est le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident a la section initiale 1-1- c'est a dire au pied du ressaut ce nombre s'exprime en règle générale par le relation

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial h_1} \quad (2.8)$$

La relation (2.8) montre que le nombre de Froude  $F_1$  est une fonction de quatre paramètres tels que :

- Q représente le débit volume de l'écoulement ;
- g est l'accélération de la pesanteur ;
- $A_1$  est l'aire de la section mouillée au pied du ressaut ;
- $\frac{\partial A_1}{\partial h_1}$  représente la dérivée partielle de l'aire de la section mouillée  $A_1$  au pied du ressaut par

rapport à la première hauteur conjuguée  $h_1$ . L'étude montre que cette dérivée représente la largeur du plan d'eau quelque soit la forme géométrique du profil liquide en écoulement.

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{g} \left( \frac{(b + 2mh_1)}{(bh_1 + mh_1^2)^3} \right) \quad (2.9)$$

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

En tenant compte des relations (2.4)

En remplace chaque paramètre par sa valeur dans l'équation (2.4)(2.5) (2.6) (2.7) (2.8), la relation (2.3) devient

$$\begin{aligned} \frac{(bh_1 + mh_1^2)^3}{(b + 2mh_1)} F_1^2 \frac{1}{(bh_1 + mh_1^2)} + \frac{h_1^2}{6} \left( \frac{3b + 2mh_1}{A_1} \right) A_1 &= \frac{(bh_1 + mh_1^2)^3}{(b + 2mh_1)} F_1^2 \frac{1}{(bh_1 + 2mh_1s + mh_1^2)} + \frac{h_1^2}{6} \left( \frac{3b + 6ms + 2mh_1}{A_2} \right) A_2 + \left[ h_2 + \frac{s^2}{6} \left( \frac{3b + 2ms}{A_3} \right) \right] A_3 \\ \frac{(bh_1 + mh_1^2)^2}{(b + 2mh_1)} F_1^2 + \frac{h_1^2}{6} (3b + 2mh_1) &= \frac{(bh_1 + mh_1^2)^3}{(b + 2mh_1^2)} F_1^2 \frac{1}{(bh_2 + 2mh_2s + mh_2^2)} + \frac{h_1^2}{6} (3b + 6ms + 2mh_1) + h_2 (bs + ms^2) + \frac{s^2}{6} (3b + 2ms) \\ \frac{b^2 h_1^2 (1 + \frac{mh_1}{b})^2}{b(1 + 2mh_1^2)} F_1^2 + \frac{h_1^2}{6} b \left( 3 + \frac{2mh_1}{b} \right) &= \frac{b^3 h_1^3 (1 + \frac{mh_1}{b})^3}{b(1 + \frac{2mh_1}{b}) bh_2 (1 + \frac{2ms}{b} + \frac{mh_2}{b})} F_1^2 + \frac{h_1^2 b}{6} \left( 3 + \frac{6ms}{b} + \frac{2mh_1}{b} \right) + h_2 bs \left( 1 + \frac{ms}{b} \right) + \frac{s^2 b}{6} \left( 3 + \frac{2ms}{b} \right) \end{aligned}$$

On remplace les termes paramètre par sa valeur dans l'équation

$$M = \frac{mh_1}{b} \quad Y = \frac{h_2}{h_1} \quad S = \frac{s}{h_1}$$

$$F_1^2 \left[ 1 - \frac{1 + M}{Y(1 + 2MS + MY)} \right] = \frac{(1 + 2M)}{2(1 + M)^2} \left[ Y^2 (1 + 2MS + \frac{2}{3} MY) + 2SY (1 + MS) + S^2 (1 + \frac{2}{3} MS) - (1 + \frac{2}{3} M) \right] \quad (2.12)$$

L'application de l'équation de la quantité de mouvement entre deux sections délimitants un ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive et évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale mène à écrire la relation (2.12) ; cette relation montre que ce type de ressaut est régi par :

- le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident à la section amont du ressaut ;

- les hauteurs conjuguées  $h_1$  et  $h_2$  respectivement à l'amont et à l'aval du ressaut ;
- la hauteur de la marche positive  $s$ .

### II.3. Analyse dimensionnelle :

L'utilisation de la relation (2.12) pour la détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal n'est pas pratique en raison, d'une part de son caractère implicite vis-à-vis de  $h_2$  et  $s$ , d'autre part, et surtout, de son caractère dimensionnel. Pour cela, on préconise d'utiliser des rapports adimensionnels pour rendre la relation (2.12) plus générale. Le principe de l'analyse dimensionnelle devient plus clair et plus justifié lorsqu'il s'agit de déterminer les caractéristiques du ressaut hydraulique par voie expérimentale sur des modèles physiques réduits, où des rapports adimensionnels doit être fournis pour pouvoir dimensionner les bassins d'amortissement. Pour la présente étude, ces rapports adimensionnels sont le rapport des hauteurs conjuguées  $Y=h_2/h_1$  et la hauteur relative ( $S= s/h_1$ ) de la marche positive. Tenant compte de ces considérations, la relation (2.12) s'écrit :

$$F_1^2 \left[ 1 - \frac{1+M}{Y(1+2MS+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[ Y^2(1+2MS + \frac{2}{3}MY) + 2SY(1+MS) + S^2(1 + \frac{2}{3}MS) - (1 + \frac{2}{3}M) \right] \quad (2.12)$$

La relation (2.12) exprime le nombre de Froude  $F_1$  en fonction du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  et de la hauteur relative  $S$  de la marche positive pour le cas du ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive, évoluant dans un canal de section trapézoïdal .

Connaissant le rapport  $S$ , cette relation est proposée pour l'évaluation du rapport  $Y$  et par conséquent la hauteur  $h_2$ .

L'approche théorique proposée pour le cas du ressaut classique montre que le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident dépend exclusivement du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  en appliquant toujours l'équation de la quantité de mouvement.

En remplaçant  $S = 0$  dans la relation (2.12), on obtient :

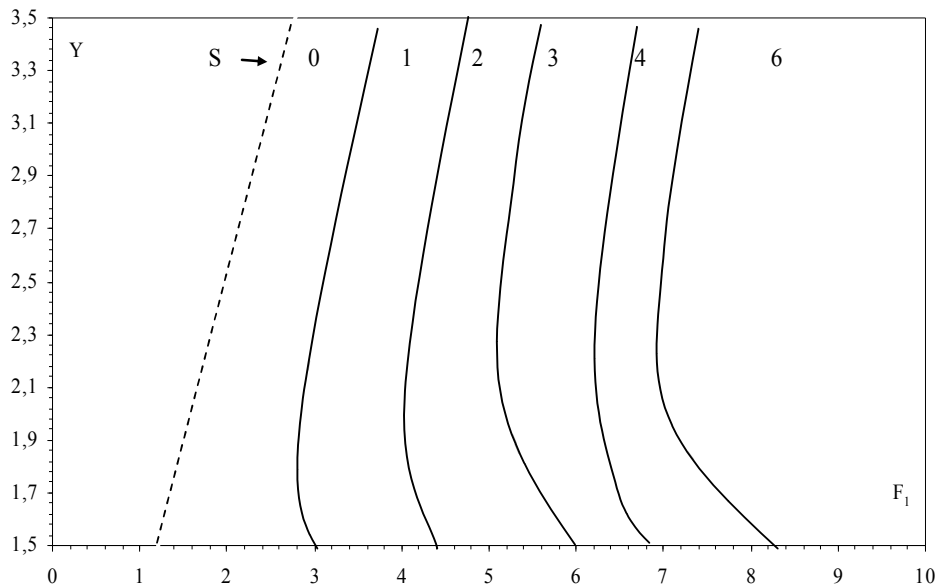
$$F_1^2 = \frac{\frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[ Y^2(1+2MS + \frac{2}{3}MY) + 2SY(1+MS) + S^2(1 + \frac{2}{3}MS) - (1 + \frac{2}{3}M) \right]}{\left[ 1 - \frac{1+M}{Y(1+2MS+MY)} \right]} \quad (2.13)$$

La relation (2.12) mène donc à la relation (2.13) exprimant les caractéristiques du ressaut classique dans un canal trapézoïdal.

### II.3. Effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique foré de type A :



La figure 2.3 montre la représentation graphique de la variation du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  en fonction du nombre Froude  $F_1$  sur un système d'axe à division cartésienne, selon la relation (2.12). Rappelons que  $S=0$  représente le cas du ressaut classique évoluant dans un canal trapézoïdal et la courbe correspondante est tracée selon la relation (2.13)

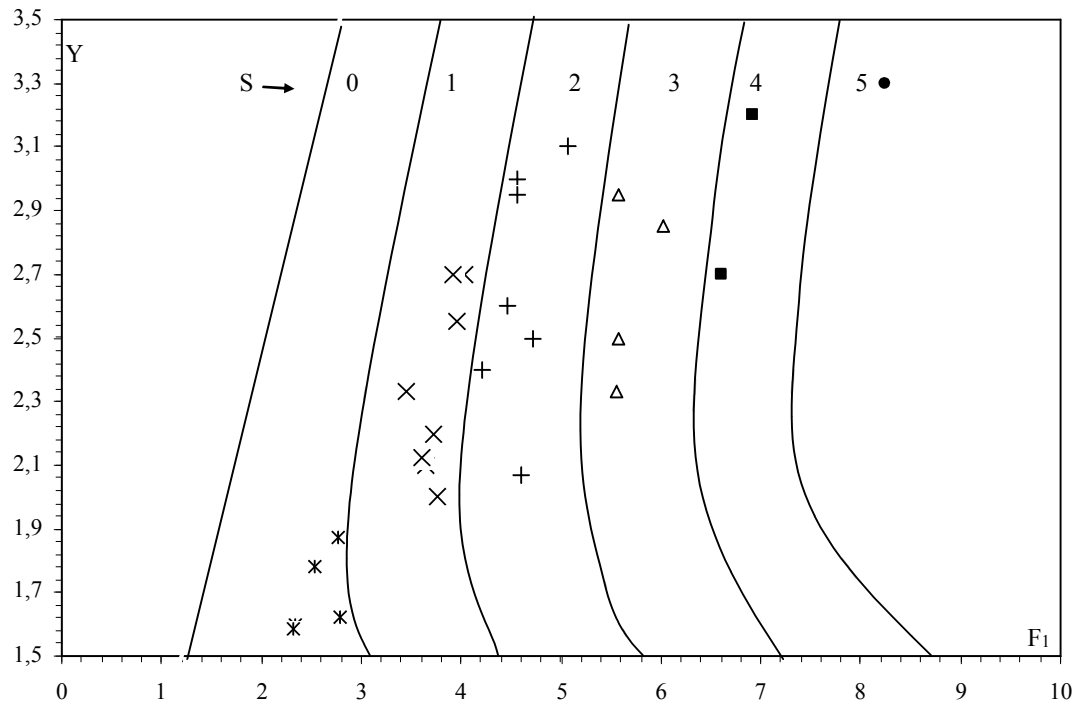


**Figure 2.3 :** variation de  $Y$  en fonction de  $F_1$  selon la relation (2.12) le ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive pour efférentes  $S$  (—) courbe correspondant au ressaut classique dans un canal trapézoïdal ( $S=0$ ), selon la relation (2.13). (----) Courbe limite théorique d'apparition du ressaut.

La courbe correspondant à  $S=1,2,3,4$  et  $5$  sont tracées selon la relation (2.12) du ressaut hydraulique forcé de type A, évoluant dans un canal trapézoïdal. La courbe en pointillé représente le ressaut hydraulique classique, évoluant dans un canal trapézoïdal.

La figure 2.3 indique clairement que plus la hauteur relative  $S$  de la marche positive augmente plus le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées diminue, pour un nombre de Froude  $F_1$  fixe.

La figure 2.4 représente la distribution des points expérimentaux autour des courbes théorique tracées selon la relation (2.12). On peut donc, remarquer que les points expérimentaux sont situés, dans leur majorité dans les intervalles théorique des hauteurs relative  $S$  des marches positives.



**Figure 2.4 :** variation de  $Y$  en fonction de  $F_1$  selon la relation (2.12) le ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive pour efférentes  $S(\underline{\quad})$  courbe correspondant au ressaut classique dans un canal trapézoïdal ( $S=0$ ), selon la relation (2.13). (-----) Courbe limite théorique d'apparition du ressaut

## II.4. Comparaison entre la relation théorique et les résultats expérimentaux :

### II.4.1. Ecart relatif entre le nombre de Froude issu de la relation universelle avec celui issu de la relation théorique :

Les écarts relatifs entre les nombres de Froude expérimentaux  $F_{1\text{exp}}$  et le nombre de Froude Théorique  $F_{1\text{thé}}$  sont calculés afin d'examiner la validité de la relation théorique générale (2.12) issue de notre développement théorique. Les valeurs de  $F_{1\text{exp}}$  sont calculées par la relation (2.9) en se basant sur les données expérimentales. Les valeurs de  $F_{1\text{thé}}$  sont calculées par la relation (2.12) en se basant sur ces mêmes données expérimentales qui ont été déjà exposées dans l'étude expérimentale.

**Tableau 2.1** : valeurs  $Y$  et  $S$  expérimentale ayant servi au calcul de  $F_{lthe}$  théorique selon la relation (2.12)

<b>Y</b>	<b>S</b>	<b>F<sub>lthe</sub></b>
4,50	1,80	3,80
5,30	2,35	4,25
5,90	2,80	4,72
6,20	3,25	4,96
6,60	3,75	5,28
7,70	4,50	6,17
8,30	5,00	6,66
9,35	5,80	7,54
4,35	1,80	3,51
4,75	2,35	3,82
5,30	2,80	4,25
5,65	3,25	4,52
6,25	3,75	5,00
7,70	4,50	6,17
8,00	5,00	6,42
9,10	5,80	7,33
10,15	6,35	8,22
3,80	1,80	3,09
5,35	2,35	4,29
3,40	1,20	2,82
3,90	1,57	3,21
4,07	1,87	3,34
4,60	2,17	3,77
5,10	2,50	4,18
5,80	3,00	4,75
2,90	0,90	2,45
3,20	1,18	2,69
3,38	1,40	2,83
3,65	1,63	3,05
3,90	1,88	3,26
2,78	0,90	2,35
3,08	1,18	2,59
3,38	1,40	2,83
3,68	1,63	3,07
4,00	1,88	3,34
2,50	0,72	2,15
2,94	0,94	2,51
3,02	1,12	2,57
3,34	1,30	2,83
2,12	0,72	1,84
2,56	0,94	2,20
2,82	1,12	2,41
3,10	1,30	2,64
3,48	1,50	2,95
2,18	0,60	1,91

Le tableau 2.1 montre les données expérimentales ayant servi au calcul du nombre de Froude théorique  $F_{1the}$  en se basant sur la relation (2.12). ces données expérimentales sont : le rapport des hauteurs conjuguées Y et les hauteurs relative S des marches positive

**Tableau 2.2** : écarts relatifs en (%) entre  $F_{1exp}$  expérimental  $F_{1the}$  théorique

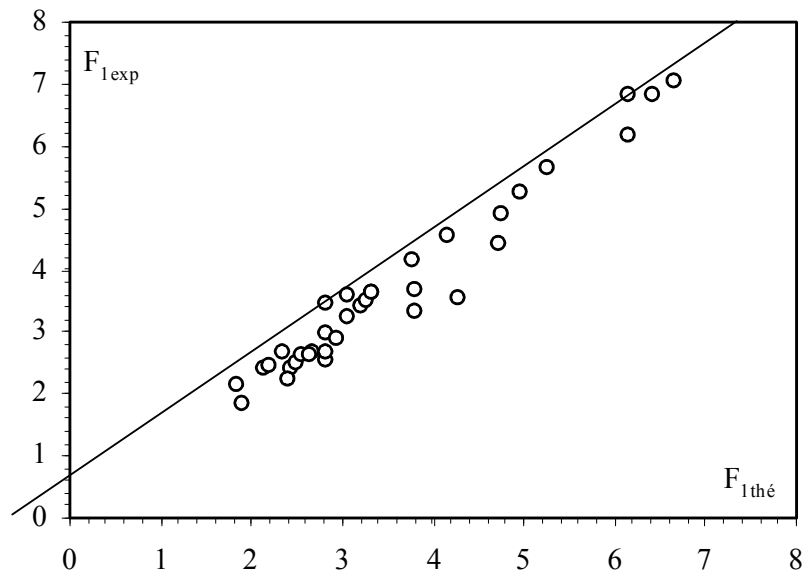
$F_{1exp}$	$F_{1the}$	$(F_{1exp} - F_{1the}) / F_{1exp}(\%)$
5,26	4,96	5,73
5,66	5,28	6,72
6,81	6,17	9,35
7,02	6,66	5,10
6,17	6,17	0,03
6,81	6,42	5,71
3,41	3,21	5,97
3,64	3,34	8,21
4,17	3,77	9,60
4,54	4,18	7,93
4,91	4,75	3,19
2,96	2,83	4,49
3,25	3,05	5,98
3,50	3,26	6,84
2,65	2,35	11,22
3,45	2,83	18,12
3,58	3,07	14,22
3,62	3,34	7,86
2,39	2,15	10,14
2,63	2,57	2,39
2,16	1,84	14,57
2,45	2,20	10,42

D'après les résultats regroupés dans le tableau 2.2, on remarque que certains écarts relatifs entre les valeurs théorique et expérimentales du nombre de Froude sont assez élevés.

Ce décalage est attribué en grande partie à la négligence de la perte de charge singulière due à l'élargissement du canal à l'extrémité amont de la marche de la marche théorique (2.12) par les mesures expérimentales.

#### II.4.2. Correction de la relation théorique par les mesures expérimentales :

La figure 2.5 représente graphiquement la variation de nombre de Froude expérimentaux  $F_{1\text{exp}}$  en fonction de ceux théoriques  $F_{1\text{thé}}$ , montre que les points obtenus se répartissent de manière quasi uniforme autour de la première bissectrice.



**Figure 2.5 :** représente graphique des nombres de Froude expérimentaux ( $F_{1\text{exp}}$ ) et théorique ( $F_{1\text{thé}}$ ), (—) première bissectrice

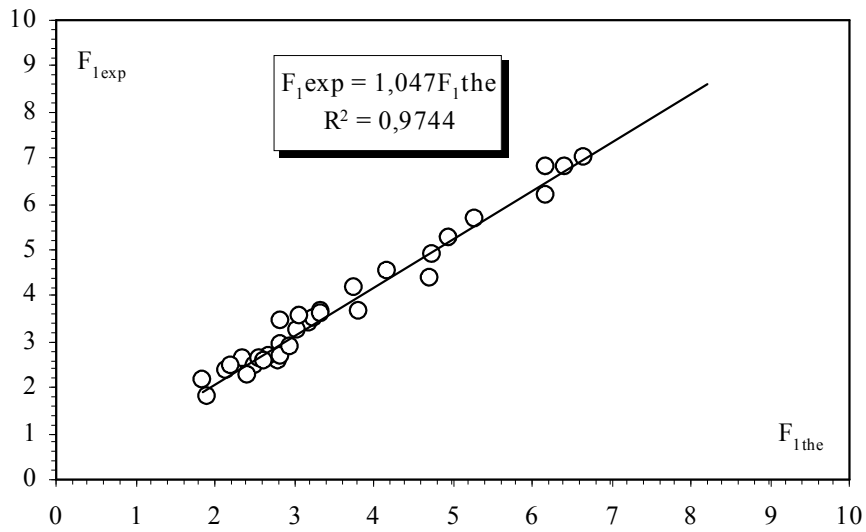
Pour palier à cet écart, nous proposons un ajustement de la relation théorique par la méthode des moindres carrées linéaires, en se basant sur les résultats expérimentaux.

La figure 2.6, montre un ajustement du nuage de point liant le nombre de Froude expérimental et celui théorique. La relation obtenue est une droite passant par l'origine de pente égale à 1,047

$$F_{1\text{exp}} = 1,047 F_{1\text{thé}} \quad (2.14)$$

La relation théorique (2.12) devient après la correction

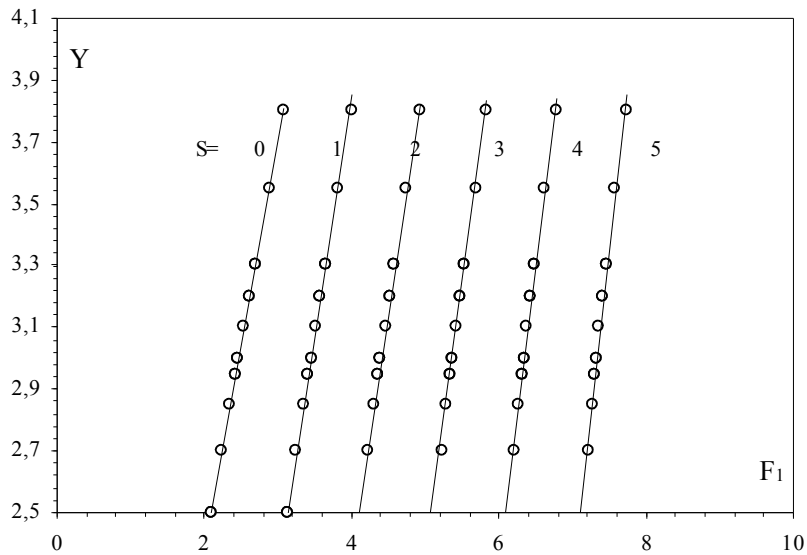
$$F_1^2 = 1,09 \frac{\frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[ Y^2(1+2MS + \frac{2}{3}MY) + 2SY(1+MS) + S^2(1 + \frac{2}{3}MS) - (1 + \frac{2}{3}M) \right]}{\left[ 1 - \frac{1+M}{Y(1+2MS+MY)} \right]} \quad (2.15)$$



**Figure 2.6:** représente graphique des nombres de Froude expérimentaux ( $F_{1exp}$ ) et théorique ( $F_{1 thé}$ ). (—) première bissectrice

### II.5. Ajustement de la relation théorique :

L'analyse de la figure 2.7 montre, que les courbes situées au dessus de la courbe limite ( $Y > 0$ ) sont relativement linéaires et peuvent être remplacées, par des droites comme il montre la figure 2.7



**Figure 2.7 :** variation de  $Y$  en fonction de  $F_1$  (○○○) courbe théorique selon la relation (2.12) (—) droit d'ajustement.

Les droites représentées dans la figure 2.4 sont de type linéaire et suivent la forme suivante

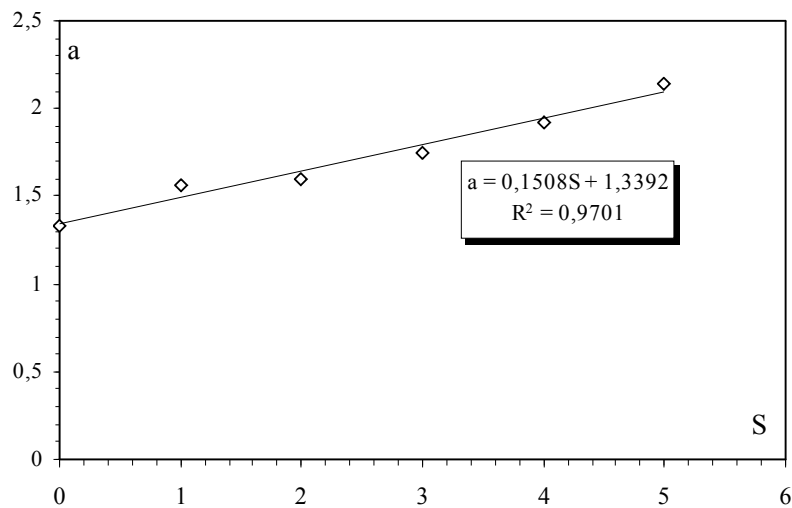
$$Y = aF_1 - b \quad (2.16)$$

Les paramètres (a et b) varient en fonction de la hauteur relative de la marche positive selon le tableau 2.3

**Tableau 2.3 :** valeur des paramètres (a et b) de la relation (2.16)

S	a	b
0	1,33	0,21
1	1,56	2,41
2	1,59	4,02
3	1,75	6,37
4	1,92	9,20
5	2,14	12,68

La figure 2.8 montre la variation de paramètre (a) en fonction de la hauteur relative S de la marche positive



**Figure 2.8 :** variation de (a) en fonction de la hauteur relative de la marche positive S

$$a = 0,150 S + 1,339 ; \quad R^2 = 0,9701 \quad (2.17)$$

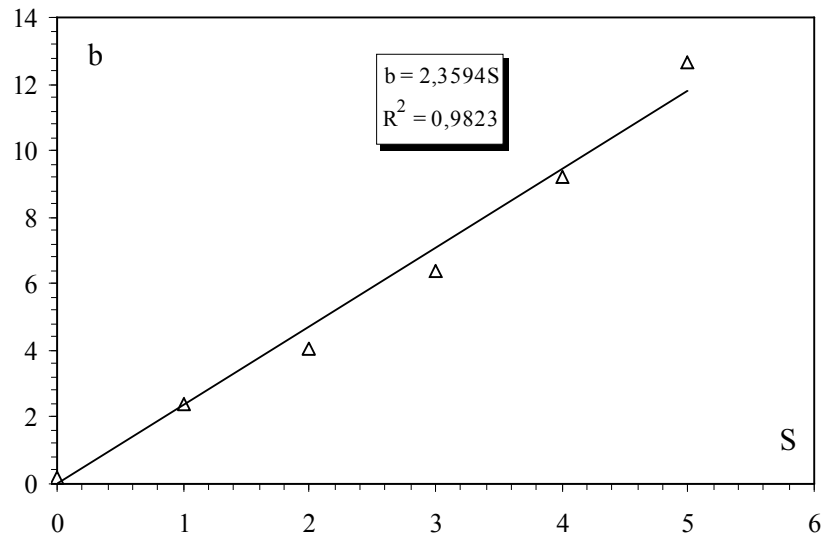


Figure 2.9 : variation de (b) en fonction de la hauteur relative de la marche positive S

$$b = 2,359S ; \quad R^2 = 0,982 \quad (2.18)$$

En remplaçant les paramètres a et b par leurs expressions respectives on obtient la relation générale suivante :

$$Y = (0,18S + 1,216) F_1 - 2,359S \quad (2.19)$$

$$\text{Avec } 2 < F_1 < 8 ; \quad 00 \leq S \leq 5$$

## II.6. Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons présenté un développement théorique pour établir la relation entre les caractéristiques  $F_1, Y$  et  $S$  d'un ressaut hydraulique de types A, forcé par marche positive et évoluant dans un canal trapézoïdal. Ce développement nous a mené à proposer une relation théorique (relation 2.12). Cette relation a été établie en se basant sur l'équation de quantité de mouvement ente ses sections initiale et finale.



## CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

Cette troisième partie et la dernière partie de notre étude qui concerne notre contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé et de type A, forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal, par voie expérimentale et par voie théorique relative au ressaut hydraulique forcé de type A.

Cette étude a pour objectif d'analyser et de déterminer les caractéristiques intervenant dans le phénomène de ressaut hydraulique, cette partie est divisée en deux chapitres.

Le premier chapitre abordera l'étude expérimentale des deux types de ressaut cités ci-dessus, tandis que le dernier chapitre s'intéressera à l'étude théorique du ressaut hydraulique forcé de type A.

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive dans canal trapézoïdal, dix marches positives ont été testées :  $s$  (mm) = 3,6 ; 4,7 ; 5,6 ; 6,5 ; 7,5 ; 9 ; 10 ; 11,6 ; 12,7 ; 13,9. L'expérimentation a été menée sous cinq hauteurs initiales de l'écoulement :  $h_1$ (mm) = 20; 30; 40; 50; 60; Une large gamme du nombre de Froude Incident a été ainsi obtenue, correspondant Avec:  $0,031 \leq M \leq 0,094$  et  $2 < F_1 < 8$ . La formation du ressaut contrôlé et forcé est conditionne par la mise en place d'une marche positive.

Dans un premier temps notre étude sera consacré à l'analyse expérimentale des deux types de ressaut, à savoir le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut de type -A, forcé par marche positive.

- L'étude a permis l'analyse expérimentale de trois types de ressauts à savoir : le ressaut contrôlé par seuil mince, ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut forcé type A. En effet, il a été trouvé, pour les trois configurations de ressaut, des relations empiriques permettant le dimensionnement du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal. Une étude comparative a été effectuée entre ces trois types de ressaut et il ressort que pour le même nombre de Froude  $F_1$ , la profondeur conjuguée d'aval, la position de la marche et la hauteur du seuil sont plus réduites dans le ressaut forcé de type A que pour leurs homologues contrôlés par marche positive et par seuil mince. L'étude a abordé ensuite, la variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, et ceci pour les trois configurations de ressauts étudiées. L'étude a montré que les points de mesures expérimentales du ressaut de

type A forcé par marche positive, se présentent légèrement au dessus de ceux contrôlés par marche positive. Par conséquent, l'effet de la dissipation de l'énergie, pour les trois configurations de ressaut, est quasi identique.

Cette étude aura pour objectif de déterminer l'effet de la marche positive sur la variation de  $Y$  en fonction de  $F_1$  est de type linéaire. La droite obtenue passe par l'origine et elle est donnée par la relation :  $Y=aF_1$ , par suite la comparaison entre les trois types de ressaut hydraulique montre que la variation de paramètre ' a ' comme suit

$a= 1,21$  : ressaut contrôlé par seuil mince

$a= 1,13$  : ressaut contrôlé par marche positive

$a= 1,01$  : ressaut forcé par marche positive

Dans le second temps, nous avons analysé le rendement en fonction de nombre de Froude, pour le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal à marche positive montre que les points de mesure du ressaut forcé de type A par marche positive sont au-dessus de celui contrôlé par marche pour une gamme de nombre de Froude incident  $2 < F < 8$  par contre pour des nombre de Froude  $F_1 > 8$ , tout les points de mesures se rejoignent pour former un seul nuage de points.

- Le deuxième chapitre de cette partie s'est intéressé à l'étude théorique du ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal.

Cette étude est d'établir d'une manière pratique sur la relation fonctionnelle  $f(F_1, Y, S) = 0$ , où  $F_1$  représente le nombre de Froude de l'écoulement incident dans la section du pied du ressaut,  $Y$  représente le rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  ( $h_1$  et  $h_2$  les hauteurs du ressaut respectivement à l'amont et à l'aval) et  $S=s/h_1$  est la hauteur relative de la marche positive ( $s$  la hauteur absolue de la marche).

D'après les résultats expérimentaux, on remarque que certains écarts relatifs entre les valeurs théoriques et expérimentales du nombre de Froude sont assez élevés.

Ce décalage est attribué en grande partie à la négligence de la perte de charge singulière due à l'élargissement du canal à l'extrémité amont de la marche théorique (2.12) par les mesures expérimentales.

Pour palier à cet écart, nous proposons un ajustement de la relation théorique par la méthode des moindres carrés linéaires, en se basant sur les résultats expérimentaux qui montrent un

ajustement du nuage de point liant le nombre de Froude expérimental et celui théorique. La relation obtenue est une droite passant par l'origine de pente égale à 1,047.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

La présente étude s'intéresse à l'analyser expérimentalement et théoriquement deux types de ressaut hydraulique, à savoir, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal trapézoïdal à pente variable et le ressaut hydraulique contrôlé et forcé de type-A par marche positive, évoluant dans un canal de section droite trapézoïdal à angle d'inclinaison de talus de  $73^\circ$ . Trois grandes parties ont été nécessaires : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine, une deuxième partie qui a concerné notre propre contribution à l'étude du ressaut contrôlé par seuil dans canal trapézoïdal à pente variable et une troisième partie qui s'est intéressée à l'analyse théorique et expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal.

➤ La première partie a concerné trois chapitres :

✓ Le premier chapitre de cette étude a eu pour objectif de passer en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. La détermination des caractéristiques du ressaut a été souvent l'objectif principal des travaux entrepris par Posey et Hsing (1938), Silvester (1964), Ohtsu (1976), et plus récemment ceux de Hager et Wanoschek (1989). Il a été constaté que le ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal, n'a connu que très peu d'études. Le second chapitre de cette partie bibliographique s'est intéressé au ressaut hydraulique évoluant dans les canaux inclinés. En effet, le ressaut hydraulique 'incliné', à pente positive, par rapport à l'horizontal a été abordé en premier lieu par Bakhmeteff et Matzke (1938), qui ont évoqué dans leurs études le profil de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. En outre, Kindsvater (1944) a classifié les ressauts inclinés à pente positive en quatre principaux types; type A, type B, type C et type D. En outre, il a proposé une approche pour le rapport des hauteurs conjuguées pour le ressaut de type C.

Par ailleurs, Mc Corcodal et al (1994), ont abordé le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente négative, où il a été étudié le cas limite d'existence du ressaut. Une relation théorique a été proposée pour le type D. Les auteurs confirment, en outre, que ce type de ressaut est très sensible à la variation des profondeurs conjuguées pour des nombres de Froude  $F_1 < 4$ .

L'étude bibliographique a abordé le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente positive, où il a été exposé les études de DEBABECHE et al (2009), qui ont eu trait à l'analyse, théorique et

expérimentale, du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. Une relation générale liant le rapport des profondeurs conjuguées  $Y$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et de l'angle d'inclinaison du canal  $\alpha$  a été trouvée. L'expérimentation a eu pour objectif, en outre d'évaluer les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique à savoir la longueur du ressaut et la longueur du rouleau de surface, où il a été montré que l'inclinaison du canal, n'a pas d'influence sur les relations  $\lambda(F_1)$  et  $\lambda_r(F_1)$ .

✓ Le dernier chapitre de la partie bibliographique a traité le ressaut contrôlé et force par marche positive. Dans ce volet, nous avons abordé, en premier lieu ; les travaux de Hager et Bretz (1987) qui montrent, entre autres, que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude  $F_1$ .

Nous avons examiné par la suite le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive évoluant dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de  $90^\circ$ . Cette étude a été effectuée par Debabeche et *al.* (2008), qui a été consacré à l'expérimentation de l'influence de la marche positive sur le ressaut hydraulique.

➤ La deuxième partie a abordé deux chapitres relatifs à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale à pente positive variable.

✓ Il a été montré au premier chapitre qu'il existe un effet significatif de la pente du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique, à savoir la hauteur  $s$  du seuil, la longueur  $L_j$  du ressaut, la longueur  $L_r$  du rouleau. En effet, l'étude expérimentale a montré que la variation du rapport  $S$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire. Dans un second temps l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique. Il a été montré que l'inclinaison du canal, n'a pas d'influence sur les relations  $\lambda(F_1)$  et  $\lambda_r(F_1)$ . En outre, l'analyse statistique des mesures expérimentales a montré que les deux relations suivent une loi de type linéaire. Aussi, l'étude expérimentale s'est intéressée à la dissipation d'énergie cinétique. En effet, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que la pente du canal ne favorise pas la dissipation de l'énergie.

✓ La deuxième chapitre a été consacré en premier lieu à un développement théorique exprimant la relation fonctionnelle  $f(F_1, Y, \lambda, M, \alpha)=0$ . Cette approche a mené à l'établissement d'une relation semi-théorique. Ceci a été rendu possible par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections aval et amont du ressaut hydraulique. En second lieu une analyse

expérimentale de la relation semi-théorique a été établie. En effet, les mesures expérimentales ont permis d'estimer le coefficient de correction  $k$ . Une valeur moyenne constante  $k=1,03$  a été trouvée, pour les quatre pentes étudiées. Les écarts relatifs entre le nombre de Froude théorique et son homologue expérimental étant en leurs majorités inférieures à 4%, permettant de conclure à la fiabilité de la relation théorique obtenue. Une relation approchée explicite en  $Y$  a été proposée, permettant la détermination du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du canal.

La troisième partie a concerné l'analyse théorique et expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal. Celle-ci a été divisée en deux chapitres :

✓ Le premier chapitre a été consacré à la description du modèle expérimental, utilisé. Il a été décrit en détail l'appareillage utilisé pour les essais. Ceci a été étayé par des illustrations.

A travers l'analyse expérimentale des résultats obtenus, nous avons proposé des relations fonctionnelles régissant le ressaut hydraulique, provoqué par marche positive, évoluant dans un canal trapézoïdal. L'objectif principal étant le dimensionnement du canal trapézoïdal.

Une étude comparative a été également proposée, dans le but de déterminer le ressaut hydraulique le plus avantageux du point de vue dissipation d'énergie. En effet, il a été trouvé que la marche positive diminue considérablement le rapport des hauteurs conjuguées.

Il a été montré également que la hauteur relative  $S$  de la marche positive est relativement réduite pour le cas du ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive, évoluant dans un canal de section droite trapézoïdal.

Il a été montré par la suite, pour ce qui concerne la relation liant la longueur relative  $X$  du bassin d'amortissement et le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, qu'un décalage significatif est constaté relativement au ressaut contrôlé.

✓ Le deuxième chapitre de cette partie s'est intéressé à l'étude théorique du ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal. L'objectif de cette étude était d'établir d'une manière pratique la relation fonctionnelle  $f(F_1, Y, S) = 0$ , où  $F_1$  représente le nombre de Froude de l'écoulement incident,  $Y$  représente le rapport des hauteurs conjuguées et  $S$  est la hauteur relative de la marche positive. Les résultats obtenus montrent que certains écarts relatifs entre les valeurs théoriques et expérimentales du nombre de Froude sont relativement élevés. Ce décalage est dû essentiellement à la négligence de la perte de charge singulière au niveau de

l'élargissement du canal à l'extrémité amont de la marche. Cependant, la relation théorique obtenue étant implicite en  $Y$ , il a été proposé une relation explicite par un ajustement de la relation théorique moyennant les données expérimentaux.



# **PRINCIPALES NOTATIONS**

## PRINCIPALES NOTATIONS

$A_1$	L'aire de la section mouillée initiale	$[m^2]$
$A_2$	L'aire de la section mouillée finale	$[m^2]$
$A(x)$	L'aire de la section mouillée correspondant à $x$	$[m^2]$
$b$	Base du canal trapézoïdal	$[m]$
$F_1, IF_1$	Nombre de Froude incident	$[-]$
$P_1$	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	$[N]$
$P_2$	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	$[N]$
$g$	Accélération de la pesanteur	$[m.s^{-2}]$
$h_1$	Hauteur initiale du ressaut	$[m]$
$h_2$	Hauteur finale du ressaut	$[m]$
$h_2^*$	Hauteur finale du ressaut classique rectangulaire	$[m]$
$h(x)$	Profondeur de l'eau à la distance $x$ du pied du ressaut	$[m]$
$h_b$	hauteur maximal du rouleau de fond	$[m]$
$k$	coefficient de correction du volume du ressaut	$[-]$
$L_r$	Longueur du rouleau	$[m]$
$L_j$	Longueur du ressaut	$[m]$
$L_r^*$	Longueur du rouleau classique rectangulaire	$[m]$
$L_j^*$	Longueur du ressaut classique rectangulaire	$[m]$
$L_u$	la distance du pied du ressaut au début du rouleau de fond	$[m]$
$L_b$	longueur du rouleau de fond	$[m]$
$m$	cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale	$[-]$
$M$	coefficient de forme	$[-]$
$Q$	Débit volume	$[m^3.s^{-1}]$
$R_e$	Nombre de Reynolds	$[-]$
$R_h$	Rayon hydraulique correspondant au profil triangulaire	$[-]$
$s$	Hauteur du seuil	$[m]$
$S$	Hauteur relative du seuil	$[-]$
$S_f$	Gradient de perte de charge	$[-]$
$W_x$	Force de frottement agissant sur le volume de liquide	$[N]$
$V$	Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiale et finale	$[m^3]$
$v_1$	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	$[m.s^{-1}]$
$v_2$	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	$[m.s^{-1}]$
$x$	Position de seuil	$[m]$
$X$	Position relative de seuil	$[-]$
$Y^*$	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	$[-]$
$Y_s$	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil	$[-]$

$\nu$	Viscosité cinématique	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
$\lambda_j$	longueur relative du ressaut	[-]
$\lambda_r$	longueur relative du rouleau	[-]
$\lambda_b$	longueur relative du rouleau de fond	[-]
$\lambda_u$	longueur relative du distance d'approche	[-]
$\bar{\omega}$	Poids spécifique du liquide	$[\text{N}.\text{m}^{-3}]$
$\rho$	Masse volumique du liquide	$[\text{kg}.\text{m}^{-3}]$
$\eta$	Rendement du ressaut	[-]
$\alpha$	Angle d'inclinaison du fond du canal par rapport à l'horizontal	[rd]
$\theta$	Angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal	[rd]

# **LISTE DES TABLEAUX**

## LISTE DES TABLEAUX

### DEUXIEME PARTIE

#### Chapitre I

Tableau 1.1 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de $F_1$ .....	57
Tableau 1.2 :	Valeurs des paramètres a et b.....	58
Tableau 1.3 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de $F_1$ .....	58
Tableau 1.4 :	Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage de la figure 1.22.....	62
Tableau 1.5 :	Mesures expérimentales de la pente négative ayant servi au traçage de la figure 1.22.....	63
Tableau 1.6 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure 1.23.....	65
Tableau 1.7 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage la figure 1.11.....	68

#### Chapitre II

Tableau 2.1 :	Valeurs du coefficient k selon la relation 2.13 Pente.....	77
Tableau 2.2 :	Valeurs du coefficient k selon la relation 2.13 contre pente .....	78
Tableau 2.3 :	Valeurs des paramètres a et b.....	82

#### Chapitre I

### TROISIEME PARTIE

Tableau 1.1 :	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de Y en fonction de $F_1$ .....	100
---------------	---	-----

Tableau 1.2 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $Y = f(S)$ .....	101
Tableau 1.3 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $Y = f(X)$ .....	102
Tableau 1.4 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $F_1 = f(S)$ .....	103
Tableau 1.5 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $F_1 = f(X)$ .....	105
Tableau 1.6:	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_r = f(S)$ .....	106
Tableau 1.7 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_r = f(X)$ .....	107
Tableau 1.8 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_r = f(F_1)$ .....	109
Tableau 1.9 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_j = f(X)$ .....	110
Tableau 1.10 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage la fonction $Y = f(F_1)$ .....	111
Tableau 1.11 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $S_A = f(F_1)$ .....	112
Tableau 1.12 :	Mesures expérimentales ayant servi au traçage la figure 5.11.....	119
<b><u>Chapitre II</u></b>		
Tableau 2.1 :	valeurs Y et S expérimentale ayant servi au calcul de $F_1$ théorique selon la relation (2.12).....	130
Tableau 2.2 :	écarts relatifs en (%) entre $F_{1exp}$ expérimental $F_{1thé}$ théorique .....	131
Tableau 2.3 :	valeur des paramètres (a et b) de la relation (2.16).....	134

# **LISTE DES FIGURES**





# LISTE DES FIGURES

## PREMIERE PARTIE

### Chapitre I

Figure 1.1 :	ressaut hydraulique .....	2
Figure 1.1.a :	Ressaut ondulé.....	4
Figure 1.1.b :	<i>le pré-ressaut</i> .....	4
Figure 1.1.c :	Le ressaut de transition.....	5
Figure 1.1.d :	Le ressaut stable.....	5
Figure 1.1.e:	<i>Ressaut agité</i> .....	5
Figure 1.2 :	Ressaut hydraulique classique.....	6
Figure 1.3 :	Variation du nombre de Froude $F_1$ en fonction du rapport $Y$ des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme $M$ .....	10
Figure 1.4 :	Aspect du ressaut classique. a) rouleau développé. b) rouleau non développé.....	10
Figure 1.5:	schéma de définition.....	11
Figure 1.6 :	caractéristique principale du rouleau de fond: a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximale.....	11
Figure 1.7 :	longueur relative $\lambda_j$ du ressaut en fonction de $F_1$ et de $M$ .....	12
Figure 1.8 :	(---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique.....	13
Figure 1.9 :	Rendement $\eta$ du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude. $M \rightarrow \infty$ : Cas du canal triangulaire. $M = 0$ : Cas du canal rectangulaire.....	14

### Chapitre II

Figure 2.1 :	Classification des ressauts inclinés selon Kindsvater (1944).....	16
Figure 2.2 :	Notation du ressaut incliné.....	18
Figure 2.3 :	Classification du ressaut en contre pente.....	19
Figure 2.4 :	Schéma de définition et volume de contrôle pour le ressaut en contre pente...	20
Figure 2.5 :	Rapport de hauteurs conjuguées expérimentales et théoriques pour des cas limites et des cas stabilisés de ressaut en contre pente, provenant de l'étude de Mc Corcodal et Mohamed (1994), ainsi que celle de Okada et Aki (1059). $tg\theta = (+) 0,0 ; (\square) -0,1 ; (\blacktriangle) -1/6 ; (\nabla) -1/5 ; (\blacksquare) -1/4 ; (—) \text{Equation théorique}$	

	tgθ = (+) 0,0 ; (□) -0,1 ; (▲) -1/6 ; (∇) -1/5 ; (■) -1/4 ; (—) Equation théorique.....	21
Figure 2.6 :	Longueurs du rouleau mesurées dans les cas limites et les cas stabilisés de ressaut en contre pente. Provenant de l'étude de Mc Corcodal et Mohamed (1994) et de celle de Okada et Aki (1959). tgθ = (+) 0,0 ; (□) -0,1 ; (▲) 1/6 ; (∇) -1/5 ; (■) -1/4 ;(—) Equation théorique.....	22
Figure 2.7:	Classification du ressaut limite et du ressaut contrôlé par seuil dans un canal en contre pente.....	23
Figure 2.8 :	Variation de Y en fonction du nombre de Froude F1 et de la pente i du canal...	25
Figure 2.9 :	Longueur relative Lr/h <sub>1</sub> du rouleau en fonction de G.....	26
Figure 2.10 :	ressaut hydraulique sur une pente positive.....	27
Figure 2.11 :	Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude.....	29
Figure 2.12 :	Variation de la longueur relative Lj/h <sub>1</sub> du ressaut en fonction du nombre de Froude F <sub>1</sub> de l'écoulement incident, pour 0 ≤ tang(α) ≤ 0,05.....	30
Figure 2.13 :	Variation de la longueur relative Lr/h <sub>1</sub> du rouleau en fonction du nombre de Froude F <sub>1</sub> de l'écoulement incident, pour 0 ≤ tang(α) ≤ 0,05.....	31

### **Chapitre III**

Figure 3.1 :	types de ressaut hydraulique évaluant dans un canal doté d'une marche positive. (a) ressaut type A (b) ressaut type B.(c) ressaut type B-min.....	33
Figure 3.2 :	a) zones de séparation d'écoulement pour une marche positive,(+) et (-) indiquent respectivement les suppressions et les dépressions par rapport à la pression hydrostatique. b) répartition de la pression autour du volume de contrôle .....	34
Figure 3.3 :	variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F <sub>1</sub> pour différentes hauteurs relatives S de marche positive.(-)courbes théorique pour divers S selon Hager et Sinniger (1986) ;points expérimentaux de Froude et Forster Skrinde (1950) (---)la limite théorique.....	35
Figure 3.4 :	variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F <sub>1</sub> pour les marche positive et négative dans un canal rectangulaire	

	prismatique (.....) ressaut type A, (-)ressaut type B et Bmin , (---)la limite inférieure de l'apparition du ressaut sur marche positive.....	36
Figure 3.5 :	efficacité $\eta = \Delta H / H_1$ en fonction de $F_1$ et de $S$ (.....) ressaut type A marche négative , (s=0)ressaut type B sur marche positive (---)ressaut type B-min sur marche négative.....	37
Figure 3.6 :	Variation expérimentale de $(Y_A - 1)$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , pour le ressaut de type A. (o) points expérimentaux. (-) Courbe selon l'équation (3.8).....	38
Figure 3.7 :	Variation de la hauteur relative $S_A$ du seuil en fonction du nombre de Froude $F_1$ . (o) Points expérimentaux. (-) Courbe tracée selon l'équation (3.9).....	39
Figure 3.8 :	Variation de $(Y_A - 1)$ en fonction de la hauteur relative $S_A$ de la marche positive. (o) Points expérimentaux. (-) Droite d'équation : $Y_A - 1 = 1,16 S_A$ .	40
Figure 3.9 :	Variation de $(S_A + F_1^{0,4})$ en fonction de la position relative $\lambda_r = L_r / h_1$ de la marche positive. (o) Points expérimentaux. (-) Courbe tracée selon la relation (3.11).....	41
Figure 3.10 :	Variation de $(S_A + F_1^{0,4})$ en fonction de la longueur relative $\lambda_B = L_B / h_1$ de la marche positive. (o) Points expérimentaux. (-) Courbe tracée selon la relation (3.12).....	41

## DEUXIEME PARTIE

### Chapitre I

Figure 1.1 :	Schéma simplifié du canal de mesure de section trapézoïdale, ayant servi à l'expérimentation.....	47
Figure 1.2 :	Photographie du canal de mesure utilisé.....	47
Figure 1.3 :	Photographie de la boîte en charge et vanne de manipulation.....	48
Figure 1.4 :	Photographie d'une série de convergent.....	48
Figure 1.5 :	Pompe centrifuge.....	48
Figure 1.6 :	photographie des séries du seuil de mesure .....	49
Figure 1.7 :	photographie du capteur de mesure du débitmètre électromagnétique .....	49
Figure 1.8 :	a) photographie du convertisseur du débitmètre électromagnétique b) photographie de l'écran d'affichage des débits.....	49

Figure 1.9 :	Schéma électrique du capteur du débitmètre électromagnétique .....	50
Figure 1.10 :	Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.....	51
Figure 1.11 :	Schéma simplifier d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal à pente positive.....	52
Figure 1.12 :	photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé à pente négative $F_1 = 9,05$ ; $s = 3$ cm; $L_j = 154$ cm; $h_2 = 18,4$ cm ; $\tan(\alpha) = -0,01$ .....	52
Figure 1.13 :	photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé à pente nulle $F_1 = 6,63$ ; $s = 7$ cm; $L_j = 110$ cm; $h_2 = 13,7$ cm ; $\tan(\alpha) = 0$ .....	52
Figure 1.14 :	photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé à pente positive $F_1 = 8,96$ ; $s = 17$ cm; $L_j = 164$ cm; $h_2 = 20,8$ cm ; $\tan(\alpha) = 0,01$ .....	53
Figure 1.15 :	Variation du rapport $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , Pour $\tan(\alpha) = 0,005$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.....	54
Figure 1.16 :	Variation du rapport $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , pour $\tan(\alpha) = 0,01$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.....	54
Figure 1.17 :	Variation du rapport $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , pour $\tan(\alpha) = 0,015$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.....	55
Figure 1.18 :	Variation du rapport $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , Pour $\tan(\alpha) = 0,02$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.....	55
Figure 1.19 :	Variation du rapport $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , Pour $\tan(\alpha) = 0$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.....	56
Figure 1.20 :	Variation du rapport $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , Pour $\tan(\alpha) = -0,005$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.....	56
Figure 1.21 :	Variation du rapport $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , Pour $\tan(\alpha) = -0,01$ . ( $\square$ ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.....	57
Figure 1.22 :	Variation du paramètre 'b' en fonction de $\tan(\alpha)$ .....	59
Figure 1.23 :	Variation de la relation $f(F_1, \alpha)$ en fonction de la hauteur relative $s/h_1$ du seuil. (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $f(F_1, \alpha) = s/h_1$ pente négative .....	60
Figure 1.24 :	Variation expérimentale de $Y(F_1)$ pour différentes valeurs de $\tan(\alpha)$ .....	60

Figure 1.25 :	Variation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$ .....	61
Figure 1.26 :	Variation de la longueur relative $L_r/h_1$ du rouleau en fonction du nombre de Froude $F_1$ de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$ .....	64
Figure 1.27 :	Variation du rendement $\eta$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ . $\tan\alpha = 0,002$ (+) ; $\tan\alpha = 0,0015$ (□) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = 0,00$ (○) ; $\tan\alpha = -0,01$ (◇) .....	67
<b>Chapitre II</b>		
Figure 2.1 :	Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal à pente positive .....	72
Figure 2.2 :	a) Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut. b) Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut.....	74
Figure 2.3 :	Variation du nombre de Froude expérimental $F_{1exp}$ en fonction du nombre de Froude théorique $F_{1th}$ calculée selon la relation (2.14).(—) Première bissectrice d'équation : $F_{1exp} = F_{1th}$ .....	79
Figure 2.4 :	Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,00$ . (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.....	80
Figure 2.5 :	Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,005$ . (o) points expérimentaux; (—) Courbes d'ajustement.....	80
Figure 2.6 :	Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,01$ .(o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.....	80
Figure 2.7 :	Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,015$ . (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.....	81
Figure 2.8 :	Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,02$ .(o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.....	81
Figure 2.9 :	Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = -0,005$ .(o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.....	81
Figure 2.10 :	Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = -0,01$ .(o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.....	82
Figure 2.11 :	Variation du paramètre $a$ en fonction de $\tan(\alpha)$ .....	83
Figure 2.12 :	Variation de rapport des hauteurs conjuguées expérimentales $F_{1exp}$ en fonction	84

	Rapport des hauteurs conjuguées théorique $Y_{th}$ calculée selon la relation (2.16). (—) Première bissectrice d'équation : $Y_{exp} = Y_{1th}$ .....	
Figure 2.13 :	Variation expérimentale de $Y$ ( $F_{1th}$ ) pour différentes valeurs de $\tan(\alpha)$ . .....	84

### TROISIEME PARTIE

#### Chapitre I

Figure 1.1 :	Photographie du canal de mesure utilisé (vu latérale).....	91
Figure 1.2 :	Photographie du canal de mesure utilisé (vu en plan).....	91
Figure 1.3 :	Photographie de la boîte en charge et vanne de manipulation.....	92
Figure 1.4 :	Photographie d'une série de convergent.....	92
Figure 1.5 :	Pompe centrifuge.....	92
Figure 1.6 :	déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale.....	93
Figure 1.7 :	Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.....	94
Figure 1.8 :	photographie des séries des marches positive .....	94
Figure 1.9 :	Schéma du ressaut hydraulique contrôlé par marche positive .....	96
Figure 1.10 :	photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive $F_1 = 4,8$ ; $s = 3,6$ cm; $L_j = 131$ cm; $h_2 = 16,1$ cm.....	96
Figure 1.11 :	photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive $F_1 = 8,96$ ; $s = 5,6$ cm; $L_j = 149$ cm; $h_2 = 19,7$ cm .....	96
Figure 1.12 :	Schéma du ressaut hydraulique forcé de type A par marche positive .....	97
Figure 1.13 :	photographie d'un ressaut hydraulique forcé type A par marche $F_1 = 6,53$ ; $s = 3,6$ cm; $L_j = 104$ cm; $h_2 = 9$ cm.....	97
Figure 1.14 :	photographie d'un ressaut hydraulique forcé type A par marche $F_1 = 6,78$ ; $s = 5,6$ cm; $L_j = 136$ cm; $h_2 = 11,8$ cm .....	97
Figure 1.15 :	Variation du rapport $Y$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , ( $\Delta$ ) points expérimentaux(—) Courbes d'ajustement.....	99
Figure 1.16 :	Variation du rapport $F_{1th}$ en fonction du nombre de Froude $F_{1exp}$ , (O) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.....	100

Figure 1.17 :	Variation du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative $S$ de la marche positive. (o) points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.2).....	101
Figure 1.18 :	Variation expérimentale du rapport $Y$ en fonction de la position relative $X$ de la marche positive. (o) points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.3).....	102
Figure 1.19:	Variation expérimentale de nombre de Froude $F_1$ en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive.( o) points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation.....	103
Figure 1.20 :	Variation expérimentale du nombre de Froude $F_1$ en fonction de la position relative $X = x/h_1$ de la marche positive. (□) points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.5).....	105
Figure 1.21 :	Variation expérimentale de la longueur relative du rouleau $\lambda_r = L_r/h_1$ en fonction de la hauteur $S = s/h_1$ de la marche positive(o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.6).....	106
Figure 1.22 :	Variation expérimentale de la longueur relative $\lambda_r = L_r/h_1$ en fonction de la position relative $X = x/h_1$ de la marche positive. (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.7).....	107
Figure 1.23 :	Variation expérimentale de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ . (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.8) .....	108
Figure 1.24 :	Variation expérimentale de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction de la position relative $X = x/h_1$ de la marche positive(o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (1.9).....	109
Figure 1.25:	Variation du rapport $Y$ en fonction du nombre de Froude $F_1(\Delta)$ Points expérimentaux Courbe tracée selon la relation (1.10).....	110
Figure 1.26:	Variation du rapport $Y$ en fonction du nombre de Froude $F_1(\square)$ Points expérimentaux Courbe tracée selon la relation (1.11).....	112
Figure 1.27:	Variation de rapport des hauteurs conjuguées $Y$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ . Ressaut contrôlé par seuil mince (o) ; ressaut contrôlé par marche	113

	positive ( $\square$ ) ; ressaut forcé type-A-par marche positive ( $\Delta$ ).....	
Figure 1.28:	Variation du rapport S des hauteurs relatives en fonction du nombre de Froude F1. ( $\blacktriangle$ ) Ressaut contrôlé par marche. ( $\square$ ) Ressaut contrôlé par seuil mince. ( $\times$ ) Ressaut forcé de type A par marche positive.....	114
Figure 1.29:	Variation de la position de la marche en fonction du nombre de Froude F1. ( $\blacktriangle$ ) Ressaut contrôlé par marche. ( $\square$ ) Ressaut contrôlé par seuil mince. ( $\times$ ) Ressaut forcé de type A par marche positive.....	115
Figure 1.30:	Variation du rendement $\eta$ en fonction du nombre de Froude F1. ( $\blacktriangle$ ) Ressaut contrôlé par marche. ( $\square$ ) Ressaut contrôlé par seuil mince. ( $\times$ ) Ressaut forcé de type A par marche positive.....	117
<b><u>Chapitre II</u></b>		
Figure 2.1 :	Ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive dans un canal trapézoïdale.....	123
Figure 2.2 :	Représentation géométrique des paramètres $\bar{h}_1$ , $\bar{h}_2$ et $\bar{s}$ .....	124
Figure 1.3 :	variation de Y en fonction de $F_1$ selon la relation (2.12) le ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive pour efférentes S(____) courbe correspondant au ressaut classique dans un canal trapézoïdal (S=0), selon la relation (2.13). (-----)Courbe limite théorique d'apparition du ressaut.....	128
Figure 2.4 :	variation de Y en fonction de $F_1$ selon la relation (2.12) le ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive pour efférentes S(____) courbe correspondant au ressaut classique dans un canal trapézoïdal (S=0), selon la relation (2.13). (-----)Courbe limite théorique d'apparition du ressaut.....	129
Figure 2.5 :	représente graphique des nombres de Froude expérimentaux( $F_{1exp}$ ) et théorique ( $F_1$ thé).(____) première bissectrice.....	132
Figure 2.6 :	représente graphique des nombres de Froude expérimentaux $F_{1exp}$ ) et théorique ( $F_1$ thé).(____) première bissectrice.....	133
Figure 2.7 :	variation de Y en fonction de $F_1$ ( $\circ\circ\circ$ ) courbe théorique selon la relation (2.12) (____) droit d'ajustement.....	133



Figure 2.8 :	variation de (a) en fonction de la hauteur relative de la marche positive S.....	134
Figure 2.9 :	variation de (b) en fonction de la hauteur relative de la marche positive S.....	135

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

*Achour, B.*, (1989). Jump flowmeter in a channel of triangular cross-section without weir, journal of Hydraulic Research 27(2), 205-214.

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

*Achour, B., Debabeche, M.*, (2003). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire. Journal of Hydraulic Research 41(3), 319-325.

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

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

*Bakhmeteff, B. A., Matzke, A E*, (1936). The Hydraulic Jump terms of dynamic similarity, Transactions, American society of civil engineers, Vol.101, pp, 630-647.

*Belanger, J.B.*, (1828). Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes, Carilian-Goeury, Paris.

*Bradley, J. N., Peterka, A. J.*, (1957). The hydraulic design of stilling basins, Hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I), paper 1401; High dams, earth dams, and large canal structures (Basins II), paper 1402; short stilling basins for canal structures, small outlet works, and small spillways (Basin III), paper 1403; stilling basin and wave suppressors for canal structures, outlet works and diversion dams (Basin IV), paper 1404; stilling basin with sloping; apron (Basin V), paper 1405; small basins for pipe or open channel outlets no tailwater required (Basin VI), paper 1406, Proceedings, American Society of Civil Engineers, J. hydraulics division, vol. 83, No.HY5.

*Bidone , G.*, (1819). —Observations on the Height of the Hydraulic Jump, a Report Presented in Meeting of Royal Academy of Science of Turin, pp. 21-80, 1819.

*Bretz, N., V.*, (1988). Ressaut Hydraulique Forcé par seuil, Laboratoire de constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, Communication No. 2.

*Benmalek Ahmed.*, (2012), Etude du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal, Mémoire de magister en hydraulique, Département d'hydraulique, Université de Biskra.

*Carlier, M.*, (1980). Hydraulique Générale et Appliquée 1<sup>re</sup> édition.

*Debabeche, M., Achour, B.*, (1996). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, 1<sup>re</sup>

Séminaire Maghrèbin 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., 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.

*Debabeche, M., Cherhabil, S., Hafnaoui, A. et Achour, B.* (2009), Hydraulic jump in a sloped triangular channel, *Can. J. Civ; Eng.* 36: 655-658 (2009).

*Hager, W.H., Wanoschek, R* (1989), Hydraulic jump in trapezoidal channel, *J. hydraulic research*, Vol. 27, 1989, N.3.

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

*Hager, W., h.*, (1987). Der Ablufss im U-Profil. *Korrespondenz Abwasser* 34(5): 468-482. *Hager, W.H., Bretz N.V.*, (1986). Hydraulic Jump at positive and negative step; *J. hydraulic*

*research* 24(4), 237-253. *Hager, W.H., Sinniger, R.*, (1985). Flow characteristics of the Hydraulic jump in Stilling Channel

with an abrupt bottom rise, *J. Hydraulic Research* Vol. 23, 1985, No. 2 pp. 101-113; Vol. 24(3), pp. 207-215.

*Hager, W.H.*, (1989), Hydraulic jump in U-shaped channel, *Proc.ASCE, J. Hydraulic Engineering*, 115, 667-675.

*Hager, W., Bremen R., H., et Kawogoshi N.* (1990). Classical hydraulic jump; length of roller, *J. Hydraulic research* 28(5), 591-608.

*Hager, W. H., Li, D.*, (1992). Sill-controlled Energy Dissipator, *J. Hydraulic research*, vol.30, n°2,165-181.

Hager, W. H., wanoschek, R., (1987). Hydraulic jump in triangular channel, J. Hydraulic Research, Vol.25, n°5,549-564.

Hachemi Rachedi, L., (2005), Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, Mémoire de magister en hydraulique, Département d'hydraulique, Université de Biskra.

Mc Corcodal, 1994, Journal of Hydraulic Research, VOL. 32, 1994, NO.1; 119-130.

Lakehal, M., Debabeche, M., Mansri, N., (2008). Effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. Larhyss journal (Article accepté pour publication).

Moore, W. L., (1943), Energy loss at the base of a free overfall. Trans. ASCE 108, 1343-1392. Mansri, N., (2006). Ressaut Hydraulique Contrôlé par Marche Positive Dans un Canal Triangulaire,

Kateb S, M. Debabeche, A. Benmalek (2013) Étude expérimentale de l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal. Canadian Journal of Civil Engineering, 2013, 40(10): 1014-1018, 10.1139/cjce-2013-0359

Ohashi et al. (1973): Design of Combined Hydraulic Jump and Ski-Jump Energy Dissipator of Flood Spillway. XIII ICOLD Congress Madrid Q.41, R.19: 311-333.

Okada, A., et Aki, S. (1955). Experimental study of hydraulic jump on reversed slope apron. J. Tech. Lab., 5(6), Tokyo (in Japanese).

Pagliara, S. et peruginelli, A. 2000, Journal of Hydraulic Engineering/ November 2000/ 847-850.

Rajartnam, N. (1963): Discussion to "General Solution of the Hydraulic Jump in sloping Channels" by P.A. Argyropoulos. Proc. ASCE, J. Hydraulics Division 89(HY1) : 258-261.

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

Rajaratnam, N., (1966), Hydraulic jump in sloping channel, J. irrigation and Power (India), 23(Apr): pp.137-149, Discussion, 1967, 24(Jump): pp.285-293.

Rajaratnam, N., (1967), Hydraulic jumps, Advances in Hydro science, Vol. 4, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York.

Rajaratnam, N., Murahari, V., (1971), A contribution to forced hydraulic jumps, J. Hydraulic Research, vol. 9, 217-239.

Rajaratnam, N., Subramania, K., (1967), Flow equation for the sluice gate, Proc. ASCE, J. Irrigation and Drainage Division, Vol. 93, IR3, 167-186.

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

ASCE, J. Hydraulic Division, vol. 94, 1968, HY3 663-673; vol. 95, 1969, HY1 546-557, HY2 725-727; vol. 96, 1970, HY2 579-581.

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

*Rand, W.*, (1957), *An approach to generalised design of stilling basin*, Trans. New-York, Academy of Sciences, Vol. 20(2), 173-191.

*Rand, W.*, (1965), Flow over a vertical sill in an open channel, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, vol. 91, HY4 97-122.

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

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

*Rajaratnam, N.*, (1964). The Forced Hydraulic Jump. Water Power, January, 14-19, February, 6165.

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

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

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

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

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

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