

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 de Génie civil et d'Hydraulique
Ref :



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

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de

Magister

Spécialité : **Hydraulique**

Option : **Ouvrages Hydrauliques**

Thème

Etude du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal

Présenté par : **BENMALEK Ahmed**

Soutenu le : 02 / 10 / 2012 devant le jury composé de

ACHOUR	Bachir	Professeur	Président	Université de Biskra
DEBABECHE	Mahmoud	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
OUAMANE	Ahmed	Professeur	Examineur	Université de Biskra
BOUZIANE	Tewfik	Maitre de conférences	Examineur	Université de Biskra

REMERCIEMENTS

Pour ce travail, j'ai bénéficié des orientations, encouragements et précieux conseils de mon encadreur, Professeur DEBABECHE Mahmoud, Professeur à l'Université de Biskra que je remercie vivement et auquel j'exprime ma profonde reconnaissance pour l'aide scientifique et morale qu'il n'a cessé de me donner.

Aussi, je tiens à exprimer tout particulièrement, au Professeur ACHOUR Bachir, Directeur du Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS), ma profonde gratitude, aussi bien pour m'avoir accueilli dans son Laboratoire, que pour avoir accepté de m'honorer par sa présence en sa qualité de président de Jury.

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

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

Résumé

L'étude proposée a pour but d'analyser théoriquement et expérimentalement les ressauts hydrauliques contrôlé et forcé de type A par marche positive en canal trapézoïdal.

Trois grandes parties se sont avérées nécessaires : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine ; une seconde partie à caractère expérimental a permis d'obtenir avec de bonnes corrélations des relations empiriques, montrant l'effet de la marche sur les caractéristiques de ce type de ressaut. Enfin, à travers la troisième partie nous avons tenté de développer une équation théorique globale, en considérant l'effet de la marche positive.

Mots clés : Ressaut hydraulique, Canal trapézoïdal, Bassin de dissipation, Marche positive

Abstract

The proposed study aims to analyze theoretically and experimentally the controlled and A-forced hydraulic jump by positive step evolving in trapezoidal shaped channel.

This study consists of three main parts: the first one is bibliographical through which we reviewed the current works achieved in this field ; the second part is extremely experimental, which allowed us to find, with a good correlation, empirical relations, showing the effect of the step on the characteristics of this type of jump. Finally, through the third part we tried to develop a global theoretical equation, by considering the effect of the step.

Keywords: Hydraulic jump, trapezoidal Channel, Stilling basin, Positive step.

ملخص

تهدف هذه الدراسة المقترحة إلى إجراء التحليل النظري و التجريبي للقفزة المائية المراقبة و المجبرة ذات النوع أ بالعتبة الموجبة داخل قناة مفتوحة شبيهة بمنحرفة الشكل. جزئت هذه الدراسة إلى ثلاثة أقسام : يختص القسم الأول بالأبحاث المتعلقة بالأعمال المنجزة في هذا المجال، أما القسم الثاني ذو طابع تجريبي حيث سمح لنا بإيجاد علاقات تجريبية جيدة و كذا اثر العتبة الطويلة على خصائص القفزة المائية و في القسم الثالث و الأخير قمنا بمحاولة لإيجاد علاقة نظرية المتضمنة لمدى تأثير هذه العتبة الموجبة.

الكلمات المفتاحية: القفزة المائية، قناة شبه منحرفة الشكل، حوض التبريد، العتبة الموجبة.

SOMMAIRE

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

Première Partie

ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE

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

Chapitre I

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

I.1. Introduction.....	2
I.2. Définition.....	3
I.3. Ressaut hydraulique classique.....	4
I.3.1. Classification du ressaut classique.....	4
I.3.2. Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut.....	6
I.3.3. Caractéristique géométriques du ressaut.....	8
I.3.3.1. Hauteur du ressaut.....	8
I.3.3.2. Longueur du rouleau.....	8
I.3.3.3. Longueur du ressaut.....	9
I.3.3.4. Rendement du ressaut.....	10
I.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire.....	12
I.4.1. Approche de <i>Forster</i> et <i>Skrinde</i> (1950).....	12
I.4.1.1. Seuil continue à paroi mince.....	12
I.4.1.2. Seuil continue à paroi épaisse.....	14
I.4.1.3. La marche positive.....	15
I.5. Ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire.....	16
I.5.1. Approche de <i>Rand</i> (1957).....	16
I.5.2. Approche de <i>Bretz</i> (1988).....	18
I.5.2.1. Généralités.....	18
I.5.2.2. Procédures expérimentales.....	20
I.5.2.3. Hauteur conjuguées du ressaut.....	20
I.5.2.4. Longueur relative du bassin.....	22
I.6. Détection de la cavitation sur marche dans les bassins amortisseurs rectangulaires et à forte pente sous l'effet d'un ressaut hydraulique	

(Approche de <i>Negm et Abdel-Azim</i> , 2000).....	23
I.7. Conclusion.....	25

Chapitre II

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRIANGULAIRE

II.1. Introduction.....	27
II.2. Ressaut hydraulique classique.....	27
II.2.1. Approche de <i>Hager et Wanoschek</i> (1985).....	27
II.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	28
II.2.1.2. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	28
II.2.1.3. Profil de surface généralisé du ressaut.....	31
II.3. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil.....	32
II.3.1. Approche de <i>Debabeche et Achour</i> (2007).....	32
II.3.1.1. Position du problème.....	32
II.3.1.2. Influence du seuil sur le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	34
II.3.1.3. Influence du seuil sur la longueur relatif du bassin.....	36
II.4. Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive.....	37
II.4.1. Approche de <i>Debabeche et al</i> (2008).....	37
II.4.2. Position du problème.....	37
II.4.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	38
II.4.4. Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de <i>Froude</i>	39
II.4.5. Position relative de la marche positive.....	40
II.4.6. Longueur relative du bassin.....	41
II.5. Conclusion.....	43

Chapitre III

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOIDAL

III.1. Introduction.....	44
III.2. Caractéristique du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal.....	45
III.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	45
III.2.1.1. Cas particulier du canal rectangulaire.....	46
III.2.1.2. Cas particulier du canal triangulaire.....	46
III.2.2. Longueur du ressaut.....	47

III.2.3. Perte de charge relative du ressaut hydraulique.....	48
III.2.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire.....	49
III.2.3.2. Cas particulier du canal triangulaire.....	49
III.3. Conclusion.....	50
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....	51

Deuxième Partie

ETUDE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE.....	54
--	----

Chapitre I

DESCRIPTION DU MODELE

I.1. Introduction.....	55
I.2. Description du canal.....	55
I.3. Limnimètre.....	58
I.4. Les marches positives.....	59
I.5. Conclusion.....	61

Chapitre II

ETUDE EXPERIMENTALE

II.1. Introduction.....	62
II.2. Description des essais.....	62
II.2.1. Position du problème.....	62
II.2.2. Procédé de détermination du débit volume Q	63
II.2.3. Procédure expérimentale.....	63
II.3. Analyse des résultats expérimentaux.....	67
II.3.1. Ressaut hydraulique contrôlé.....	67
II.3.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	67
II.3.1.2. Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de <i>Froude</i>	71
II.3.1.3. Position relative de la marche en fonction du nombre de <i>Froude</i>	71
II.3.1.4. Longueur relative du rouleau.....	73
II.3.1.5. Longueur relative du ressaut.....	75

II.3.2. Ressaut hydraulique type A, forcé par marche positive.....	78
II.3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	78
II.3.2.2. Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de <i>Froude</i>	81
II.3.2.3. Position relative de la marche en fonction du nombre de <i>Froude</i>	82
II.3.2.4. Longueur relative du ressaut.....	83
II.4. Etude comparative.....	84
II.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	84
II.4.2. Hauteur relative de la marche positive.....	85
II.4.3. Longueur relative du bassin.....	86
II.4.4. Rendement du ressaut hydraulique.....	87
II.5. Conclusion.....	92
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE.....	93

Troisième Partie

Chapitre I

ETUDE THEORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DE TYPE A, FORCE PAR MARCHÉ POSITIVE

I.1. Introduction.....	94
I.2. Equation de la quantité de mouvement.....	94
I.3. Analyse dimensionnelle.....	99
I.4. Effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique.....	101
I.5. Comparaison du nombre de <i>Froude</i> issu de la relation Universelle avec celui issu de la relation théorique.....	102
I.5.1. Ecart relatif entre le nombre de <i>Froude</i> issu de la relation Universelle avec celui issu de la relation théorique.....	102
I.5.2. Correction de la relation théorique par les mesures expérimentales.....	103
I.6. Ajustement de la relation théorique.....	105
I.7. Conclusion.....	111
DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALE.....	112

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans le domaine des constructions hydrauliques, il est souvent question de restituer l'eau d'un ouvrage hydraulique vers un cours d'eau. Un ouvrage hydraulique, tel qu'un barrage, est muni d'un déversoir pour laisser passer les débits de crues que la retenue ne peut accumuler. Au pied de ce barrage se situe un bassin amortisseur, conçu pour être le siège de la dissipation d'énergie. Un changement de régime de l'écoulement intervient alors dans le dissipateur : à son entrée, le régime est torrentiel, à sa sortie il est fluvial ; cette transition s'appelle *ressaut hydraulique*. Pour contrôler et stabiliser la position dans le bassin, la disposition d'un seuil en travers de l'écoulement est souhaitable.

L'étude des paramètres hydrauliques du ressaut, tels que, le rapport des profondeurs conjuguées, la perte d'énergie ainsi que la longueur du ressaut, a attiré l'attention de divers chercheurs. *Leonardo de Vinci* (1452-1519) fut le premier à étudier le phénomène hydraulique du ressaut. Plus tard, d'autres chercheurs ont également essayé d'expliquer ce phénomène.

En premier lieu, c'est *Bidone* (1781-1839) qui a donné la mesure et la description du phénomène du ressaut hydraulique. Plus tard, *Bélanger*(1928) a, pour la première fois, présenté une expression mathématique quand au rapport des hauteurs conjuguées du ressaut ; pour cela, il a appliqué le principe de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de lit horizontal.

Safranez (1927) a, quant à lui, fait l'étude expérimentale systématique sur le ressaut hydraulique classique. Plus tard, *Bakhmeteff et Matzake* (1936) ont effectué des expériences sur les pentes très faibles et ont proposé les dimensions du profil de surface extérieur ; ils ont présenté des données expérimentales pour le rapport des profondeurs conjuguées et la longueur du ressaut dans un canal rectangulaire. Dans le même ordre, *Moore* (1957) a étudié la formation du ressaut à la base des chutes d'eau.

Enfin Posey et Hsing (1938) ont étudié le ressaut hydraulique dans le canal trapézoïdal.

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

Toutes les études sont effectuées dans le domaine du ressaut hydraulique, pour aboutir à une meilleure configuration du bassin d'amortissement, tel que : la forme géométrique et le type

d'obstacles, qui servent dans la plus part des cas à dissiper une grande partie de l'énergie cinétique dans le bassin. Donc, le choix de tel ou tel type se fait à la base des études expérimentales effectuées au laboratoire.

L'expérimentation a montré que la conception du bassin de dissipation dépend de la forme géométrique du canal et des données hydrauliques de l'écoulement incident.

En effet, notre étude sera consacrée à l'analyse théorique et expérimentale, du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale. Ce type de ressaut n'a connu que très peu d'étude. Les travaux les plus intéressants sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdale sont ceux effectués par *Silvester* (1964), *Wanoschek* et *Hager* (1989).

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

Le deuxième chapitre 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), ainsi que ceux de *Debabeche* et *Achour* (2007). Ces derniers ont présenté une étude très intéressante sur l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire. Nous allons de même entreprendre l'étude de *Debabeche et al* (2008) concernant l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire.

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

La deuxième partie sera consacrée à l'étude expérimentale de deux types du 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 hydraulique. A travers cette étude nous examinerons l'effet de la marche positive sur les caractéristiques physiques du ressaut hydraulique.

La troisième partie du plan de 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 trapézoïdal, 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.

En guise de conclusion, nous avons proposé un dernier chapitre qui contient une discussion des résultats théoriques et expérimentaux obtenus.

Première Partie :
Etat des Connaissances sur le Ressaut Hydraulique

Introduction à la première partie

Comme c'est indiqué dans le plan de travail, cette partie consiste à passer en revue sur les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique. Ce phénomène hydraulique que nous essayons de développer, est l'objet de recherche de plusieurs hydrauliciens, étrangers ou locaux. Ces chercheurs ont abouti à des résultats fiables, basés sur des essais effectués au laboratoire, d'une part pour obtenir une parfaite structure du bassin d'amortissement et, d'autre part pour résoudre les problèmes d'érosion du lit de l'oued, à l'aval des barrages.

Pour organiser notre travail, nous avons divisé la première partie en trois chapitres essentiels. Le premier chapitre est consacré à citer l'évaluation dans le temps du ressaut hydraulique. En premier lieu, nous avons abordé le ressaut hydraulique classique, évoluant en canal de section droite rectangulaire, de pente faible ou nul, et nous avons présenté l'équation de *Bélanger* (1828), qui donne la relation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de *Froude* de l'écoulement incident. Ainsi les travaux de *Hager et al* (1990) et ceux de *Hager et Sinniger* (1986) font l'objet de la détermination des caractéristiques géométriques du ressaut. En deuxième lieu, nous avons configuré l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique, à travers les travaux de *Forster et Skrinde* (1950) et ceux de *Rand* (1957) et *Bretz* (1988), sur les différents types de ressaut, sans oublier bien sûr l'étude particulière réalisée par *Negm et Abdel-Azim* (2000) sur la marche positive et négative.

Le deuxième chapitre traite le cas du ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire. Deux cas seront examinés : en premier lieu, nous parlerons du ressaut classique, et nous présenterons les travaux de *Hager et Wanoschek* (1987) sur le calcul des longueurs caractéristiques du ressaut en fonction de nombre de *Froude*. En deuxième, nous examinerons les travaux les plus récents de *Debabeche et Achour* (2007) qui seront l'objet de base de notre étude bibliographique, sur le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal triangulaire. Nous exposerons aussi les travaux de *Debabeche et al* (2008) qui se préoccupent de l'influence de la marche positive sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire.

En fin, le dernier chapitre sera consacré aux travaux effectués par *Silvester* (1964), *Wanoschek et Hager* (1989), sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal. Signalons ici que ce type de ressaut n'a connu que très peu d'étude, et fera l'objet de notre développement théorique et analyse expérimentale, dans la deuxième et la troisième partie.

Premier Chapitre :
Ressaut Hydraulique en Canal Rectangulaire

Chapitre I

Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

1.1. Introduction

En revenant sur l'histoire des études du ressaut hydraulique, nous constatons que les recherches préliminaires effectuées dans ce domaine, sont basées sur le modèle du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire. De ce fait le ressaut classique a donné le point de départ pour les chercheurs hydrauliciens.

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

D'après les études faites dans ce domaine, on s'accorde à dire que, le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation liant le rapport $Y^* = \frac{h_2}{h_1}$ des hauteurs conjuguées et le nombre de *Froude* F_1 . Pour une section droite rectangulaire, l'équation de *Bélanger* (1828) a fait l'exemple d'application du théorème d'Euler au ressaut hydraulique classique. Nous allons présenter la forme simplifiée de Y^* proposée par *Hager et Sinniger* (1985).

Le ressaut est caractérisé par la longueur L_r^* de son rouleau ainsi que par la longueur L_j^* sur laquelle il s'étend. Ces caractéristiques n'ont pu être évaluées que par la voie de l'expérimentation. Les travaux présentés par *Hager et al* (1990) font l'objet de notre étude bibliographique, concernant l'évaluation des caractéristiques géométriques du ressaut classique.

La capacité du ressaut pour dissiper une telle énergie est caractérisée par son rendement η , qui est le rapport entre la différence des charges totales initiales et finales ΔH_{12} , et la charge totale dans la section initiale du ressaut H_1 . Nous passerons en revue les travaux de *Hager et Sinniger* (1986), concernant leur relation, qui permet le calcul explicite du rendement η .

A la fin de ce chapitre nous aborderons le ressaut hydraulique contrôlé et forcé par seuil dans un canal rectangulaire. Les travaux les plus récents effectués dans ce domaine, sont ceux de *Forster et Skrinde* (1950), et ceux de *Rand* (1957) et *Bretz* (1988). Nous représenterons la relation reliant le rapport des hauteurs conjuguées Y , le nombre de *Froude* F_1 , et la hauteur relative S du seuil. Nous aborderons aussi leurs approches sur l'écoulement franchissant un seuil continu à paroi mince et le

seuil contenu à paroi épaisse. Et pour terminer nous présenterons l'étude particulière réalisée par *Negm et Abdel-Azim* (2000) concernant la cavitation sur les marches positives et négatives, dans un canal rectangulaire à forte pente, pour les ressauts types A et B.

1.2. Définition

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

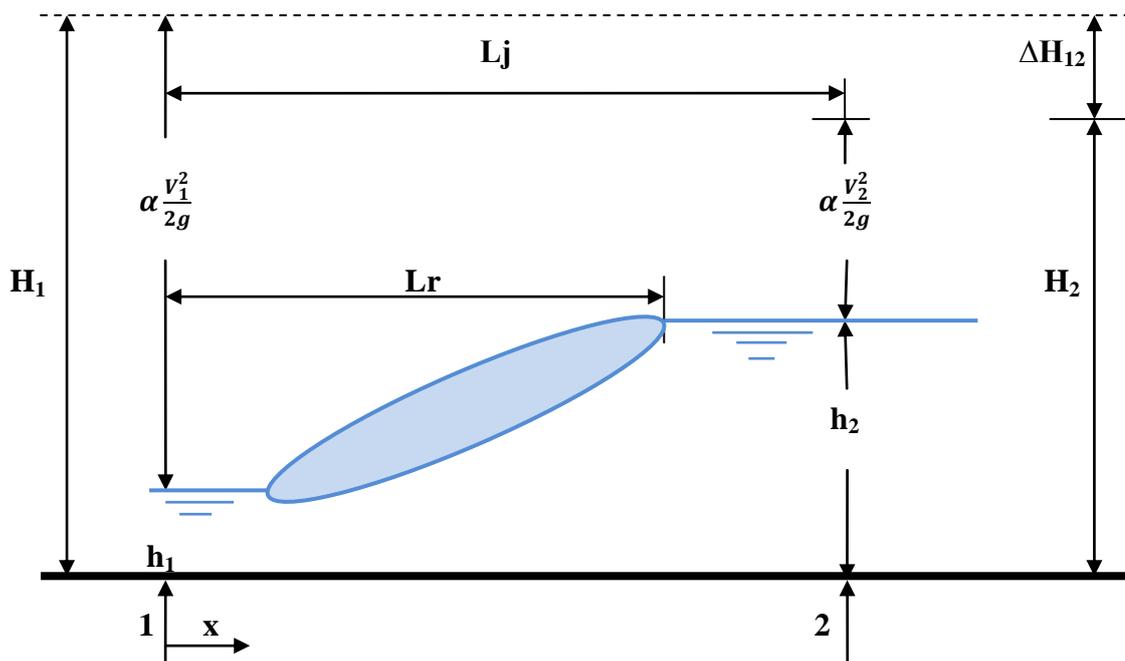


Figure 1.1: Ressaut Hydraulique

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

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

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

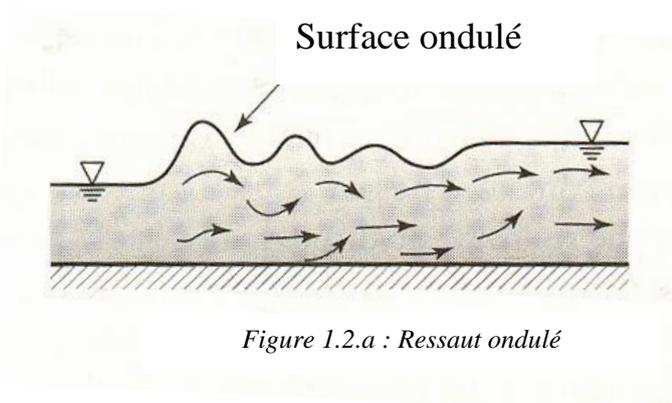
1.3. Ressaut hydraulique classique

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

1.3.1. Classification du ressaut classique

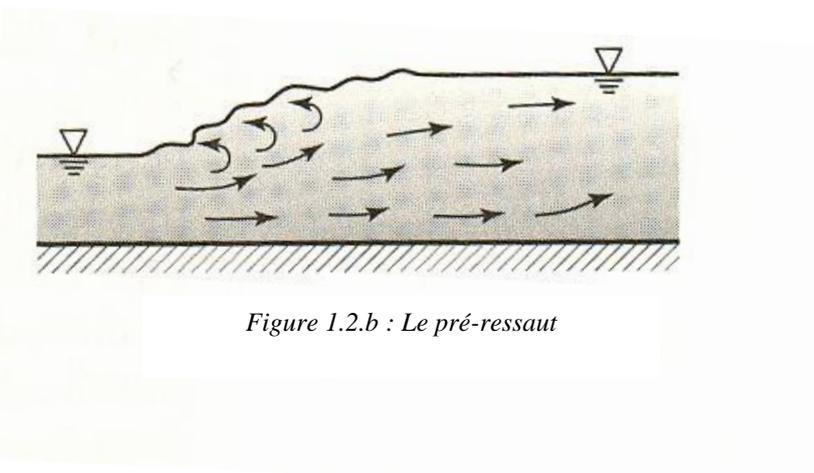
La classification du ressaut classique est basée sur la variation du nombre de *Froude* F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut.

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



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

- 1- Pour des valeurs de $1.7 < F_1 < 2.5$ on constate le même phénomène, mais plus accentué ; dans ce cas se produisent déjà de petits tourbillons superficiels. Jusqu'à ces valeurs de F_1 , la surface libre est raisonnablement plane et la distribution des vitesses est régulière mais le rendement obtenu est très faible : c'est le *pré-ressaut* (figure 1.2.b).



- 2- Pour des valeurs de $2.5 < F_1 < 4.5$ l'écoulement est pulsative ; la plus grande turbulence se vérifie soit près de fond, ou à la surface : c'est *le ressaut de transition* (figure 1.2.c). Chaque pulsation produit une onde de période irrégulière, qui peut se propager sur plusieurs Kilomètres dans la nature, ce qui peut causer des dommages aux berges.

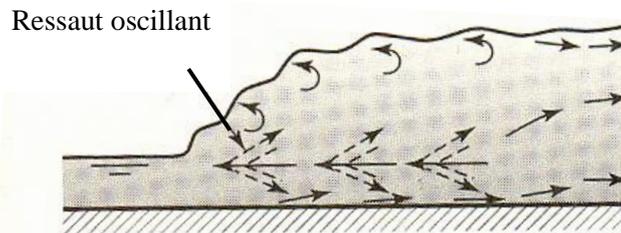


Figure 1.2.c : Le ressaut de transition

- 3- Pour des valeurs de $4.5 < F_1 < 9$, le ressaut est bien caractérisé et localisé. Ce type du ressaut est souvent adopté pour les bassins de dissipation d'énergie pour son bon rendement (45% et 70%) : c'est *le ressaut stable* (figure 1.2.d).

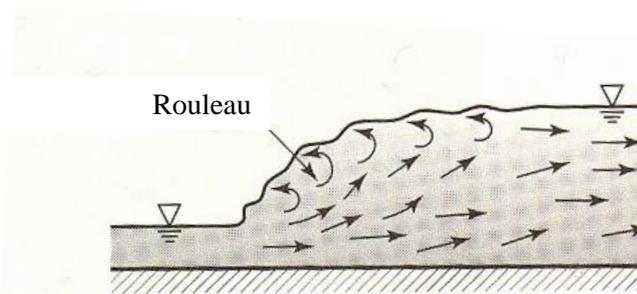


Figure 1.2.d : Le ressaut stable

- 4- Pour des valeurs de $F_1 > 9$, on constate des masses d'eau qui roulent par-dessous, au début du ressaut, et tombent sur le circuit rapide d'amont, d'une manière intermittente, provoquant des nouvelles ondulations en aval et la surface libre du ressaut est irrégulière : c'est *le ressaut agité ou clapoteux* (figure 1.2.e)

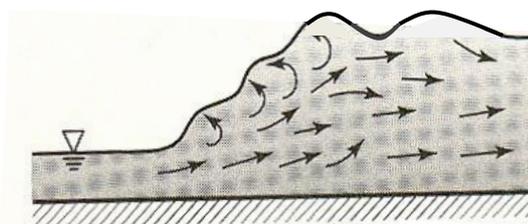


Figure 1.2.e : Le ressaut clapoteux

1.3.2. Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut

On ne peut pas appliquer le théorème de *Bernoulli* entre les sections 1 et 2 pour déterminer les profondeurs conjuguées du ressaut, étant donné que le terme ΔH_{12} , qui représente la perte de charge, n'est pas connu et que les formules du régime uniforme ne sont pas applicables. C'est le théorème *d'Euler* qui permet de résoudre ce problème.

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

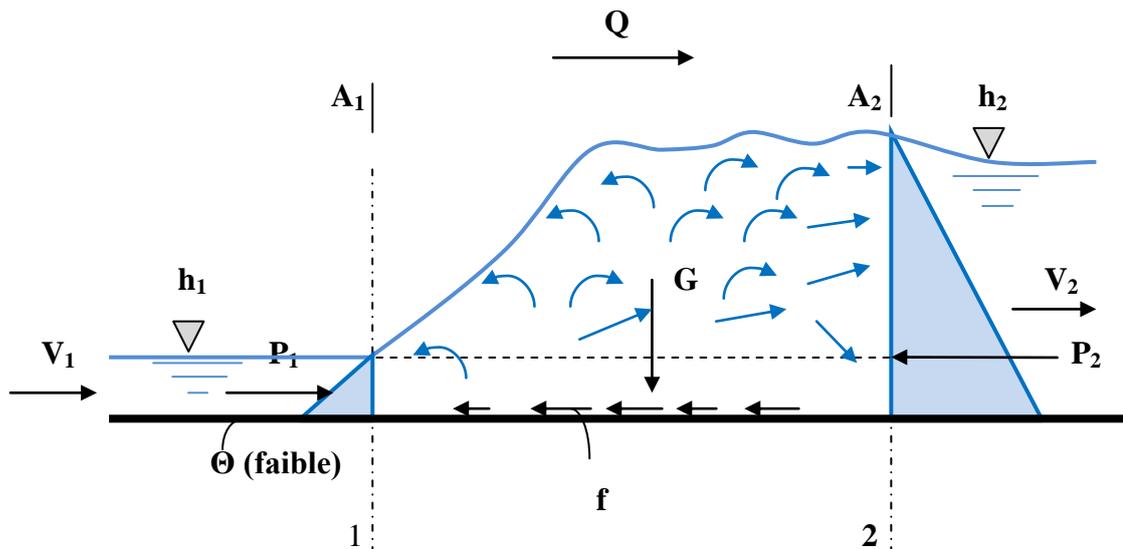


Figure 1.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut

L'équation de continuité permet d'écrire :

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

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

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

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

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

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

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

Où :

β : facteur de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité

Puisque la répartition des vitesses est supposée uniforme.

ρ : la masse volumique du liquide en mouvement.

Q : débit volume.

V : vitesse d'écoulement.

g : accélération de la pesanteur.

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

P_1 et P_2 : forces des pressions hydrostatiques.

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

f : force de frottement (considérée comme négligeable).

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

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

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

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

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

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

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

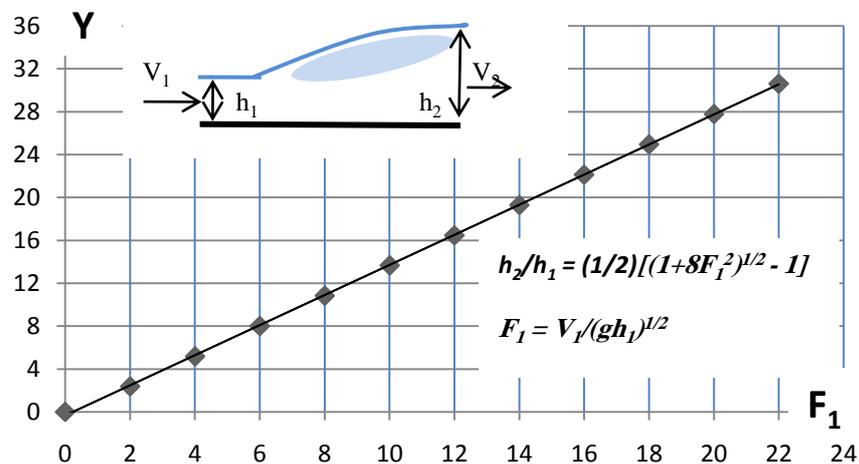


Figure 1.4 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828)

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

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

1.3.3. Caractéristiques géométriques du ressaut

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

1.3.3.1. Hauteurs du ressaut

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

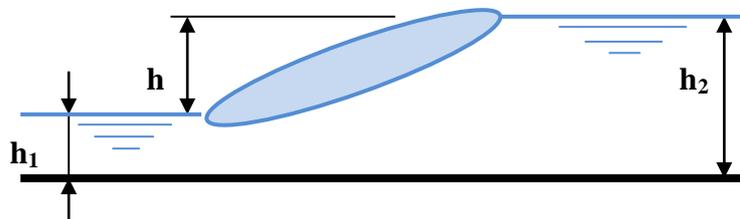


Figure 1.5 : Hauteur du ressaut

1.3.3.2. Longueur du rouleau

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

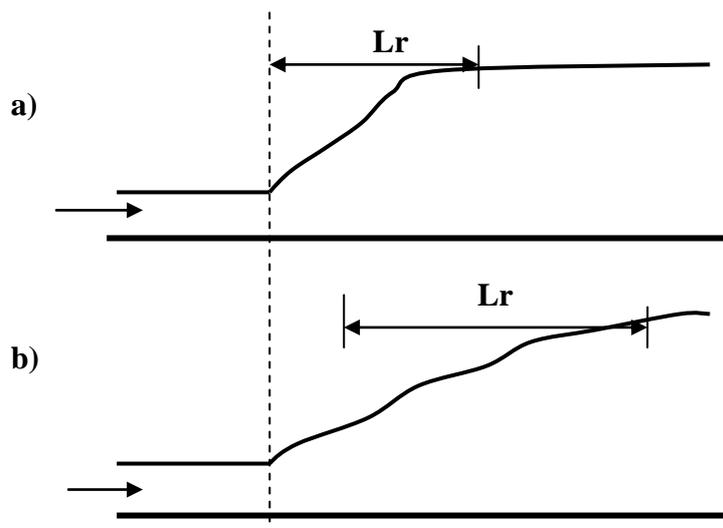


Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique
a) Rouleau développé, b) Rouleau non développé

La forme générale du rouleau développé est presque uniforme (figure 1.6.a). Par contre le rouleau non développé présenté par une surface libre perturbée sous l'effet des vagues qui se forment à l'aval (figure 1.6.b). De même le jet joignant la section initiale, se dirige vers la surface libre. Ce phénomène forme une turbulence au fond, est produite par l'effet de l'existence d'une zone de séparation au niveau de la masse liquide en mouvement.

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

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

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

«Tgh» indique la tangente hyperbolique.

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

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

1.3.3.3. Longueur du ressaut

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

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

Pratiquement, pour calculer les dimensions du bassin d'amortissement, on considère comme limite d'aval du ressaut le point à partir duquel le revêtement du béton n'est plus nécessaire.

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

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

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

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

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

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

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

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

Et qui conduit aux mêmes résultats.

1.3.3.4. Rendement du ressaut

Le ressaut provoque une importante dissipation d'énergie mécanique ; ce phénomène est irréversible. Les caractéristiques de la turbulence sont très complexes et dépendent fortement des conditions à l'amont.

Par l'application du théorème de *Bernoulli* (1738) on peut déterminer la perte d'énergie, $\Delta H_{12} = H_1 - H_2$ produite par le ressaut en admettant que $Z_1 = Z_2$ (canal horizontal), (figure 1.7), on obtient :

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

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

$$H_1 = \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \quad (1.16)$$

Et la charge totale dans la section aval est :

$$H_2 = \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \quad (1.17)$$

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

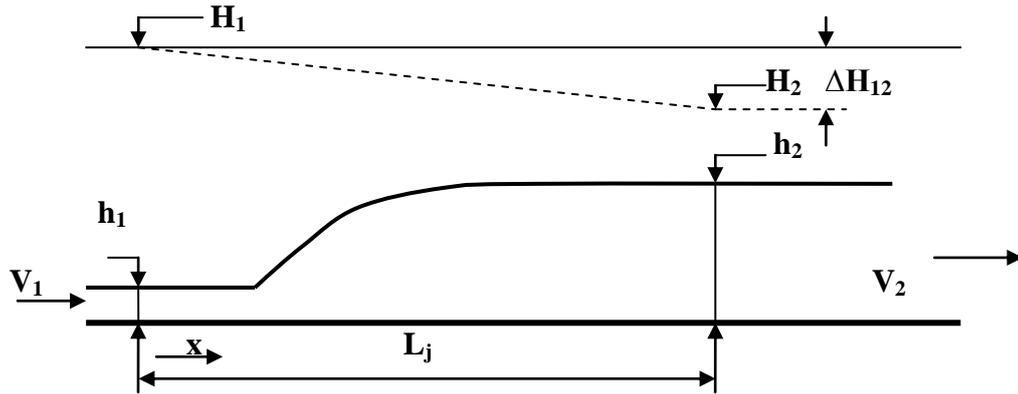


Figure 1.7 : (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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

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

$$\text{Où : } A_1 = b \cdot h_1$$

$$A_2 = b \cdot h_2$$

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

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

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

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

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

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

Donc à partir de la relation (1.21) on peut conclure la perte de charge due au ressaut classique et ne dépend que des hauteurs conjuguées. La capacité de dissipation du ressaut est représentée par η :

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

Le rapport $\frac{H_2}{H_1}$ est appelé efficacité du ressaut. Donc pour déterminer les charges totales dans les sections amont et aval on utilise les relations (1.16) et (1.17) et en tenant compte de la relation (1.5) du nombre de *Froude* on obtiendra :

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

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

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

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

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

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

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

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

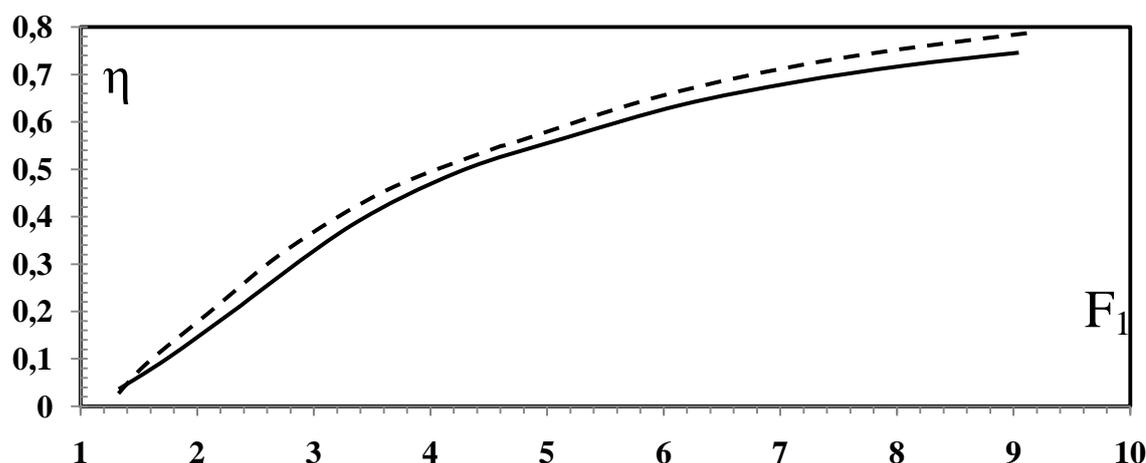


Figure 1.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de *Froude* F_1
 (—) Courbe tracée selon la relation (1.25), (-----) courbe tracée
 Selon la relation (1.26)

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

1.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire

1.4.1. Approche de *Forster et Skrinde (1950)*

1.4.1.1. Seuil continu à paroi mince

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

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

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

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

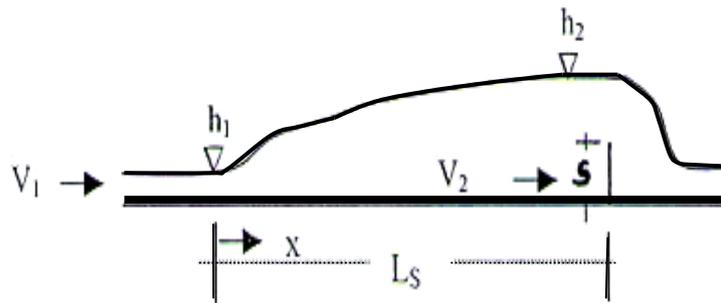


Figure 1.9: Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

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

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

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

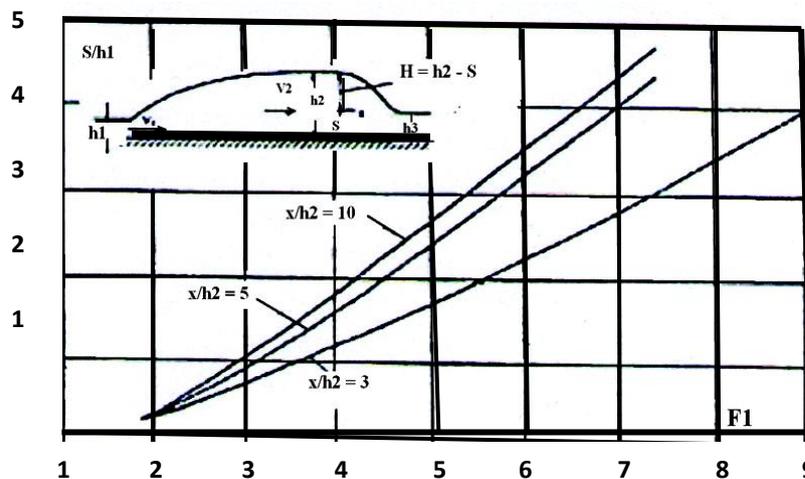


Figure 1.10 : Variation expérimentale du nombre de *Froude* F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince quelques valeurs de x/h_2 , selon *Forster* et *Skrinde* (1950)

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

1.4.1.2. *Seuil continu à paroi épaisse*

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

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

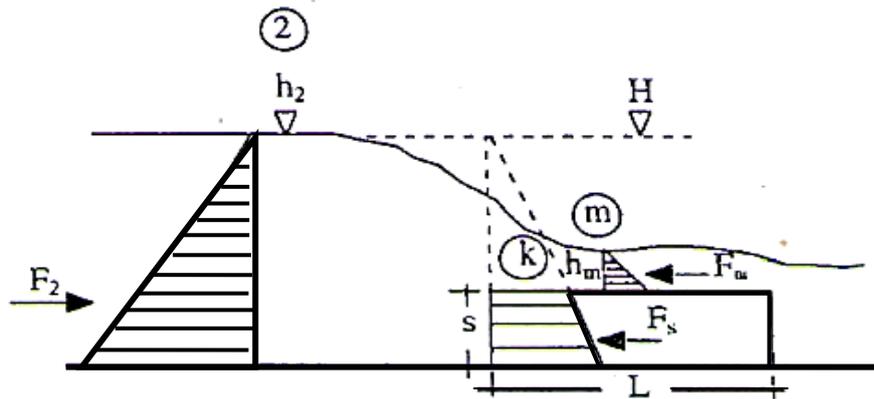


Figure 1.11 : Écoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.

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

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

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

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

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

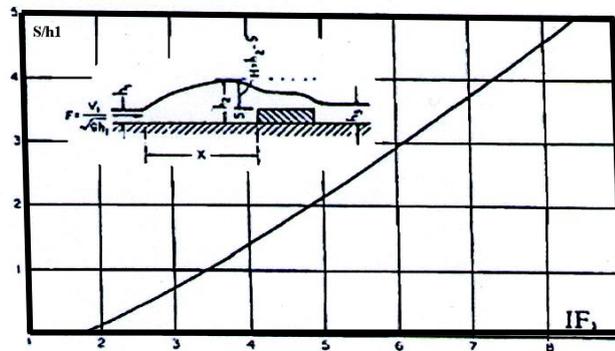


Figure 1.12: Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation (1.30)

1.4.1.3. La marche positive

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

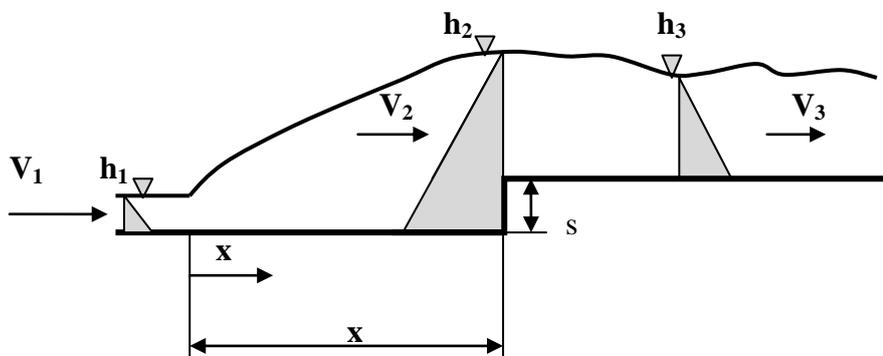


Figure 1.13 : Ressaut forcé par marche positive de hauteur 's', les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions

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

A cet effet, les auteurs ont développé un diagramme (figure 1.14) qui peut être servi pour déterminer les paramètres caractéristiques du bassin d'amortissement tel que : la longueur et la

hauteur du bassin ainsi que la hauteur minimale de la marche positive nécessaire à la formation du ressaut.

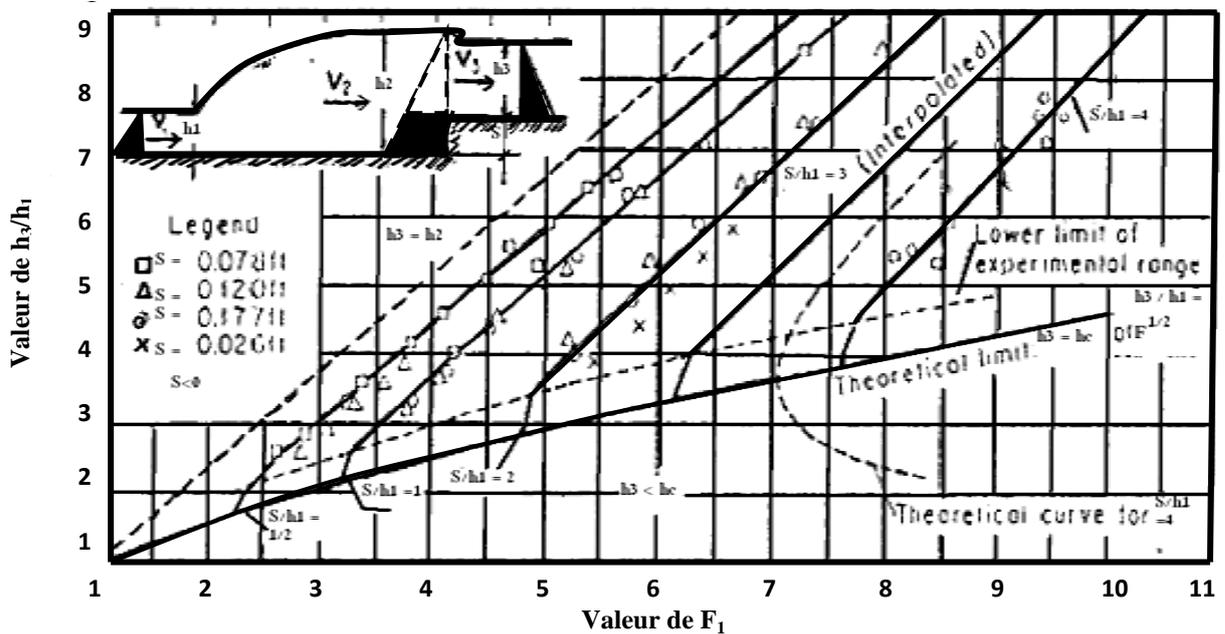


Figure 1.14: Variation du nombre de Froude F_1 , en fonction de h_3/h_1 et de la hauteur relative s/h_1 de la marche positive, selon Forster et Skrinde (1950)

1.5. Ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire

1.5.1. Approche de Rand

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

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

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

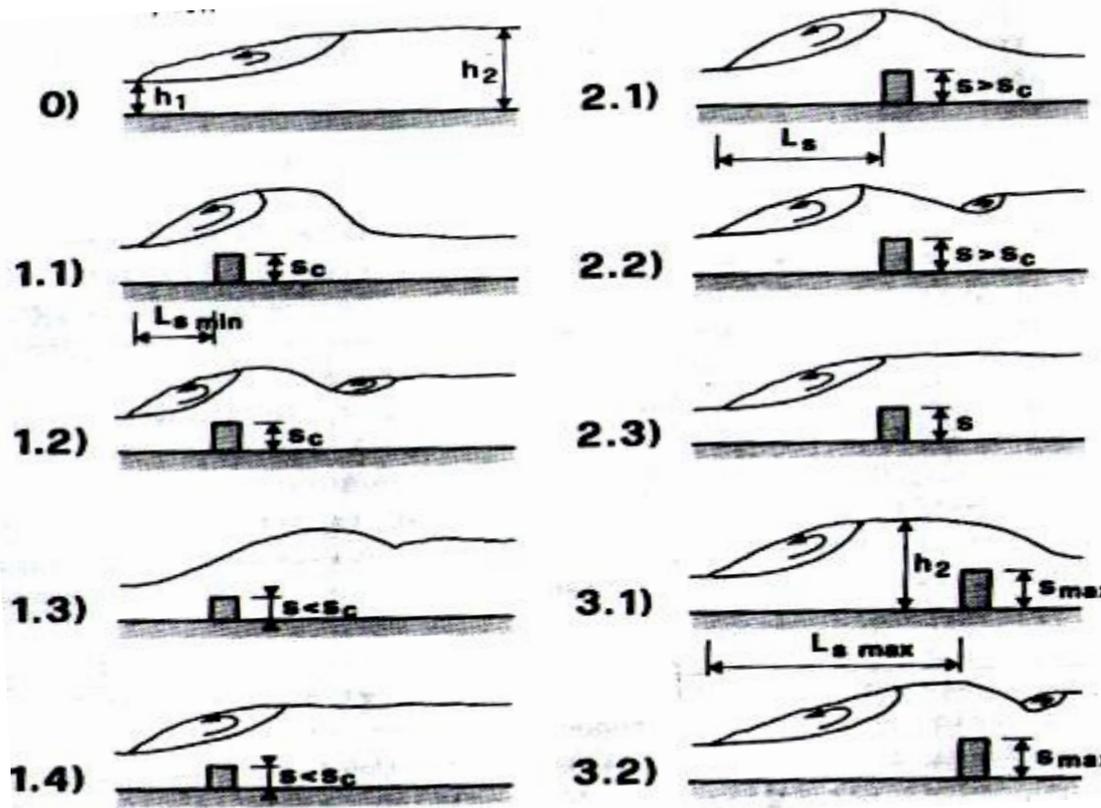


Figure 1.15 : Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes selon Rand (1957):
 0) Ressaut classique avec hauteurs conjuguées h_1 et h_2 ; 1) class 1, longueur $L_{s,min}$; 2) class 2, longueur intermédiaire L_s ; 3) class 3, longueur $L_{s,max}$;
 s : hauteur du seuil, s_c : hauteur critique du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

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

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

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

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

En 1965, *Rand* a repris ces diagrammes en les présentant sous une autre forme. L'installation expérimentale alors utilisée, est un canal avec vanne plane : la détermination de h_1 est donc préconisée dans ce cas. Un diagramme pour une valeur de F_1 est dressé $Y_F = h_2 / h_1$ en fonction de $S = s / h_1$ pour divers valeurs de K , arrangement plus pratique à utiliser pour le dimensionnement (figure 1.16), mais avec l'inconvénient qu'il faut un diagramme pour chaque nombre de *Froude*.

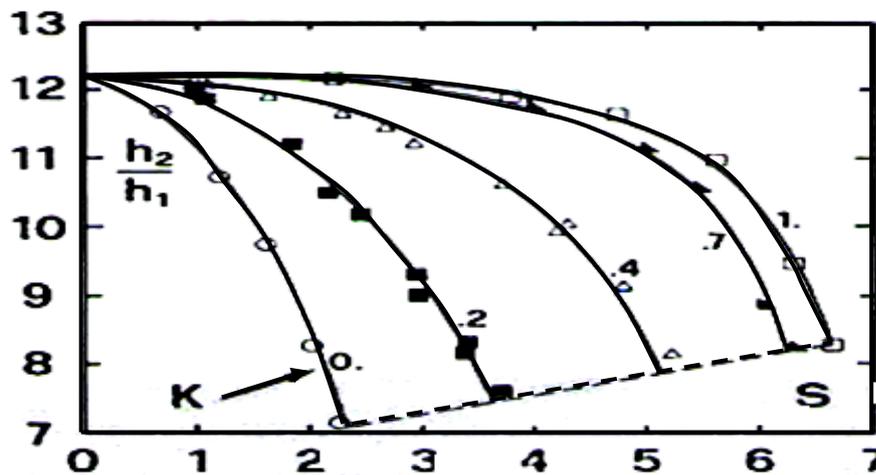


Figure 1.16 : Hauteurs conjuguées $h_2/h_1 = f(S, K)$ pour $F_1 = 9$. Valeurs et courbes expérimentales :
(----) limite d'influence de l'aval sur l'amont.

1.5.2. Approche de Bretz

1.5.2.1. Généralités

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

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

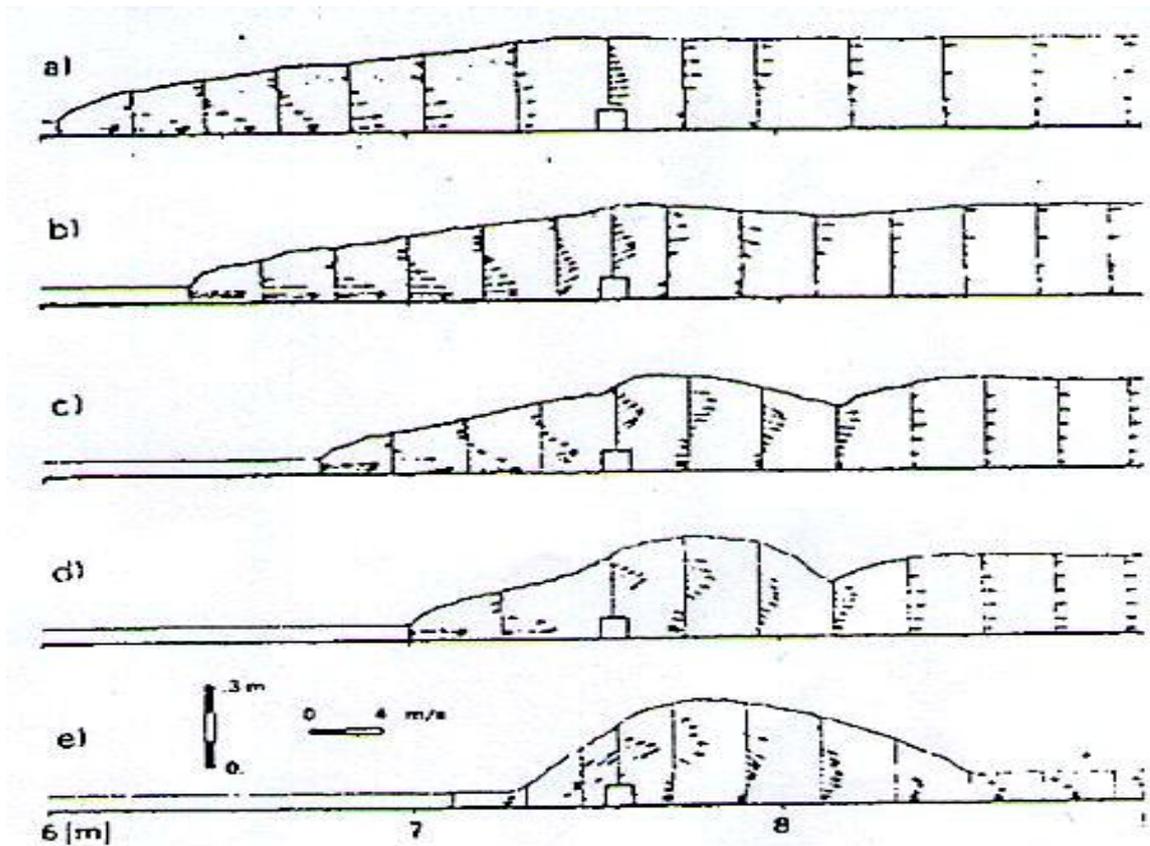


Figure 1.17 : Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $F_1 = 5,23$ et $S = 1,42$.
 1) Ressaut type A ; 2) Ressaut type B ; 3) Ressaut type B_{min} ; 4) Ressaut type C et 5) onde.
 (Bretz, 1987).

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

1.5.2.2. Procédure expérimentale

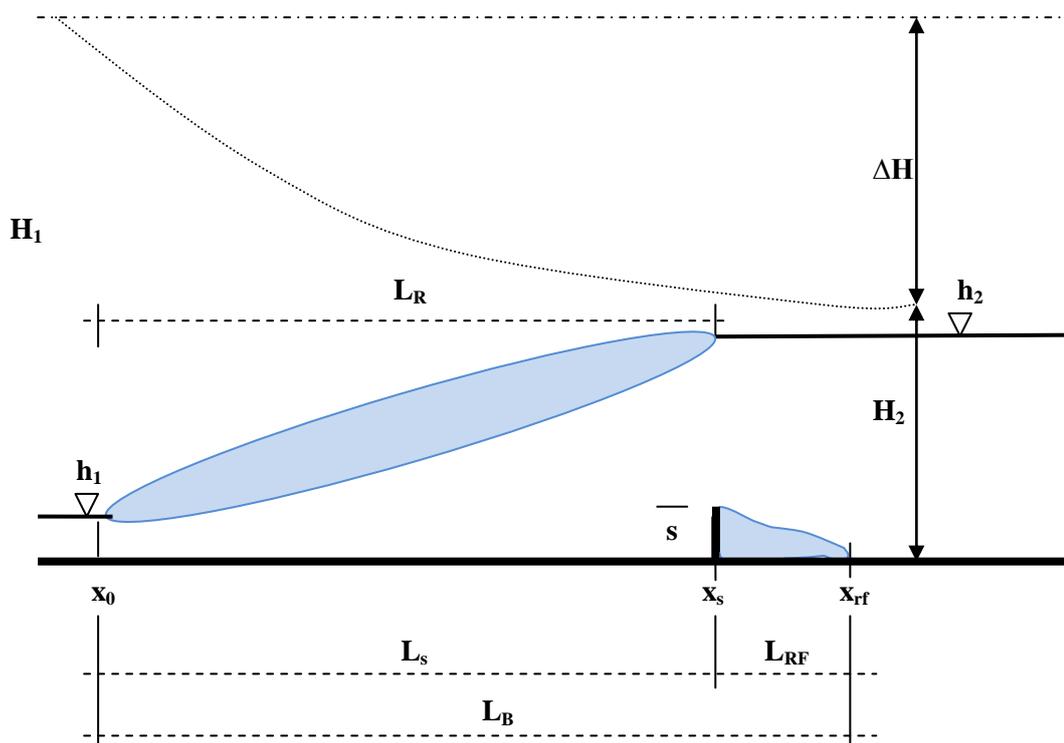


Figure 1.18 : ressaut forcé par seuil selon Bretz (1965): définition des termes. H_1 charge amont, H_2 charge aval, ΔH perte de charge, h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x_0 position du pied du ressaut, x_s position du seuil, x_{rf} position de la fin du rouleau de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

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

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

1.5.2.3. Hauteurs conjuguées du ressaut

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

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

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

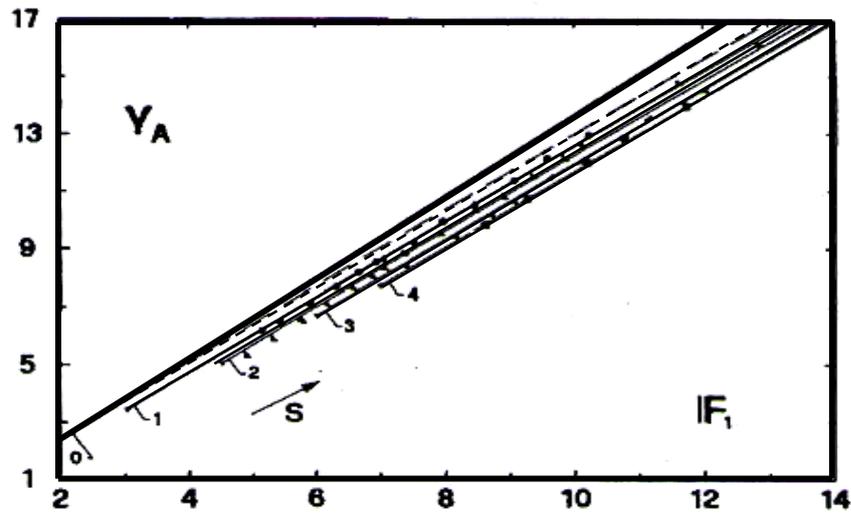


Figure 1.19 : Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_A = f(F_1, S)$ avec $0,5 \leq S \leq 6$. $S = s/h_1$, (—) courbe selon l'équation de Bélanger. (----) courbe du ressaut classique selon l'équation (1.32)

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

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

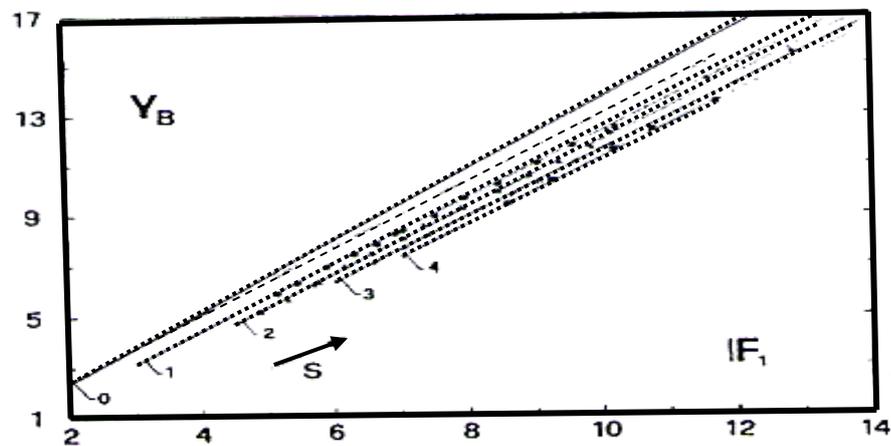


Figure 1.20 : Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_B = f(F_1, S)$. Même notation que la (Figure 1.19).

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

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

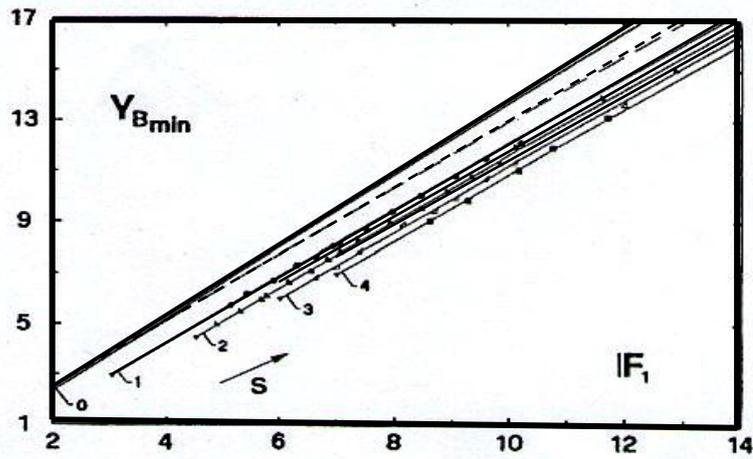


Figure 1.21 : Ressaut forcé type B-min. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_{B-min} = f(F_1, S)$.
Même notation que la (Figure 1.19)

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

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

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

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

1.5.2.4. Longueur relative du bassin

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

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

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

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

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

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

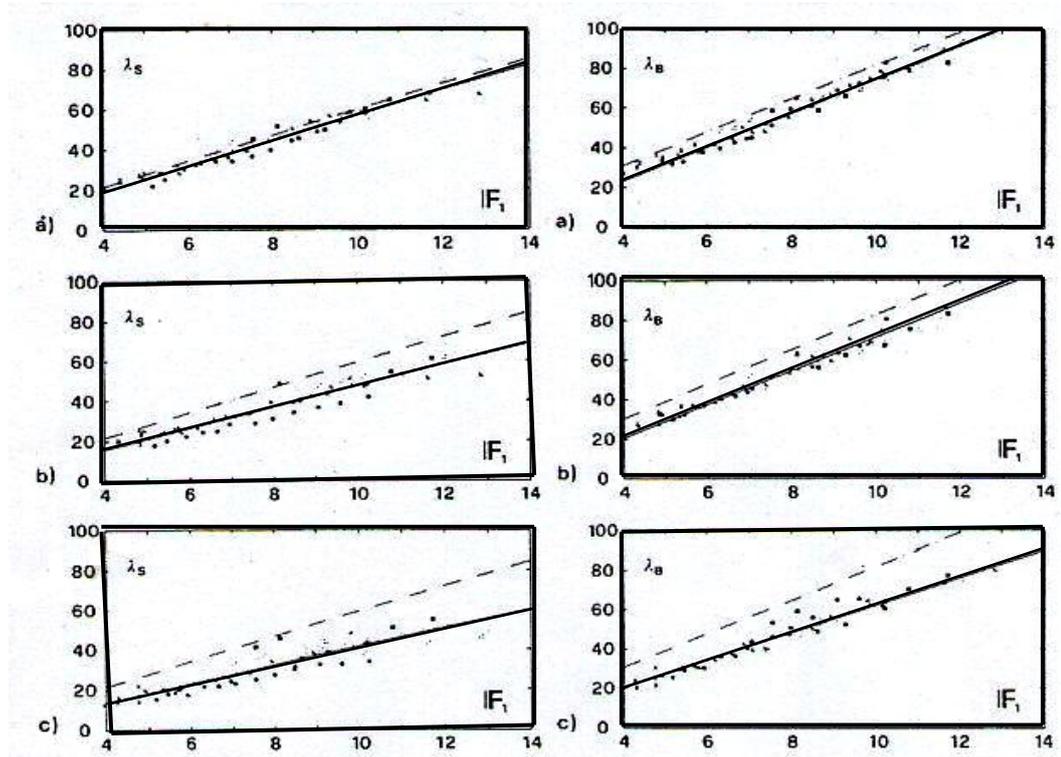


Figure (1.22) : Longueur relative $\lambda_S = f(F_1)$ pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B_{min}. (—) courbe selon l'équation : a) (1.36), c) (1.37) et (1.38) respectivement. (----) courbe limite.

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

1.6. Détection de la cavitation sur la marche dans les bassins amortisseurs rectangulaire et à forte pente sous l'effet d'un ressaut hydraulique (Approche de Negm et Abdel-Azim 2000)

Les marches sont exposées à un écoulement turbulent, qui provoque des zones de séparation de l'écoulement à la proximité de ces marches, où la répartition des pressions est non uniforme et prend la valeur négative. La détection de ces dépressions par les moyens usuelles de mesure de pression est impossible, mais en utilisation d'autre moyens plus sophistiqué et sensibles tel que les transducteurs pourront résoudre ce problème mais leur coût est élevé.

Une approche semi-théorique a été développée par les auteurs pour la détection des zones de cavitations à la proximité des marches sous l'effet du ressaut hydraulique. Les deux marches positives et négatives des différentes hauteurs dans les bassins à forte pente sont considérées. Le coefficient de la force de pression sur les marches est pris comme indicateur de présence des pressions négative et de la possibilité de développement d'une cavitation à proximité de la marche.

La différence entre la distribution de la pression agissante sur la face de la marche et celle hydrostatique dans le cas des ressauts type A⁻ et type B⁻ est plus grande que dans le cas des ressauts type A⁺ et type B⁺, et dépendent aux conditions de l'écoulement dans la marche et de la hauteur

relative de cette dernière. A^+ indique, par exemple, le ressaut hydraulique type A sur marche positive.

Les analyses de tous les résultats indiquent que la pression négative se produit probablement dans les zones à proximité de la marche négative sous l'effet du ressaut hydraulique et plus sévère dans le cas du ressaut type A-. De plus, la pente du fond affecte fortement la variation du coefficient de la force de pression et le taux des variations est indépendant du type du ressaut, du nombre de *Froude* et de la hauteur relative de la marche.

1.7. Conclusion

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

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

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

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

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

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

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

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

Pour conclure, l'étude de *Negm* et *Abdel-Azim* (2000), révèle que la cavitation est possible au voisinage de la marche négative, tel que le coefficient de la force de pression est négatif au niveau des marches négatives, sous l'effet du ressaut hydraulique. En ce qui concerne les marches positives, ce coefficient est toujours positif, ainsi, aucune cavitation n'est observée dans les deux cas des ressauts type A et type B.

Deuxième Chapitre :
Ressaut Hydraulique en Canal Triangulaire

Chapitre II

Ressaut hydraulique en canal triangulaire

2.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons examiner les travaux les plus intéressants, relatifs au ressaut hydraulique, évoluant dans un canal de section droite triangulaire. Trois types du ressaut seront étudiés :

- Le ressaut hydraulique classique : Nous allons exposer les travaux de *Hager* et *Wanoschek* (1987) en ce qui concerne le ressaut "triangulaire" de type A, évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale, à angle d'ouverture de 90° . A travers une étude expérimentale assez particulière, les auteurs proposent, notamment, une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut L_r/h_2 et L_j/h_2 , en fonction du nombre de *Froude* de l'écoulement incident et de m .

En fait, *Hager* et *Wanoschek* (1987) extrapole les résultats issus d'un profil semi-triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° .

- Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° . Nous allons examiner l'étude de *Debabeche* et *Achour* (2006), qui a été consacrée à l'étude expérimentale de l'influence du seuil sur le ressaut hydraulique.
- Le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive évoluant dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° . Nous examinerons les travaux de *Debabeche* et *al.* (2008), qui ont été consacrés à l'étude expérimentale de l'influence de la marche positive sur le ressaut hydraulique.

2.2. Ressaut hydraulique classique

2.2.1. Approche de *Hager* et *Wanoschek* (1987)

Les essais entrepris par *Hager* et *Wanoschek* (1987) sur le ressaut "triangulaire", ont été réalisés dans un canal rectangulaire de largeur $b = 30$ cm, dans lequel a été insérée une paroi en PVC inclinée d'un angle de 45° par rapport à l'horizontale. Le profil obtenu est alors de forme semi-triangulaire comme l'indique la figure 2.1.b. La paroi verticale du canal est en verre, ce qui permet la visualisation de l'écoulement. L'angle d'ouverture du canal triangulaire est d'environ 45° (44.7°), ce qui correspond à un angle de 90° pour le canal triangulaire symétrique.

Les débits volumes Q ont été variés entre 4 et 20 l/s suivant des pas de $\Delta Q = 2$ l/s. les essais ont été effectués sous des vitesses de l'écoulement incident variant entre 1,7 et 8,6 m/s et des profondeurs initiales h_1 entre 70 et 76 cm correspondant à des nombres de *Froude* $2 \leq F_1 \leq 14$

approximativement. En raison du caractère fortement torrentiel de l'écoulement incident, la mesure limnimétrique des profondeurs h_1 a été très délicate.

Les mesures limnimétriques des profondeurs de l'écoulement à l'aval de ressaut ont été mesurées avec une incertitude de plus ou moins 2 à 3 cm, en raison de violentes perturbations de la surface libre observées notamment à des nombre de Froude $F_1 > 10$.

Les vitesses axiales ont été mesurées au moyen d'un tube de *Pitot* à environ 3 cm de la paroi verticale du canal.

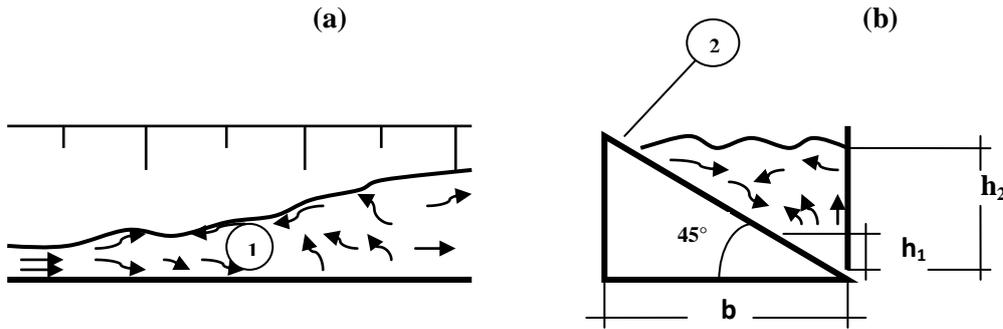


Figure 2.1 : Ressaut en canal semi-triangulaire selon Hager et Wanoschek (1987), (a) vue en plan, (b) coupe transversale. 1) Vue en plan du ressaut. 2) Paroi en PVC inclinée de 45°

2.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées

Sous l'hypothèse de l'uniformité des pressions et des vitesses, l'application de l'équation de la quantité de mouvement, entre les sections initiale et finale d'un ressaut évoluant dans un canal horizontal de section droite trapézoïdale, mène à écrire :

$$\frac{b.h_1^2}{2} + \frac{m.h_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b.h_1 + m.h_1^2)} = \frac{b.h_2^2}{2} + \frac{m.h_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b.h_2 + m.h_2^2)} \quad (2.1)$$

h_1 et h_2 sont respectivement les hauteurs initiales et finales du ressaut, b est la base du canal trapézoïdal, Q désigne le débit volume, m représente la cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale et g est l'accélération de la pesanteur.

L'équation (2.1) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2}{3}MY \right) - \left(1 + \frac{2}{3}M \right) \right] \quad (2.2)$$

Dans laquelle F_1 représente le nombre de *Froude* caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut et M désigne la hauteur relative initiale du ressaut :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(b.h_1 + m.h_1^2)^3}, \quad Y = \frac{h_2}{h_1}, \quad M = \frac{mh_1}{b} \quad (2.3)$$

La relation (2.2), exprime ainsi, dans le cas d'un canal trapézoïdal, la variation du nombre de *Froude* à l'amont du ressaut en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées et de la hauteur relative M . les équations régissant les ressauts en canal de section rectangulaire constante et en canal triangulaire peuvent être déduites de la relation (2.2). Le canal de section droite rectangulaire constante est un cas particulier du canal trapézoïdal pour lequel l'angle d'inclinaison du talus par rapport à l'horizontal est de 90° ; ceci correspond donc à $m = \cotg 90^\circ$, ou bien $M = 0$. Par contre, le profil triangulaire correspond à un profil trapézoïdal de base $b = 0$, soit $M \rightarrow \infty$.

Lorsque M est égal à zéro, l'équation (2.2) mène à la relation de *Bélanger* exprimée par la relation (1.6) du premier chapitre.

La relation (2.2) est représentée sur la figure (2.2), dans un système d'axes de coordonnées cartésiennes.

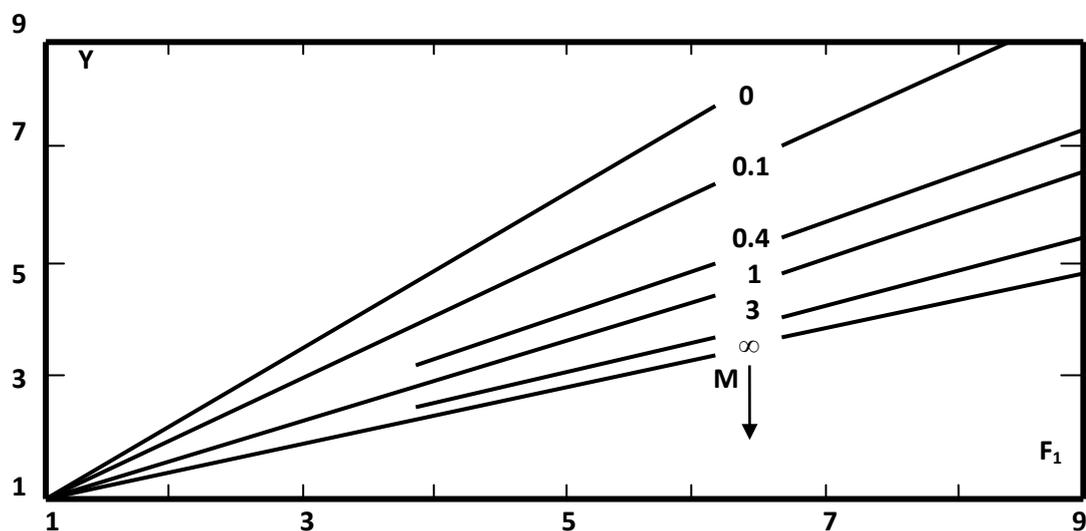


Figure 2.2 : Variation du nombre de *Froude* F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et de la hauteur relative M . $M = 0$: Profil rectangulaire. $0 < M < \infty$: Profil trapézoïdaux.

La figure (2.2) montre clairement que la plus faible valeur du 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.

L'équation de la courbe enveloppe inférieure de la figure (2.2), traduisant la variation du rapport Y du ressaut " triangulaire " en fonction du nombre de *Froude* F_1 , est :

$$F_1^2 = \frac{2Y_T^2(Y_T^2 + Y_T + 1)}{3(Y_T + 1)} \quad (2.4)$$

L'indice " T " indique le profil triangulaire.

L'équation (2.4) montre que Y_T s'exprime de manière fortement implicite en fonction de F_{1T} ; *Hager et Wanoschek* (1987) proposent alors la relation approchée :

$$Y_T = \left(\frac{3}{2} F_{1T}^2 - 1 \right)^{1/3} \quad (2.5)$$

La relation approchée (2.5) montre ainsi que $Y_T \sim F_{1T}^{2/3}$

2.2.1.2. Longueur caractéristique du ressaut

La longueur L_j du ressaut est définie comme étant la distance entre le pied du ressaut et la section à l'aval où la surface libre de l'écoulement est maximale et tend à devenir parallèle au fond du canal. Par contre, la longueur L_r est la longueur sur laquelle s'étend le rouleau de surface.

Sur la figure (2.3) sont représentées les mesures expérimentales de *Rajaratnam* (1964) ($m = 0,58$) et celles de *Hager* et *Wanoschek* (1987) ($m = 1$), qui concernent la longueur relative L_r / h_2 en fonction de nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident. Il apparaît ainsi que la longueur relative L_r / h_2 dépend exclusivement de m et de F_1 . La figure (2.3) montre également que la longueur relative L_r / h_2 croît au fur et à mesure que F_1 augmente et qu'elle décroît avec l'augmentation de m .

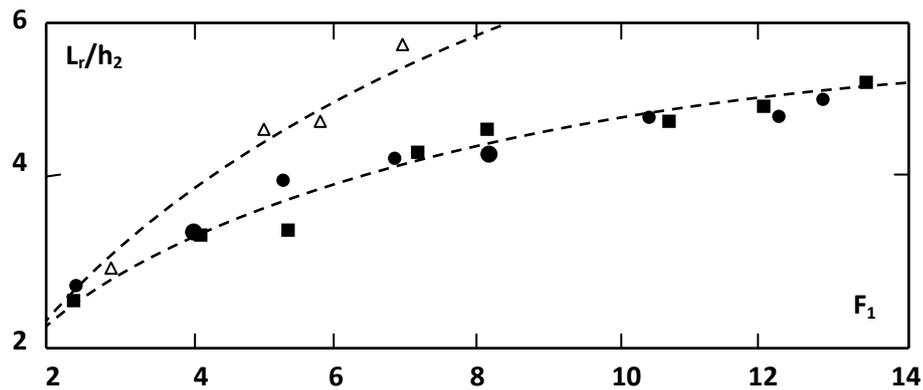


Figure 2.3 : Longueur relative L_r/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de *Froude* F_1 , selon *Hager* et *Wanoschek* (1987) ($m = 1$). (Δ) : $m = 0,58$ selon *Rajaratnam* (1964)

En tenant compte des mesures de *Rajaratnam* (1964) ($m = 0,58$), *Hager* et *Wanoschek* (1987) proposent une relation générale permettant l'évaluation de la longueur relative L_r/h_2 en fonction de F_1 et de m :

$$\frac{L_r}{h_2} = 1,8 \cdot (m)^{0,5} \cdot F_1^{0,4/m} \quad , \quad 0,4 < m \leq 1 \quad (2.6)$$

Ainsi, dans la gamme pratique des nombres de *Froude* de l'écoulement incident tels que $6 \leq F_1 \leq 9$, la longueur relative $\frac{L_r}{h_2}$ du rouleau, pour le cas d'un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° ($m = 1$), est telle que $3,7 \leq \frac{L_r}{h_2} < 4,35$.

En ce qui concerne la longueur relative L_j/h_2 du ressaut " triangulaire ", les mesures expérimentales de *Hager* et *Wanoschek* (1987) ainsi que celles d'*Argyropoulos* (1962) sont représentées sur la figure (2-4), en fonction du nombre de *Froude* F_1 . Nous pouvons alors remarquer, comme pour L_r/h_2 , que la longueur relative L_j/h_2 dépend à la fois du nombre de *Froude* F_1 et du paramètre m . La figure (2.4) montre en outre que L_j/h_2 varie dans le même sens que F_1 et en sens inverse de m . En incluant les mesures d'*Argyropoulos* (1962), *Hager* et *Wanoschek* (1987) proposent de calculer par application de la relation :

$$\frac{L_j}{h_2} = 2,4 \cdot (m)^{0,5} \cdot F_1^{0,4/m}, \quad 0,4 < m \leq 1$$

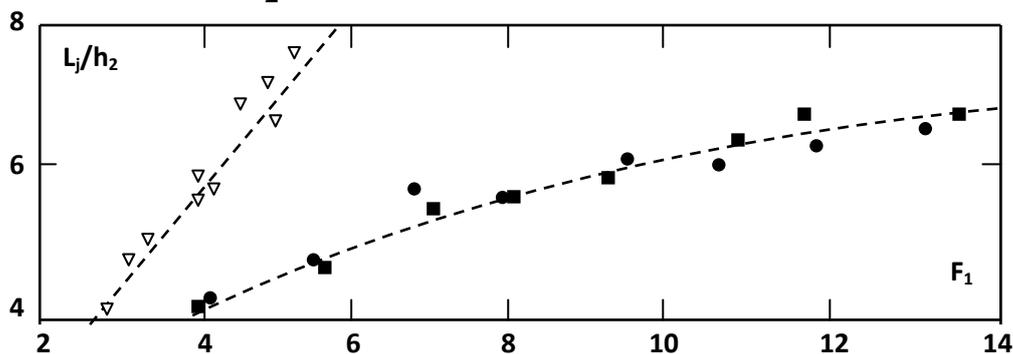


Figure 2.4 : Longueur relative L_j/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de *Froude* F_1 , selon *Hager* et *Wanoschek* (1987) ($m=1$), (∇) : $m = 0,44$ selon *Argyropoulos* (1962).

2.2.1.3. Profil de surface généralisé du ressaut

L'introduction des variables $X = x / L_j$ et $y(x) = [h(x) - h_1] / (h_2 - h_1)$ permet de tracer le long de l'axe longitudinal du canal, le profil de surface du ressaut sous la forme adimensionnelle ; $h(x)$ désigne la hauteur du ressaut à la distance x comptée à partir du pied du ressaut. Pour $x = 0$, correspondant à $X = 0$, nous pouvons écrire que $h(x) = h_1$ et $y = 0$. Par contre, pour $x = L_j$, correspondant à $X = 1$, nous pouvons écrire que $h(x) = h_2$ et $y = 1$.

Les variables adimensionnelles X et $y(x)$ définissant le profil de surface du ressaut le long de l'axe longitudinal du canal sont telles que $0 \leq X \leq 1$ et $0 \leq y \leq 1$.

La figure (2.5) représente les mesures expérimentales de *Hager* et *Wanoschek* (1987) concernant le profil de surface généralisé du ressaut " triangulaire " le long de l'axe longitudinal du canal. Les points de mesures, obtenus pour $6,8 \leq F_1 \leq 11,8$, se situent ainsi sur une même courbe d'équation approchée :

$$y(X) = (1 + \alpha X) \cdot \tanh(\beta X) \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (2.7)$$

" \tanh " désigne la tangente hyperbolique.

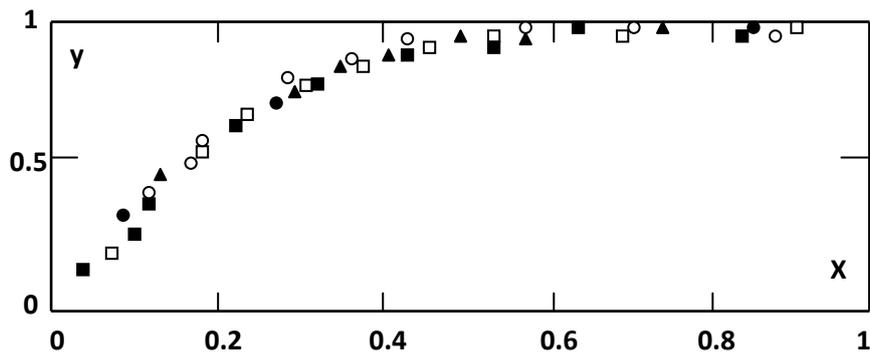


Figure 2.5 : Profil de surface généralisé $y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ($m = 1$), selon Hager et Wanoschek (1987).

La figure (2.5) montre que le profil de surface généralisé est pratiquement linéaire pour la gamme $0 \leq X \leq 0,2$. La droite, représentant la partie linéaire du profil passe par le point des coordonnées (0,0) et coupe approximativement l'axe parallèle à X au point des coordonnées (0,4 ,1) ; le paramètre β figurant dans la relation (2.7) a donc pour valeur : $\beta = \frac{(1-0)}{(0,4-0)} = \frac{1}{0,4}$, soit $\beta = 2,5$. Ainsi, le paramètre α peut être déterminé en écrivant que $y(X = 1) = 1$, soit $1 = (1+\alpha) \cdot \tanh(2,5)$, par suite $\alpha = 0,014$. Le profil de surface généralisé admet donc pour équation :

$$y(X) = (1 + 0,014 \cdot X) \cdot \tanh(2,5 \cdot X) \quad (2.8)$$

Hager et Wanoschek (1987) notent que le profil de surface le long de la paroi inclinée du canal triangulaire (profil latéral) se situe légèrement au-dessous du profil axial précédemment défini.

2.3. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil

2.3.1. Approche de Debabeche et Achour (2007)

2.3.1.1. Position du problème

Dans le cas où un seuil continu est en travers de l'écoulement, les conditions de celui-ci ainsi que la position et la hauteur du seuil, peuvent conduire à deux configurations du ressaut. La première correspond à la formation complète du ressaut à l'amont immédiat du seuil et le ressaut est dit contrôlé (figure 2.6.a), la deuxième correspond à la formation partielle du ressaut de part et d'autre du seuil, le ressaut est alors dit forcé. Pour un nombre de Froude F_1 et une hauteur de seuil s donnés, la variation du niveau de la hauteur d'eau aval est conditionnée par le déplacement vertical d'un second seuil à paroi mince située à l'extrémité aval du canal. Selon la position verticale de ce dernier, trois cas de figure de la surface libre à l'aval peuvent apparaître, correspondants au ressaut forcé de type A, le ressaut forcé type B et de type B-min (figure 2.6.b). Ce dernier type du ressaut

est considéré, selon Bretz (1987) comme étant le plus avantageux du point de vue longueur et hauteur.

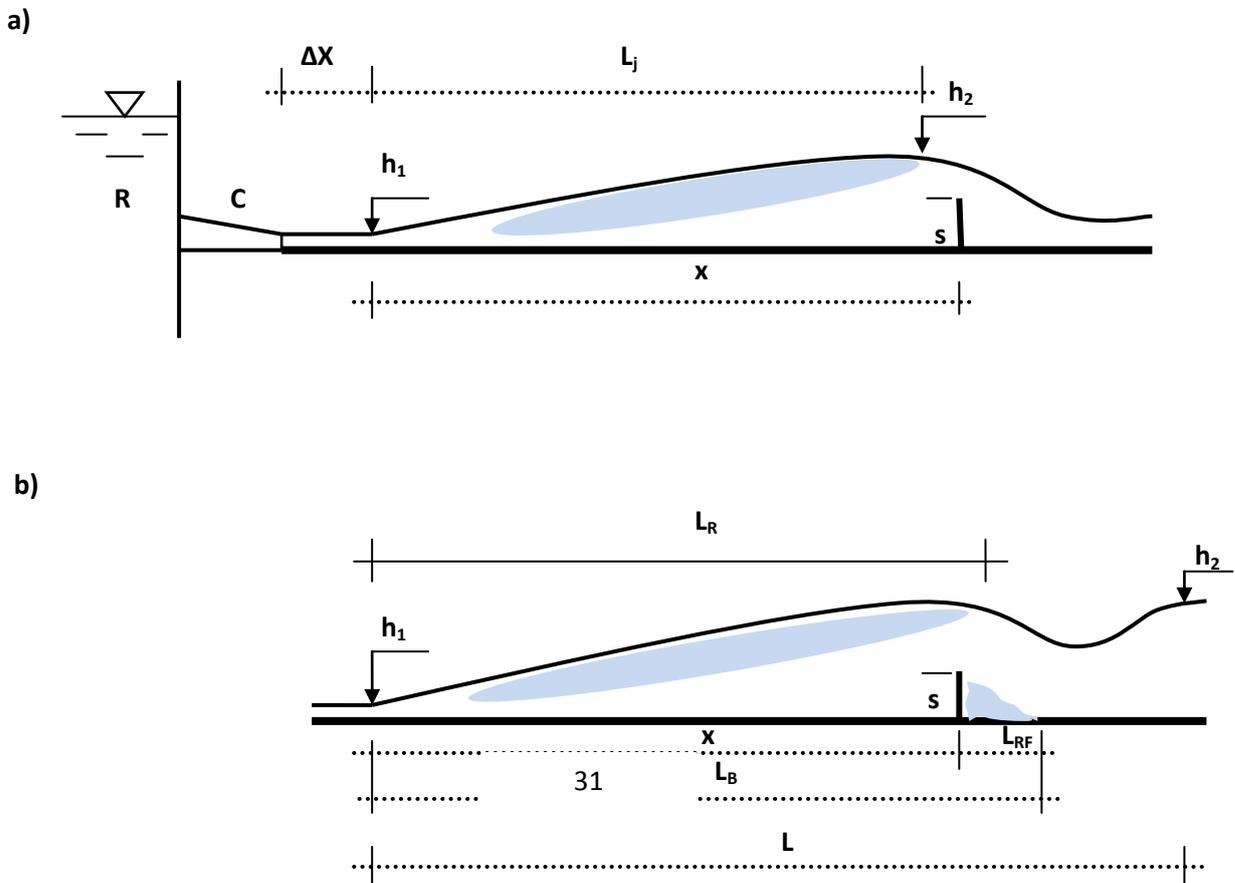


Figure 2.6 : a) Resson contrôlé. b) Resson forcé de type B-min.
 h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x position du seuil par rapport au pied du ressaut, L_j longueur du ressaut, L_{RF} longueur du rouleau de fond, L_B distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval, L distance entre le pied du ressaut et la position où h_2 devient constante. ΔX distance séparant le convergent du pied du ressaut, C convergent, R réservoir.

Afin d'obtenir un profil liquide similaire à celui observé dans le cas d'un seuil à paroi épaisse dans un canal rectangulaire (figure 2.6.a), les essais ont montré que le rapport h_0/L_0 doit être tel que $0,10 \leq h_0/L_0 \leq 0,20$, où h_0 est la hauteur de la lame franchissant le seuil.

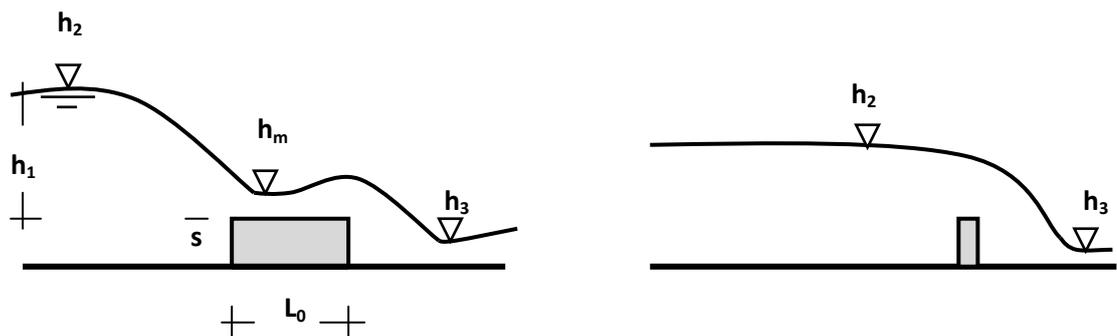


Figure 2.7 : Profil de l'écoulement au-dessus des seuils.
 a) Seuil à paroi épaisse, b) seuil à paroi mince

2.3.1.2. Influence du seuil sur le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Le ressaut n'étant pas encore forcé, théoriquement le seuil ne devrait avoir aucun effet réducteur sur la hauteur finale h_2 du ressaut, puisque celui-ci n'est pas encore forcé. En d'autres termes, la hauteur finale h_2^* du ressaut classique triangulaire doit être égale à la hauteur finale h_2 du ressaut contrôlé par seuil, sous les mêmes conditions de l'écoulement incident. La figure (2.8) montre la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de *Froude* F_1 , d'une part, pour le cas du ressaut contrôlé par le seuil à paroi mince et épaisse, et d'autre part pour le ressaut forcé. Nous avons également représenté la variation du rapport Y^* théorique du ressaut classique triangulaire issu de l'application de l'équation de quantité de mouvement, soit :

$$F_1^2 = \frac{2Y^{*2}(Y^{*2} + Y^* + 1)}{3.(Y^* + 1)} \quad (2.9)$$

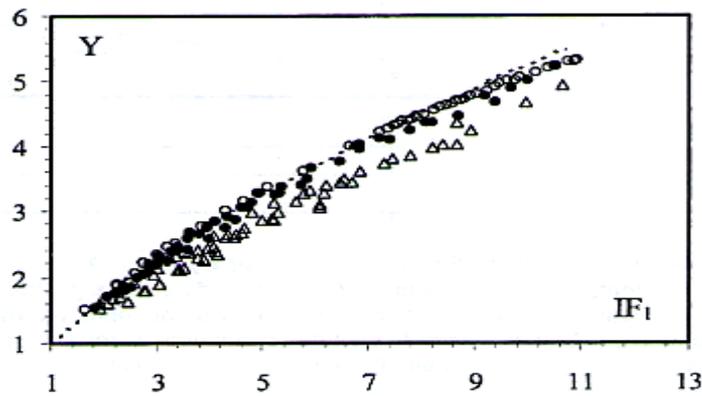


Figure 2.8 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident, dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m = 1$:
 (o) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (•) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse.
 (Δ) Ressaut forcé par seuil à paroi mince. (- - -) Courbe tracé selon la relation (2.9)

La figure (2.8) montre ainsi que l'égalité $Y = Y^*$ n'est satisfaite que pour une certaine gamme de valeurs du nombre de *Froude* incident F_1 . L'influence du seuil à paroi mince (ou épaisse) sur le rapport des hauteurs conjuguées apparaît à des valeurs de F_1 supérieures à 7,50 environ. Cette influence s'accroît avec l'augmentation de F_1 , mais elle n'est pas significative ; nous avons pu observer qu'en effet que pour $F_1 = 11$ l'écart relatif $(Y - Y^*) / Y^*$ est approximativement égal à 5 % pour le seuil à paroi mince et 7 % environ pour le cas du seuil à paroi épaisse.

Par ailleurs, pour les mêmes nombres de *Froude* F_1 , un décalage important, entre les valeurs de Y du ressaut forcé et du ressaut contrôlé sont perceptibles.

En effet, pour des nombres de *Froude* F_1 supérieur à 3, le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut forcé est nettement inférieur à celui du ressaut contrôlé par seuil.

Dans toute la gamme de F_1 que nous avons testé, c'est-à-dire $1,6 \leq F_1 \leq 11$, un ajustement des valeurs expérimentales a montré que la variation de $Y = f(F_1)$ est de type logarithmique :

$$Y = 1 + \alpha \cdot \text{Ln} \left[\frac{(F_1 + 4)}{5} \right] \quad (2.10)$$

$\alpha = 3,96$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

$\alpha = 3,78$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse.

$\alpha = 3,33$ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince.

La condition de criticité est ainsi satisfaite puisque : $F_1 = 1, Y = 1$

L'analyse des mesures expérimentales a montré la possibilité de corrélérer le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil et la hauteur relative S de celui-ci, dans toute la gamme $1,60 \leq F_1 \leq 11$. La figure (2.9) montre la variation expérimentale de Y en fonction de S pour le cas du ressaut contrôlé par seuil à paroi mince et épaisse, et le cas d'un ressaut forcé par seuil mince. Il ressort que cette variation suit une loi linéaire et un ajustement a permis d'écrire avec une bonne approximation, ainsi bien pour le ressaut contrôlé (seuil à paroi épaisse) que pour le ressaut forcé, que :

$$Y = 1 + \beta \cdot S \quad (2.11)$$

$\beta = 0,96$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

$\beta = 1,02$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse.

$\beta = 0,82$ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince.

Pour l'ajustement de ces droites, nous avons pris en considération la condition : $S = 0 \Rightarrow Y = 1$.

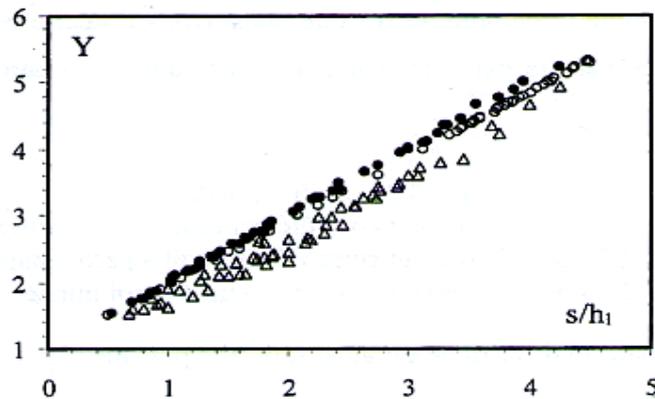


Figure 2.9 : Variation expérimentale du rapport Y hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative S du seuil. Points expérimentaux pour $m = 1$: (○) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (●) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) Ressaut forcé par seuil à paroi mince.

Il ressort des relations (2.10) et (2.11) que la hauteur relative S du seuil peut s'écrire pour les trois cas de figure comme suit :

$$S = \gamma \cdot \text{Ln} \left[\frac{(F_1 + 4)}{5} \right] \quad (2.12)$$

- $\gamma = 4,13$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.
- $\gamma = 3,71$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse.
- $\gamma = 4,06$ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince.

L'expérimentation a d'ailleurs montré la validation de la relation (2.12) pour les trois types du ressaut testés. Les auteurs ont présenté sur la figure (2.10) les résultats obtenus.

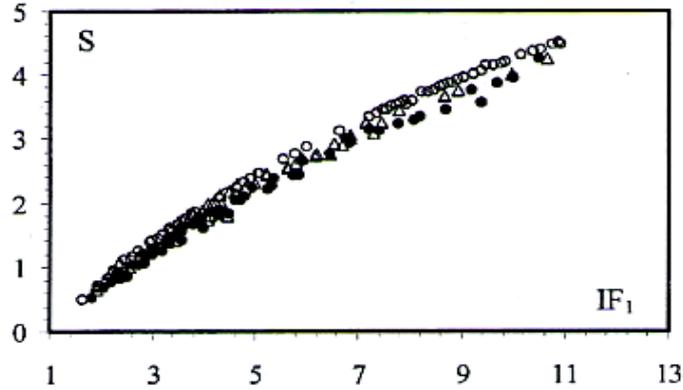


Figure 2.10 : Variation expérimentale de la hauteur relative $S = s / h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 , pour un ressaut évaluant dans un canal triangulaire. Point expérimentaux pour $m = 1$: (\circ) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (Δ) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (\bullet) Ressaut forcé par seuil à paroi mince.

2.3.1.3. Influence du seuil sur la longueur relative du bassin

Comme il est bien illustré dans la figure (2.6), la notion de longueur de bassin diffère pour les trois types du ressaut.

Pour le ressaut contrôlé par seuil mince ou épais, cette longueur correspond à la position x du seuil par rapport au pied du ressaut. Pour ce type du ressaut, cette longueur est caractérisée par un rouleau de surface tandis que pour le ressaut forcé. La longueur L_B du bassin est la somme de la longueur de la position x du seuil et de la longueur du rouleau de fond L_{RF} à l'aval du seuil, par rapport au pied du ressaut ($L_B = x + L_{RF}$).

La figure (2.11) montre la variation expérimentale de la longueur relative $X = x / h_1$ du bassin du ressaut contrôlé par seuil mince, par seuil épais et $X = L_B / h_1$ du ressaut forcé par seuil mince en fonction du nombre de Froude F_1 . Un ajustement, pour les trois types du ressaut, a une équation de type puissance de la forme :

$$X = a \cdot F_1^{0,4} - b \tag{2.13}$$

Les constants a et b sont représentées pour chaque type du ressaut dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.1 : Les constantes a et b de l'équation (2.13)

	ressaut contrôlé		ressaut forcé de type B-min
	Seuil mince	Seuil épais	
a	31,31	28,96	24,06
b	35,42	33,15	25,71

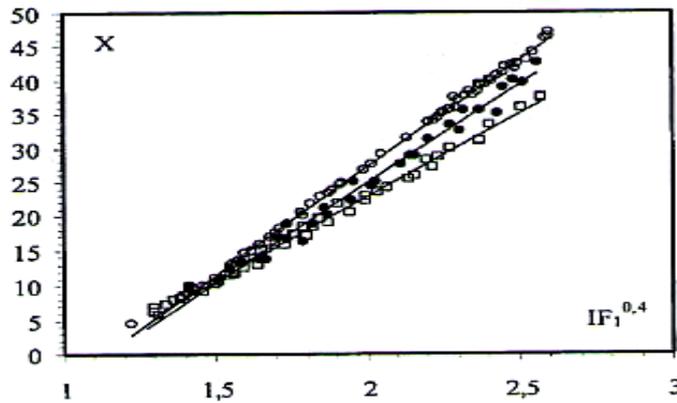


Figure 2.11 : Variation expérimentale de la longueur relative X du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 , pour un ressaut évaluant dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m = 1$: (○) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (●) Ressaut forcé par seuil à paroi mince. (Δ) Courbe d'ajustement.

Un décalage est noté entre x / h_1 du ressaut contrôlé par seuil mince et épais. Pour le même nombre de Froude F_1 le seuil épais réduit plus la longueur du bassin que le seuil mince.

Le décalage est remarquable pour le cas du ressaut forcé. En effet, pour des nombres de Froude incidents supérieurs à 3,5, la longueur relative du bassin du ressaut forcé est largement inférieure à celle du ressaut contrôlé. On observe que pour $F_1 = 11$, l'écart entre x / h_1 et de 20 % environ.

2.4. Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive

2.4.1. Approche de Debabeche et al (2008)

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

2.4.2. Position du problème

Les caractéristiques principales 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 $F_1 = [2Q^2/gm^2h_1^5]^{1/2}$, le rapport $Y = h_2/h_1$ des profondeurs conjuguées du ressaut, la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive, la longueur relative $\lambda_r = L_r/h_1$ du ressaut, la position relative de la marche positive.

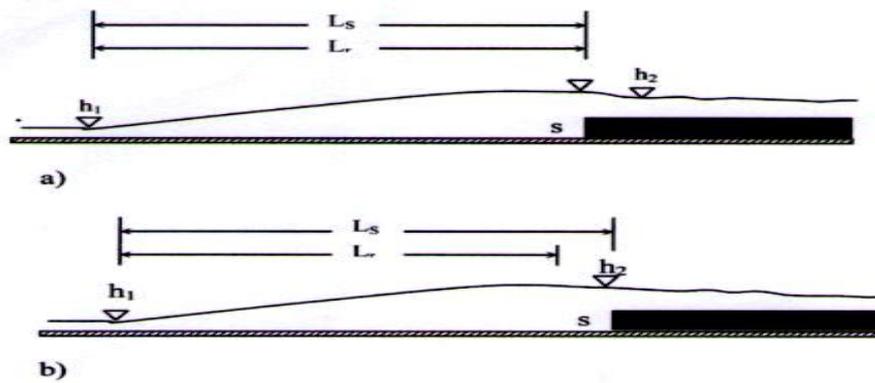


Figure 2.12 : Schéma du ressaut hydraulique provoqué par marche positive : a) forcé de type A et b) contrôlé

Les mesures expérimentales du ressaut hydraulique forcé par marche positive ont été effectuées, dans un canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° , de 3m de longueur. L'expérimentation a été menée sous sept hauteurs initiales : h_1 (mm) = 18, 25, 30, 34, 40, 44 et 51. Une large gamme des nombres de *Froude* incidents a été ainsi obtenue : $2 < F_1 < 20$. La formation du ressaut est conditionnée par la mise en place d'une marche positive en travers de l'écoulement ; pour cela 12 marches ont été confectionnées et testées, de hauteur géométrique allant de 38 à 140 mm et d'une longueur $L_0 = 1$ m.

2.4.3 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure (2.13) 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 contenu représente la relation $Y_A - 1 = f(F_1)$, qui est exprimée par la relation (2.14).

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

$$Y_A - 1 = 3.41 \ln \left(\frac{F_1 + 4}{5} \right) \quad (2.14)$$

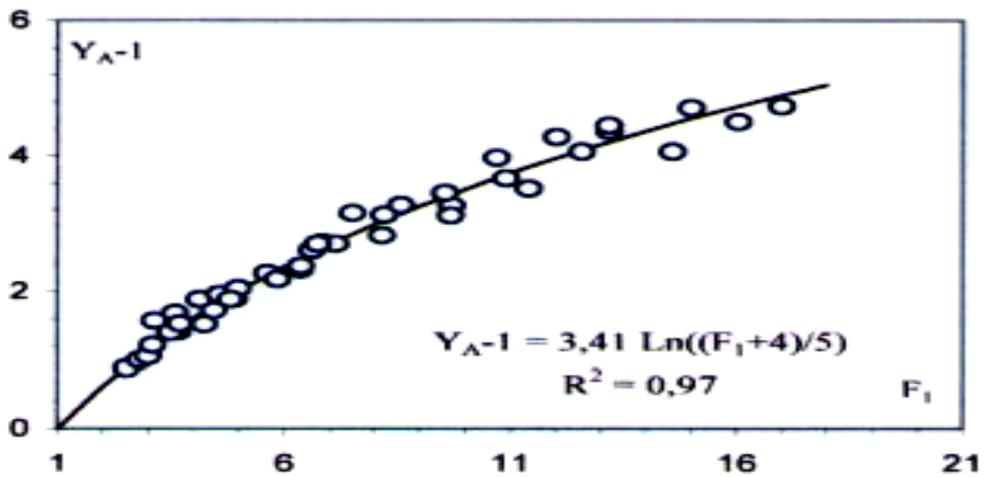


Figure 2.13: Variation expérimentale de $(Y_A - 1)$ en fonction du nombre de Froude F_1 , pour le ressaut de type A. (o) points expérimentaux. (—) courbe selon l'équation (2.14).

2.4.4. 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 :

$$S_A = \frac{s}{h_1} = 2.94 \text{Ln} \left(\frac{F_1 + 4}{5} \right) \quad (2.15)$$

« 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 (2.14) 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 hauteur relative S_A de la marche positive du ressaut nécessaire pour avoir un ressaut de type A.

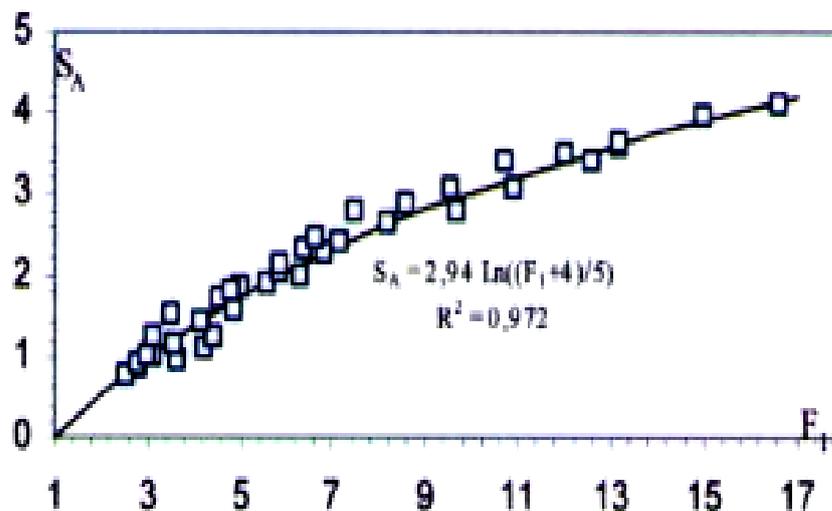


Figure 2.14 : Variation de la hauteur relative S_A de la marche en fonction du nombre de Froude F_1 . (o) points expérimentaux. (—) courbe tracée selon l'équation (2.15)

L'auteur a établi une autre 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 (2.15), un ajustement linéaire a permis d'écrire que :

$$Y_A = 1 + 1.16S_A \quad (2.16)$$

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

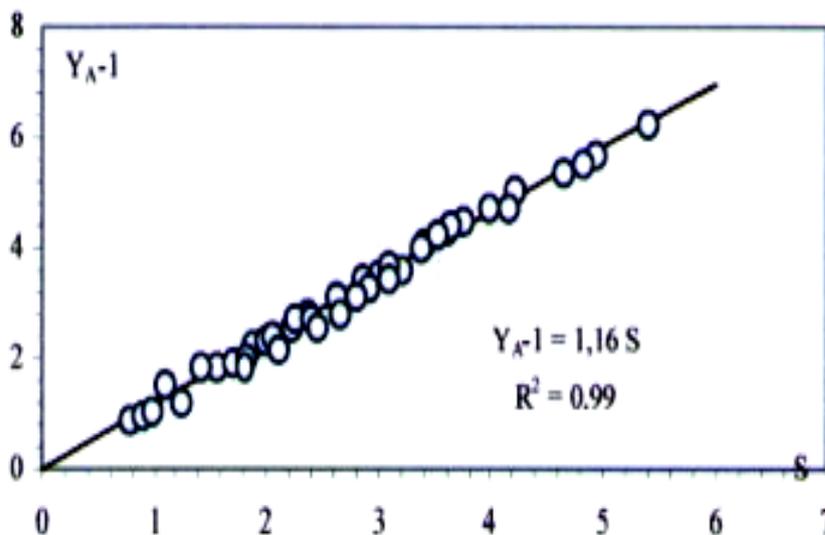


Figure 2.15 : Variation de $(Y_A - 1)$ en fonction de la hauteur relative S_A de la marche positive.
(o) points expérimentaux. (—) droite d'équation : $Y_A - 1 = 1.16S_A$

2.4.5. Position relative de la marche positive

D'autres relations font l'objet de cette étude, l'auteur et à la bases des données expérimentales obtenues à montré que la meilleure représentation graphique adimensionnelle de la fonction $\Phi(S_A, F_1, \lambda_r) = 0$, tels que $S_A = s/h_1$ et $\lambda_r = L_r/h_1$. est celle indiquée par la figure (2.16). 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 λ_r intervenant au phénomène sont liées par la relation (2.17) :

$$S_A + F_1^{0.4} = 0.14\lambda_r + 0.82 \quad (2.17)$$

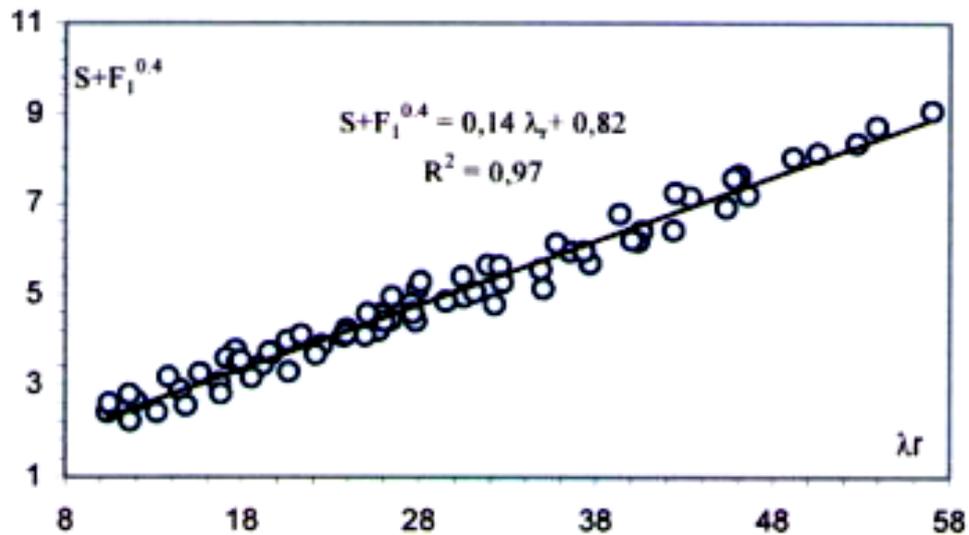


Figure 2.16 : Variation de $(S_A + F_1^{0.4})$ en fonction de la position relative $\lambda_r = Lr/h_1$ de la marche positive. (o) points expérimentaux. (—) courbe tracée selon la relation (2.17)

2.4.6. Longueur relative du bassin

Une relation générale a été également établie entre la longueur relative λ_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 conjuguées h_2 .

Sur la figure (2.17) 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 $\lambda_B = L_B/h_1$ du bassin, du ressaut type A.

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 λ_B intervenant au phénomène sont liées par la relation (2.18).

$$S_A + F_1^{0.4} = 0.13\lambda_B \quad (2.18)$$

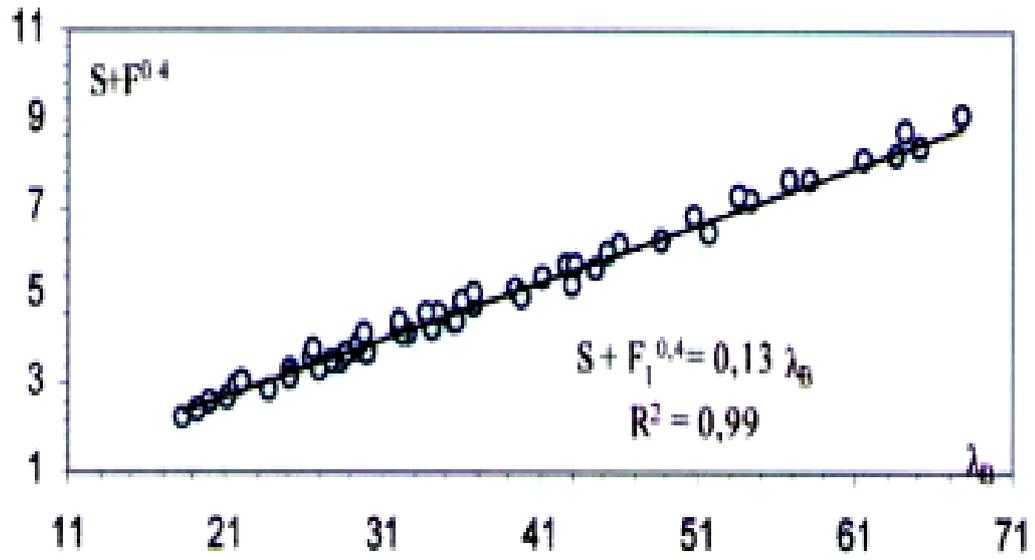


Figure 2.17 : Variation de $(S_A + F_1^{0.4})$ en fonction de la longueur relative $\lambda_B = L_B/h_1$ du bassin. (o) points expérimentaux. (—) courbe tracée selon la relation (2.18).

2.5. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons passé en revue les travaux principaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal triangulaire. Nous avons abordé les travaux de *Hager et Wanoschek* (1987) sur le ressaut classique, les auteurs ont effectué leurs essais sur la forme de canal semi-triangulaire d'angle d'ouverture 45° . En appliquant l'équation de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale d'un canal horizontal de section droite trapézoïdale, la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées Y , en fonction du nombre de *Froude* F_1 , est déduite. Les résultats donnés par la représentation graphique de $Y = f(F_1)$, montrent clairement que la plus faible valeur du Y est obtenue dans le cas du profil triangulaire.

Les caractéristiques géométriques du ressaut, ont été déterminées expérimentalement par *Argyropoulos* (1962), *Rajaratnam* (1964) et *Hager et Wanoschek* (1987), quant à la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de *Froude*. Ces derniers ont déterminé le profil de la surface généralisé $y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire.

Plus loin, nous avons abordé les travaux les plus récents, dans le domaine du ressaut hydraulique en canal triangulaire, particulièrement ceux de *Debabeche et Achour* (2007); les auteurs ont contribué à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par seuil à paroi mince et épaisse. Les recherches expérimentales, effectuées par les auteurs, ont été consacrées à déterminer l'influence du seuil sur le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut d'une part, et d'autre part l'influence du seuil sur la longueur relative du bassin amortisseur.

A la fin de ce chapitre nous avons exposé les travaux de *Debabeche et al.* (2008), concernant l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique évaluant dans un canal triangulaire. Les résultats obtenus ont été validés par ceux de *Debabeche et Achour* (2007), par une étude comparative, entre le ressaut contrôlé par seuil mince, le ressaut contrôlé par seuil épais et le ressaut de type A forcé par marche positive. Ceci est concerné 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 créées, montrent un écart important, entre le ressaut de type A forcé par marche positive et son homologue contrôlé par seuil.

Troisième Chapitre :
Ressaut Hydraulique en canal Trapézoïdal

Chapitre III

Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

3.1. Introduction

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

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

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

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

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

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

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

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

De même pour la longueur caractéristique du ressaut, nous allons aborder à travers ce chapitre un autre paramètre caractéristique du ressaut ; ce paramètre est le rapport des hauteurs conjuguées

Y, obtenu par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut.

3.2. Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

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

3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées

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

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

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

Les centres de gravité des sections initiales et finales sont :

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

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

Les forces de pressions des sections initiales et finales sont :

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

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

L'application de cette équation donne :

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

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

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

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

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

Tels que :

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

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

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

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

L'élément inconnu est $h_2 = ?$

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

3.2.1.1. Cas particulier du canal rectangulaire :

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

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

Ou encore :

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

Et F_1^2 devient :

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

Éléments connus : Q , b , h_1 donnent F_1 .

Éléments inconnus : $h_2 = ?$

L'équation (3.5) conduit à la relation :

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

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

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

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

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

3.2.1.2. Cas particulier du canal triangulaire :

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

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

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

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

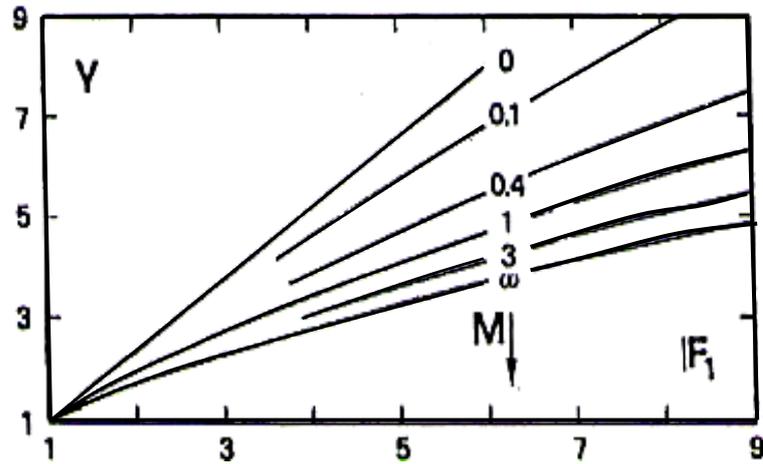


Figure 3.1 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M . $M \rightarrow 0$: profil rectangulaire. $0 < M < \infty$: profils trapézoïdaux.

3.2.2. Longueurs du ressaut

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

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

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

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_2} = 5 \left[1 + 4 \left(\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3.9)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

- h_b : hauteur maximale du rouleau du fond (Figure 3.2)

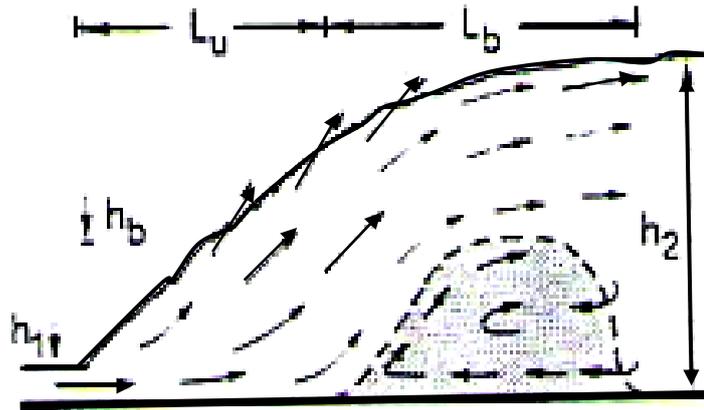


Figure 3.2 : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale

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

3.2.3. Perte de charge relative du ressaut hydraulique

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

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

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

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

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

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

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

On obtiendra :

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

3.2.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire

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

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

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

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

3.2.3.2. Cas du canal triangulaire

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

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

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

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

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

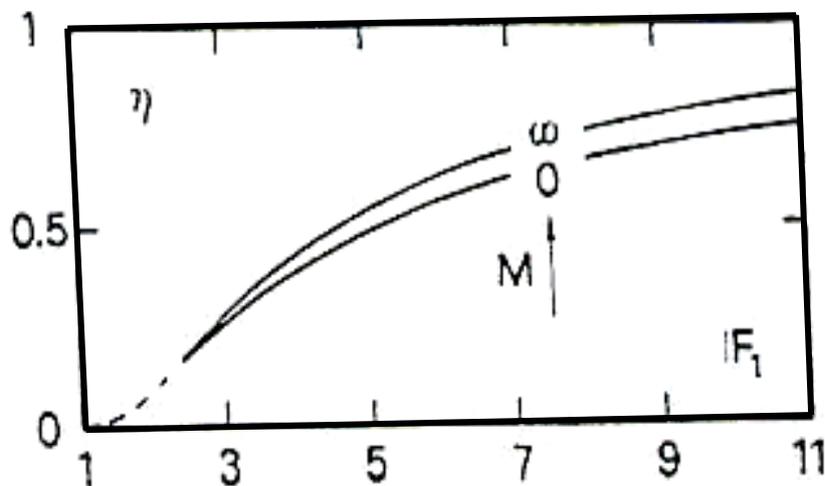


Figure 3.3 : Représentation graphique de la relation (3.12) du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . $M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire.

3.3. Conclusion :

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

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

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

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.

Conclusion de la première partie

L'importance de l'étude bibliographique, se manifeste sur les différents résultats obtenus par chaque auteur et tout dépendra du sujet de recherche abordé ou des conditions de l'expérimentation. Dans cette partie, nous avons examiné les trois cas du ressaut, et chaque cas est représenté dans un chapitre.

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

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

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

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

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

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

hydraulique cité ci-dessus. Les courbes obtenues sont situées au-dessous de celles du ressaut classique. Ce fait indique la réduction nette de la longueur du ressaut forcé par rapport au ressaut classique dans l'intervalle des valeurs du nombre de *Froude* $5 \leq F_1 \leq 13$.

A la fin du premier chapitre, nous avons présenté l'étude de *Negm et Abdel-Azim* (2000) ces derniers annoncent que la cavitation est possible au voisinage de la marche positive, et que le coefficient de la force de pression est négatif au niveau des marches négatives, sous l'effet du ressaut hydraulique. Mais dans le cas de la marche positive ce coefficient est toujours positif et aucune cavitation n'est observée dans les deux cas des ressauts type A et type B.

Concernant le deuxième chapitre, on a passé en revue les travaux principaux, établis par *Hager et Wanoschek* (1987), sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire d'angle d'ouverture 45° . Les auteurs ont appliqué le théorème de la quantité de mouvement entre la section initiale et finale d'un canal horizontal de section trapézoïdale, en déduisant le cas de la section triangulaire. Le but de cette étude était de déterminer la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées Y et le nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident. Les résultats donnés par la représentation graphique de $Y = f(F_1)$, montrent clairement que la plus faible valeur de Y est obtenue dans le cas du profil triangulaire.

Les caractéristiques géométriques de ce type du ressaut hydraulique, ont été déterminées expérimentalement par *Argyropoulos* (1962), *Rajaratnam* (1964) et *Hager et Wanoschek* (1987) ; ces derniers ont évalué les longueurs relatives L_r/h_2 et de L_j/h_2 en fonction du nombre de *Froude* F_1 et de m (pentes de talus). Les auteurs ont remarqué que cette longueur varie dans le même sens que F_1 et ils ont travaillé pour déterminer la surface généralisée $y(x)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire.

Une grande partie de ce chapitre, concerne les travaux les plus récents, dans le domaine du ressaut hydraulique en canal triangulaire. Nous avons cité Ceux de *Debabeche et Achour* (2007), qui ont contribué à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par seuil à paroi mince et épaisse. Leurs recherches expérimentales, ont été consacrées à la détermination de l'influence du seuil sur le rapport des hauteurs conjuguées Y d'une part, et à l'influence du seuil sur la longueur relative X du bassin d'autre part. Ces chercheurs ont établi des relations avec des coefficients pour chaque type du seuil. D'après les courbes obtenues ils ont remarqué qu'il ya un décalage entre la position relative x/h_1 du ressaut contrôlé par seuil mince et celui du seuil épais. Pour le même nombre de *Froude* F_1 le seuil épais réduit beaucoup plus la longueur du bassin que le seuil mince. Ce décalage peut être remarqué aussi dans le cas du ressaut forcé. En effet, pour les nombres de *Froude* supérieurs à 3,5, la longueur relative du bassin du ressaut est largement inférieure à celle du ressaut contrôlé.

Nous avons exposé en suite à travers ce chapitre, les travaux de *Debebech et al* (2008), concernant l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire. Les courbes d'ajustement obtenues ont montré qu'il y a un écart important, entre le ressaut de type A forcé par marche positive et son homologue analysé par *Debabech et Achour* (2007), le ressaut contrôlé par seuil.

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

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

D'après notre recherche bibliographique, nous avons constaté que le comportement du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive, évolue dans un canal trapézoïdal, et que ses principales caractéristiques, n'ont connu que très peu d'études. Plus loin et à travers notre étude théorique et expérimentale, nous allons consacrer notre travail à l'analyse de ce type du ressaut.

Deuxième Partie :
Etude Expérimentale

Introduction à la Deuxième Partie

Les études expérimentales ont comme but de rapprocher le comportement global du phénomène de ressaut hydraulique, afin de valider les contributions théoriques et de faire l'image complète du modèle mathématique, pour une telle configuration du bassin d'amortissement.

Le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal, n'a connu que très peu d'études. Les travaux les plus récents dans ce domaine, sont ceux de *Silvester* (1964), *Wanoschek* et *Hager* (1989) et *Hager* et *Sinniger* (1985). Ces auteurs ont étudié le ressaut hydraulique classique en canal trapézoïdal, alors que le cas du ressaut hydraulique provoqué par marche positive, n'a pas fait l'objet d'étude pour ces chercheurs. C'est ce qui nous a poussés à faire le pas pour aborder cette étude, en nous basant toujours sur les travaux et les résultats obtenus par nos antécédents.

Les travaux de la deuxième partie de notre étude, consistent à analyser expérimentalement les caractéristiques de deux types de ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal à angle d'inclinaison des talus de 73° , muni d'une marche positive, à savoir, le ressaut contrôlé et le ressaut de type A.

L'objet principal de cette étude, 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 la partie de notre étude en deux chapitres :

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

Chapitre I :
Description du Modèle

Chapitre I

Description du model expérimental

1.1. Introduction

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

1.2. Description du canal

Le canal expérimental (figure 1.1) et (figure 1.2) est constitué d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure de section droite trapézoïdal symétrique d'angle d'inclinaison des talus de 73° , par une conduite de PVC circulaire de 115 mm de diamètre. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe (figure 1.3) qui alimente un convergent en charge débouchant dans le canal de mesure. Le canal de mesure de section trapézoïdal et de longueur 5 m est relié, dans sa partie d'aval, à un second canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale (figure 1.4), permettant la mesure directe du débit.

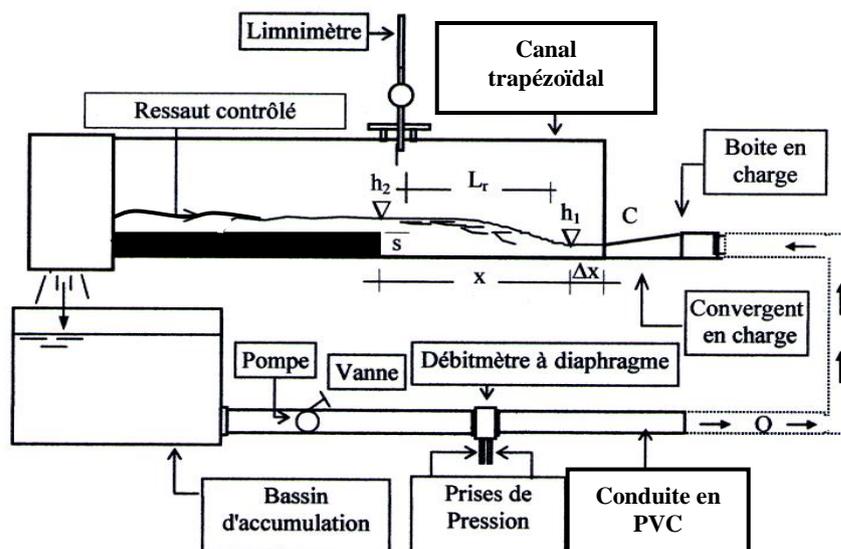


Figure 1.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal, ayant servi à l'expérimentation.



Figure 1.2: Photographie du model expérimentale du canal



Figure 1.3 : Pompe centrifuge axiale

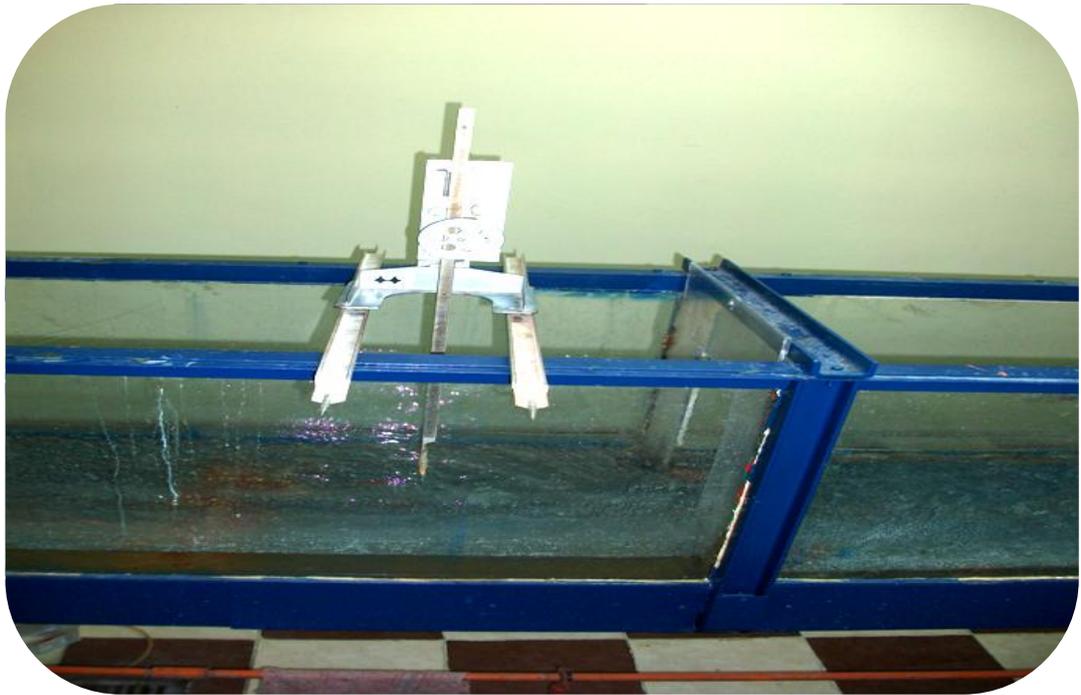


Figure 1.4 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit

Le canal trapézoïdal est relié, dans sa partie amont, à une boîte en charge (figure 1.5). Le rôle de ce convergent est de générer un écoulement incident à grande vitesse. La section de sortie du convergent est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale h_1 du ressaut



Figure 1.5 : Photographie d'une boîte en charge

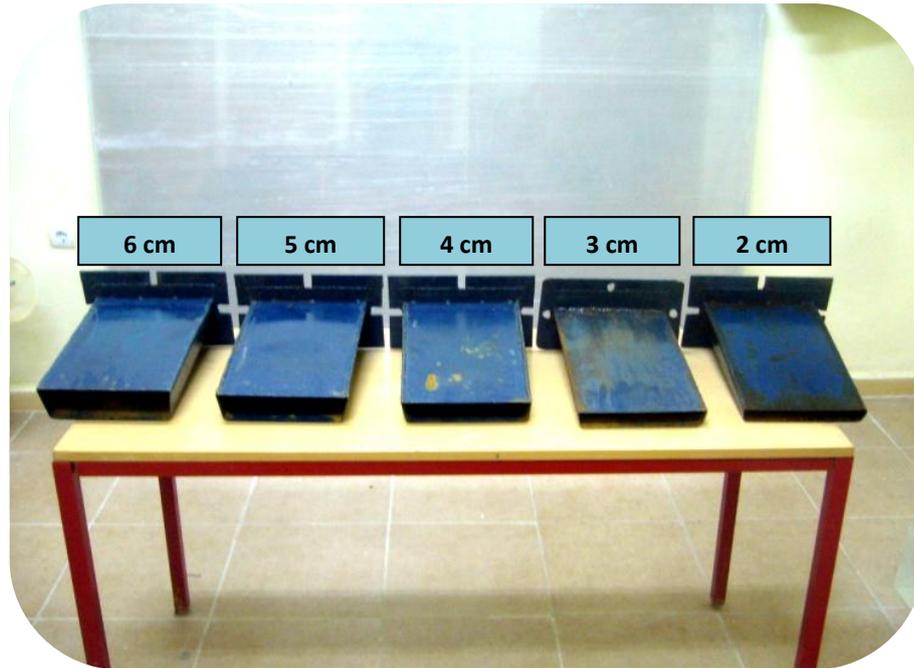


Figure 1.6 : Photographie d'une série de convergent.

Le débit volume Q ainsi que la profondeur h_2 sont les seules grandeurs qui nécessitent un appareillage spécifique. Mais la position x de la marche positive ainsi que sa hauteur géométrique s sont simplement mesurées à l'aide d'un ruban gradué et la hauteur initiale h_1 du ressaut est assimilée à l'ouverture du convergent en charge générant l'écoulement incident ($h_1 = 2 \text{ cm} ; 3 \text{ cm} ; 4 \text{ cm} ; 5 \text{ cm}$ et 6 cm), après avoir positionné le pied du ressaut à environ $\Delta x \approx 5 \text{ cm}$. En mesure la profondeur h_2 à l'aide d'un linimètre à vernier à double précision (figure 1-7). Les mesures de h_2 obtenues seront injectées plu tard dans la formule de *Hachemi Rachedi L.* (2006), pour le débitmètre à déversoir utilisé.

1.3. limnimètre :

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

L'instrument est formé d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnimétrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau (figure 1.7).

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

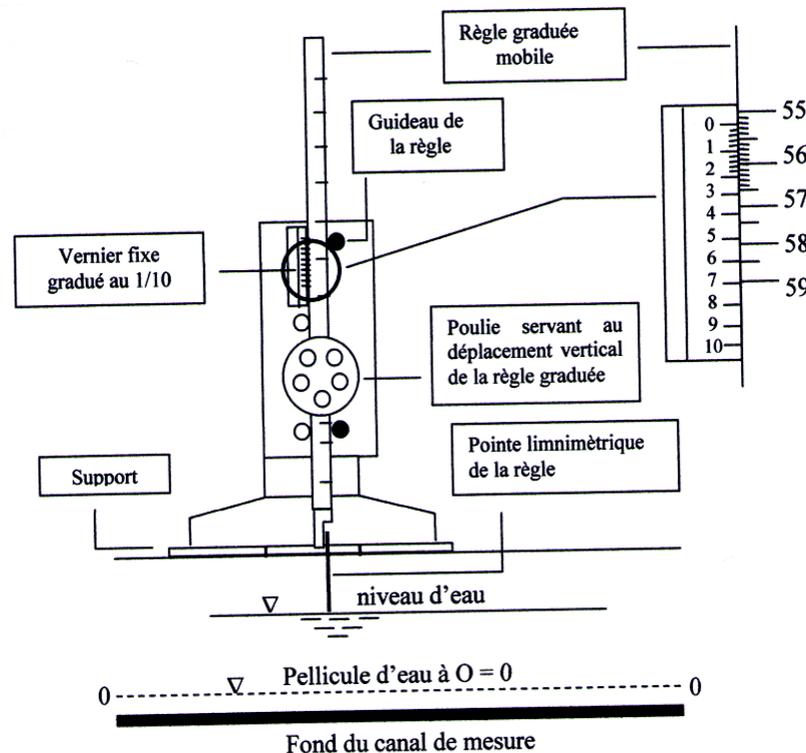


Figure 1.7: Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique

1.4. Les marches positives

Les marches positives utilisées dans notre dispositif expérimental, sont façonnées de plaques de plexiglas assemblées en forme trapézoïdale.

Dans le but d'obtenir un nombre important de points de mesures, nous avons préparé 13 marches positives de longueurs 1 m et de différentes hauteurs (figure 1.8), (figure 1.9) :

$s = 3,6 \text{ cm} ; 4,7 \text{ cm} ; 5,6 \text{ cm} ; 6,5 \text{ cm} ; 7,5 \text{ cm} ; 9,0 \text{ cm} ; 10,0 \text{ cm} ; 11,6 \text{ cm} ; 12,7 \text{ cm} ; 13,9 \text{ cm} ; 14,2 \text{ cm} ; 15,9 \text{ cm}$ et $17,3 \text{ cm}$. Mais pendant les mesures expérimentales on a éliminés les marches de : $14,2 \text{ cm} ; 15,9 \text{ cm}$ et $17,5 \text{ cm}$ puisque ils n'ont pas données de résultats.



Figure 1.8 : Photographie des marches positives testées



Figure 1.9 : Photographie d'une marche positive

1.5. Conclusion :

Nous avons consacré ce chapitre à l'étude du modèle expérimental, qui a servi de base dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal à section droite trapézoïdal, muni d'une marche positive. Dans ce chapitre nous avons abordé les appareils de mesure utilisés dans ce travail de laboratoire nous les avons illustré par des photographies, dans le but de prendre toutes les mesures nécessaires quant aux caractéristiques du ressaut hydraulique.

En ce qui concerne les mesures des débits, nous avons utilisé le débitmètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de *Hachemi Rachedi L. (2006)* vu sont efficacité et nous avons abouti à des résultats acceptables, vus les incertitudes commises sur les lectures de h_2 à cause de l'instabilité du plan d'eau.

La fixation des marches positives sur le fond du canal trapézoïdal, est assurée par leurs poids. L'étanchéité des joins entre la surface extérieure de la marche positive et les parois du canal trapézoïdal est assurée par l'utilisation de la pate à modeler, cette procédure à éliminé tout déplacement de la marche positive vers l'aval pendant les mesures.

Lors de la procédure expérimentale, nous avons éliminé trois marches positives, qui ont été conçues pour effectuer les essais sur le ressaut contrôlé et de type A, vue que la formation du ressaut a été impossible.

Chapitre II :
Etude Expérimentale

Chapitre II

Etude Expérimentale

2.1. Introduction

A travers ce chapitre nous allons analyser expérimentalement les deux types de ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal à angle d'inclinaison des talus de 73° , muni d'une marche positive ; cette analyse concerne le ressaut contrôlé et le ressaut forcé de type A. Par définition, le ressaut hydraulique est considéré comme contrôlé lorsque le rouleau de surface se présente à l'amont de la marche. Il est considéré forcé de type A lorsque la fin du rouleau de surface coïncide verticalement avec le début de la marche positive.

Ce chapitre a nécessité deux sous chapitre : le premier concernera la description des essais et le second se préoccupera de l'analyse des résultats expérimentaux. A la fin de ce chapitre, nous avons proposé une étude comparative entre les deux types de ressaut hydraulique étudiés.

2.2. Description des essais

2.2.1. Position du problème

Le but principal de notre étude expérimentale est d'étudier les caractéristiques de deux types de ressaut hydraulique, à savoir, le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut de type A, forcé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal. Pour ces deux types du ressaut hydraulique nous allons déterminer : le débit volume Q , la hauteur initiale h_1 , mesurée au pied du ressaut par les ouvertures des convergents, la hauteur finale h_2 à l'aide du limnimètre, mesurée au droit de la marche positive pour le cas du ressaut contrôlé et sur la marche pour le ressaut type A, la hauteur s de la marche, la longueur L_r du rouleau, mesurée à l'amont immédiat de la marche pour le cas du ressaut contrôlé et au droit de la marche pour le cas du ressaut type A et la position x de la marche. Ces paramètres sont représentés sous la forme adimensionnelle pour créer 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 $S = s/h_1$ de la marche positive, la longueur relative du rouleau $\lambda_r = L_r/h_1$, la longueur relative du ressaut $\lambda_j = L_j/h_1$ et la position relative de la marche $X = x/h_1$.

Selon la classification de *Hager* et *Bretz* (1986), le ressaut est considéré de type A lorsque le rapport x/L_r est égale à l'unité. Mais dans le cas où le ressaut est contrôlé, ce rapport est supérieur à l'unité.

5.2.2. Procédé de détermination du débit volume Q

Dans le chapitre précédent, on a cité que le canal de mesure trapézoïdal est relié, dans sa partie aval, à un second canal de section rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale (figure 2.4), réalisé et testé par *Hachemi Rachedi L.* (2006), permettant la détermination du débit volume Q . Cette procédure est assurée par l'injection des hauteurs déversantes h_{dev} dans la formule (2.1) en assurant la condition d'application de celle-ci qui est : $\beta < 0.45$, avec $\beta = b/B$.

$$Q = 0.794B\sqrt{2g}\beta(1 + 0.16496\beta^{2.0716})^{3/2}h_{dev}^{3/2} \quad (2.1)$$

Avec : $\beta = b/B$.

Q : le débit en (m^3/s).

B : la largeur du canal en (m).

G : l'accélération de la pesanteur (m^3/s^2).

β : rapport de forme.

b : Largeur de l'échancrure en (m).

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

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

2.2.3. Procédure expérimentale

L'objet de notre étude expérimentale est d'analyser le ressaut hydraulique causé par marche positive, dans un canal trapézoïdale symétrique à angle d'inclinaison du talus de 73° .

Comme il a été signalé précédemment, la mesure de la hauteur initiale h_1 se fait en mesure directe de l'ouverture du convergent testé. Pour celle-ci une série de convergents a été testée tels que : h_1 (mm) = 20, 30, 40, 50 et 60. La valeur du rapport de forme M varie entre 0.031 et 0.093. La gamme des nombres de *Froude* obtenue par ces ouvertures est : $2,34 \leq F_1 \leq 10,64$. Les résultats obtenus par cette large gamme de nombre de *Froude* F_1 , nous a fournis des échantillons de mesures assez significatifs pour les deux types du ressaut étudié.

La formation complète du ressaut est conditionnée par la mise en place d'une marche positive au travers de l'écoulement, pour cela 10 marches ont été préparées et testées, de hauteur géométrique varie de 3.6 cm à 13.9 cm et de longueur $L_0 = 100$ cm.

Dés l'obtention de la forme complète du ressaut, (figure 2.1), nous effectuerons pour chaque hauteur s et position x de la marche les étapes suivantes.

- mesure de la hauteur déversante h_{dev} .
- calcul du débit volume Q par l'application de la relation (2.1).
- calcul du nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident, par l'application de la relation :

$$F_1^2 = \frac{Q^2 \cdot (b + 2m h_1)}{g \cdot A_1^3}.$$

- mesure de la longueur x de la position de la marche positive.
- mesure de la longueur L_r du rouleau.
- mesure de la longueur L_j du ressaut.
- mesure de la hauteur géométrique de la marche positive.
- mesure de la hauteur conjuguée aval h_2 du ressaut.

Pendant l'expérimentation on a remarqué que l'accroissement du nombre de *Froude* F_1 entraîne un déplacement du ressaut vers l'aval ce qui provoque une augmentation de la longueur L_r de son rouleau, donc pour ramener le pied du ressaut à sa position initiale (à la sortie de l'écoulement), il est nécessaire de déplacer la marche vers l'aval et d'augmenter sa hauteur s .

Pour donner une idée claire de la formation du ressaut provoqué par marche positive, dans un canal trapézoïdal, les figures 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 et 5.6 illustrent deux types de ressaut, à savoir le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive et le ressaut type A, forcé par marche positive.

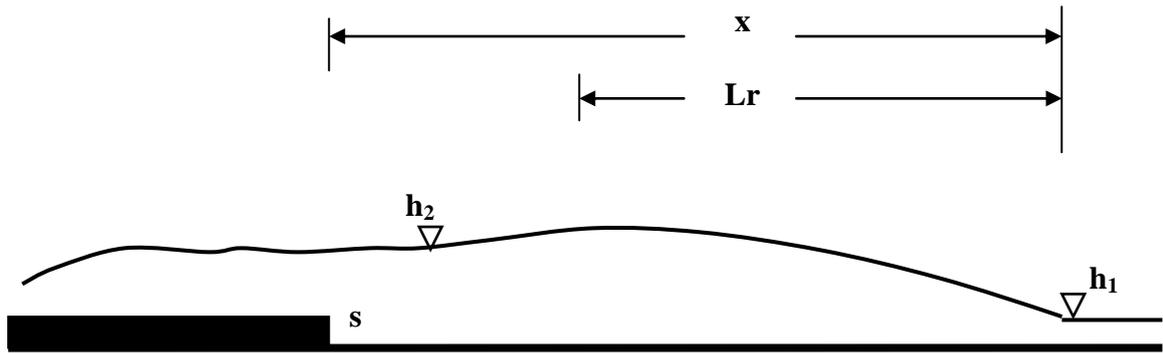


Figure 2.1 : Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive



Figure 2.2: Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal. Vue de profil

Pour: $h_1 = 3 \text{ cm}$, $F_1 = 4,33$, $s = 5,6 \text{ cm}$, $x = 170 \text{ cm}$, $L_r = 109 \text{ cm}$, $L_j = 120 \text{ cm}$, $h_2 = 15 \text{ cm}$



Figure 2.3: Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal. Vue de face

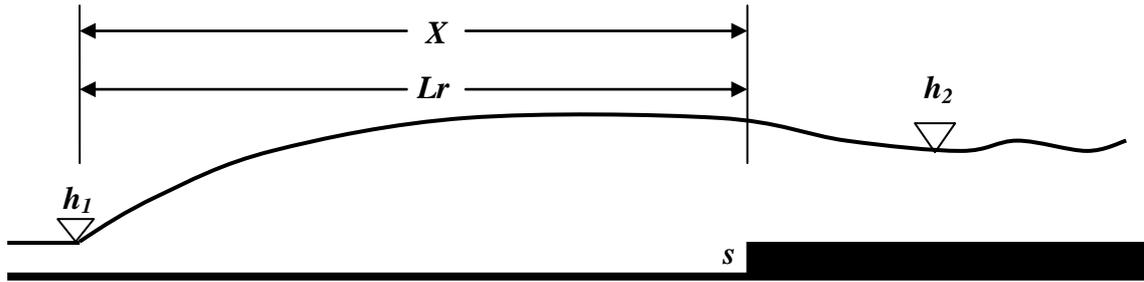


Figure 2.4 : Ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive.

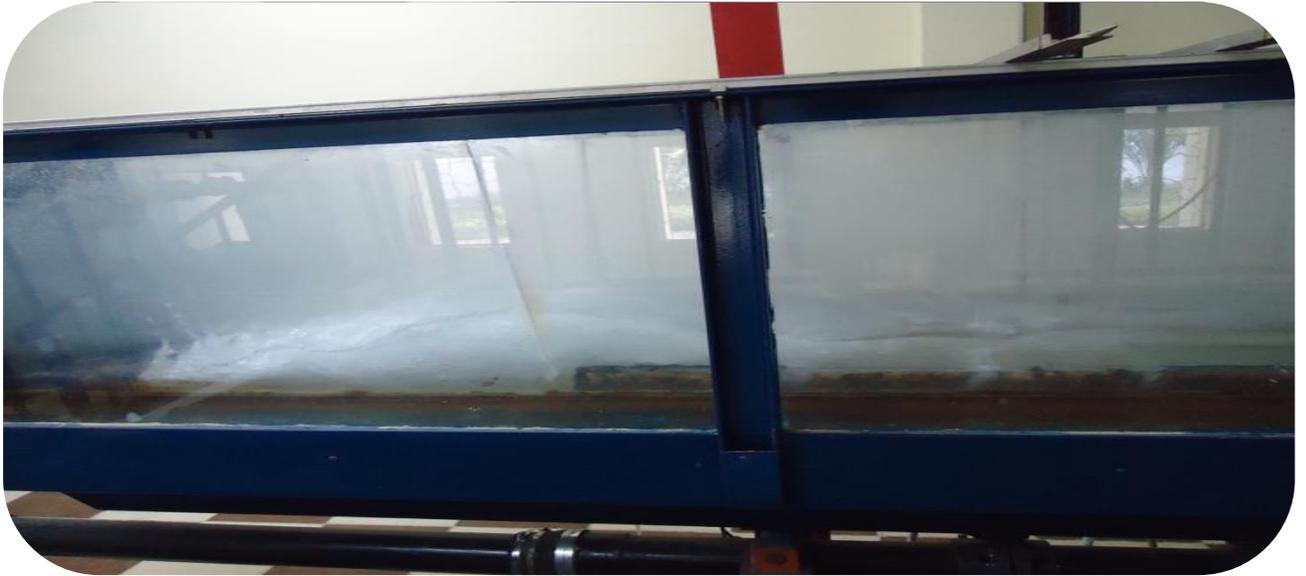


Figure 2.5: Photographie d'un ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal. Vue de profil

Pour: $h_1 = 3 \text{ cm}$, $F_1 = 6,02$, $s = 8,4 \text{ cm}$, $x = 183 \text{ cm}$, $h_2 = 8,4 \text{ cm}$



Figure 2.6: Photographie d'un ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal. Vue de face

2.3. Analyse des résultats expérimentaux

2.3.1. Ressaut hydraulique contrôlé

2.3.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La représentation graphique des résultats expérimentaux, des paramètres de la fonction $Y = f(F_1, M)$, est donnée par la figure (2.7.a). Ces paramètres adimensionnels sont le rapport des hauteurs conjuguées Y le nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident et le rapport de forme M .

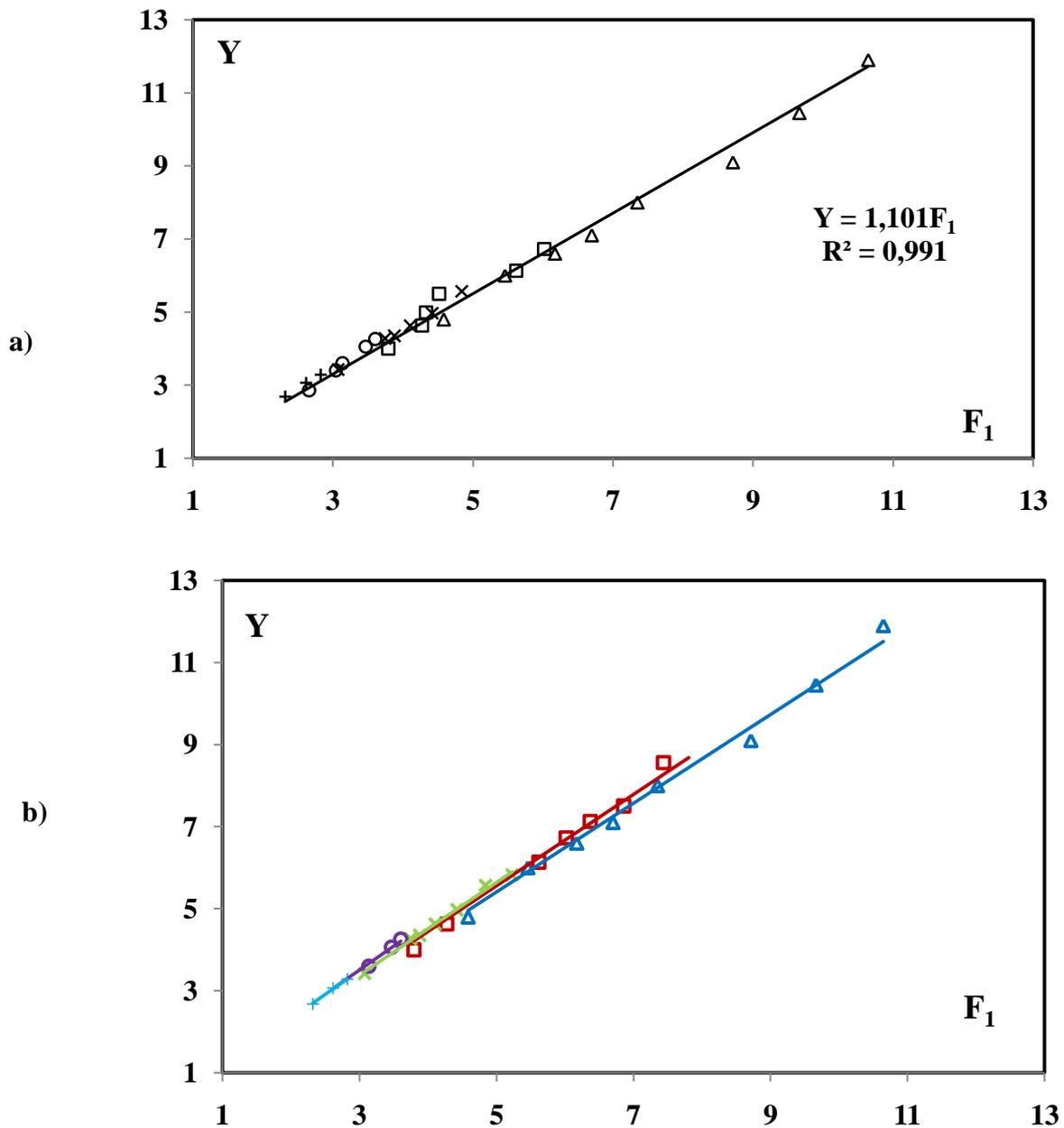


Figure 2.7 : a) Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour le ressaut contrôlé. ; (—) Courbe d'ajustement.

b) (—) Courbes d'ajustement pour chaque valeurs du rapport de forme M . Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) $M= 0,031$; (Φ) $M= 0,046$; (ω) $M= 0,062$; (ϕ) $M= 0,077$; $(+)$ $M= 0,093$

D'après la figure (2.7.b) on remarque que l'influence du rapport de forme M est très faible, vue que les valeurs de M sont très rapprochées. Dans ce cas les courbes d'ajustement obtenues se confondent et peuvent être remplacées par une courbe unique. Et que l'augmentation de la valeur du M provoque une diminution du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut.

L'ajustement des valeurs expérimentales par la méthode des moindres carrés a montré 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 (2.2) suivante :

$$Y = 1,101F_1 \quad (2.2)$$

$$\text{Pour : } 2,32 \leq F_1 \leq 10,64$$

Selon les données du modèle expérimental, la gamme de variation du rapport de forme $M = (mh_1)/b$ est donnée par : $0,031 \leq M \leq 0,093$.

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

Tableau 2.1 : Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de Y en fonction de F_1 .

Y_{exp}	F_1	Y_{rel}	$\Delta Y = (Y_{\text{exp}} - Y_{\text{rel}})/Y_{\text{exp}}$ %	Y_{exp}	F_1	Y_{rel}	$\Delta Y = (Y_{\text{exp}} - Y_{\text{rel}})/Y_{\text{exp}}$ %
4,80	4,58	5,04	5,05	3,42	3,07	3,38	1,17
6,00	5,46	6,01	0,19	4,27	3,75	4,12	3,31
6,60	6,17	6,79	2,93	4,35	3,88	4,27	1,80
7,10	6,70	7,37	3,90	4,62	4,10	4,51	2,29
8,00	7,35	8,09	1,15	4,97	4,42	4,86	2,08
9,10	8,71	9,58	5,38	5,57	4,84	5,32	4,33
1,45	9,66	10,63	1,78	2,86	2,66	2,92	2,40
11,90	10,64	11,71	1,56	3,40	3,04	3,34	1,56
4,00	3,79	4,17	4,32	3,60	3,14	3,45	3,97
4,63	4,27	4,70	1,54	4,06	3,47	3,82	5,90
5,00	4,33	4,76	4,65	4,26	3,60	3,96	6,96
5,50	4,52	4,97	9,52	2,68	2,32	2,55	4,69
6,13	5,61	6,17	0,76	3,07	2,62	2,88	6,04
6,73	6,02	6,62	1,52	3,28	2,82	3,10	5,34

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 75 % des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du Y et les valeurs issues de la relation (2.2) sont inférieurs à 5%.

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 et le rapport de forme M, a donné une droite unique qui ne passe pas par l'origine (figure 2.8). On remarque que les variations du rapport de forme M n'ont aucune influence sur l'allure de cette courbe.

L'ajustement des données expérimentales par la méthode des moindres carrés a donné la relation (2.3) pour une gamme du rapport de forme M : $0,031 \leq M \leq 0,093$.

$$Y = 1,541S + 2,050 \quad (2.3)$$

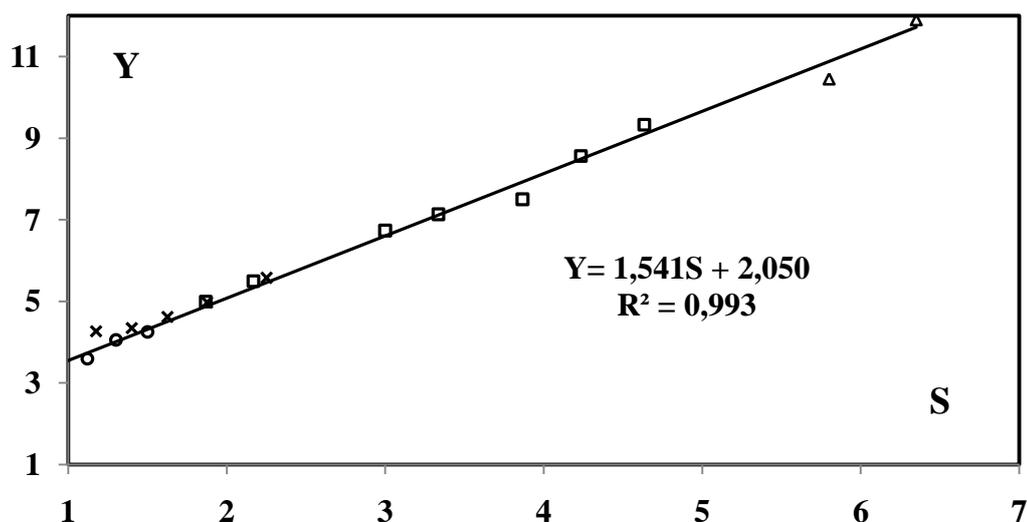


Figure 2.8 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative S de la marche positive. Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) $M= 0,031$; (Φ) $M= 0,046$; (ω) $M= 0,062$; (φ) $M= 0,077$;

Les données expérimentales qui en servi au traçage de la fonction $Y = f(S)$, sont regroupées dans le tableau 2.2 :

Tableau 2.2 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $Y = f(S)$

Y_{exp}	S	Y_{rel}	$\Delta Y = (Y_{exp} - Y_{rel}) / Y_{exp}$ %	Y_{exp}	S	Y_{rel}	$\Delta Y = (Y_{exp} - Y_{rel}) / Y_{exp}$ %
4,80	1,80	4,82	0,50	4,27	1,17	3,85	9,77
6,00	2,35	5,67	5,48	4,35	1,40	4,20	3,28
7,10	3,25	7,05	0,59	4,62	1,62	4,54	1,59
8,00	3,75	7,82	2,14	4,97	1,87	4,93	0,77
9,10	4,50	8,98	1,27	5,57	2,25	5,51	0,95
9,75	5,00	9,75	0,05	2,86	0,72	3,15	10,47
10,45	5,80	10,98	5,15	3,40	0,94	3,49	2,90
11,90	6,35	11,83	0,54	3,60	1,12	3,77	4,89
4,00	1,20	3,89	2,52	4,06	1,30	4,05	0,17
4,63	1,57	4,46	3,47	4,26	1,50	4,36	2,38
5,00	1,87	4,93	1,37	2,68	0,60	2,97	10,99
5,50	2,17	5,39	1,93	3,07	0,78	3,25	5,93
6,73	3,00	6,67	0,85	3,28	0,93	3,48	6,19
3,42	0,90	3,43	0,49				

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 75 % des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du Y et les valeurs issues de la relation (2.3) sont inférieurs à 5%.

L'analyse des résultats expérimentales a montré qu'il ya une relation entre le rapport Y des hauteurs conjuguées, la position relative $X = x/h_1$ de la marche positive et le rapport de forme $M = (mh_1)/b$, 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 non linéaire a abouti à une droite unique, représentée par la relation (2.4), pour une gamme du rapport de forme M : $0,031 \leq M \leq 0,093$.

$$Y = 0,083 X + 0,898 \quad (2.4)$$

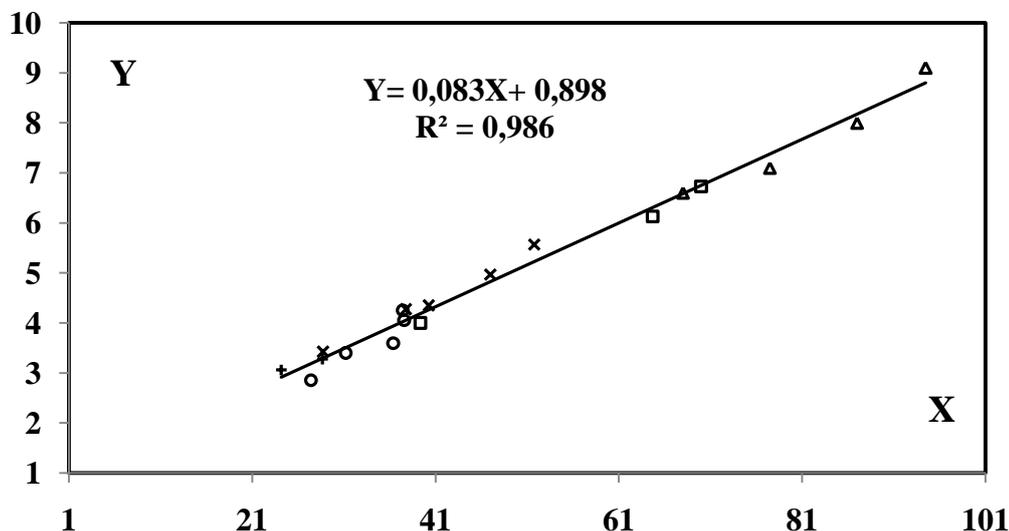


Figure 2.9: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de la position relative X de la marche positive. Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) $M = 0,031$; (Φ) $M = 0,046$; (ω) $M = 0,062$; (φ) $M = 0,077$; (+) $M = 0,093$; (—) Courbe d'ajustement.

D'après la figure (2.9) on remarque que les valeurs du rapport de forme M n'ont aucune influence sur l'allure de la courbe obtenue. Les mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la fonction $Y = f(X)$, sont représentés par le tableau 2.3 :

Tableau 2.3 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $Y = f(X)$

Y_{exp}	X	Y_{rel}	$\Delta Y = (Y_{\text{exp}} - Y_{\text{rel}}) / Y_{\text{exp}}$ %	Y_{exp}	X	Y_{rel}	$\Delta Y = (Y_{\text{exp}} - Y_{\text{rel}}) / Y_{\text{exp}}$ %
6,60	68,00	6,54	0,88	5,57	51,75	5,19	6,76
7,10	77,50	7,33	3,25	2,86	27,40	3,17	10,92
8,00	87,00	8,11	1,49	3,40	31,20	3,48	2,58
9,10	94,50	8,74	3,94	3,60	36,40	3,91	8,87
4,00	39,33	4,16	4,06	4,06	37,60	4,01	1,01
6,13	64,67	6,26	2,21	4,26	37,40	4,00	6,05
6,73	70,00	6,70	0,33	3,07	24,17	2,90	5,40
3,42	28,75	3,28	3,97	3,28	28,67	3,27	0,07
4,27	37,75	4,03	5,59				
4,35	40,25	4,23	2,56				
4,97	47,00	4,79	3,44				

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 70 % des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du Y et les valeurs issues de la relation (2.4) sont inférieurs à 5%.

2.3.1.2. Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de Froude

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

La figure (2.10) illustre la forme de la courbe obtenue. L'ajustement des couples des valeurs expérimentales (S, F_1) , par la méthode des moindres carrés non linéaire a montré que la fonction $S = f(F_1)$ est une droite représenté par la relation (2.5), pour une gamme du rapport de forme $0,031 \leq M \leq 0,077$.

Pour : $2,66 \leq F_1 \leq 10,64$:
$$S = 0,713F_1 - 1,186 \quad (2.5)$$

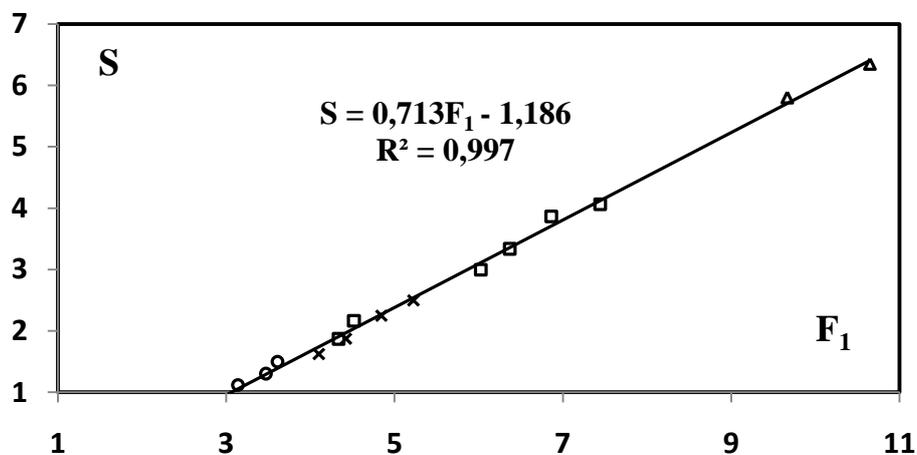


Figure 2.10: Variation expérimentale de la hauteur relative $S=s/h_1$ de la marche positive, en fonction du nombre de Froude. Les motifs représentent les points expérimentaux pour : $(\Delta) M= 0,031$; $(\Phi) M= 0,046$; $(\omega) M= 0,062$;

Les mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la fonction $S = f(F_1)$, sont représentés par le tableau 2.4 :

Tableau 2.4 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $S = f(F_1)$

S_{exp}	F_1	S_{rel}	$\Delta S = (S_{exp} - S_{rel})/S_{exp}$ %	S_{exp}	F_1	S_{rel}	$\Delta S = (S_{exp} - S_{rel})/S_{exp}$ %
5,80	9,66	5,69	1,73	1,87	4,42	1,96	5,00
6,35	10,64	6,39	0,76	2,25	4,84	2,26	0,57
1,87	4,33	1,89	1,57	2,50	5,22	2,53	1,35
2,17	4,52	2,03	6,23	0,72	2,66	0,70	1,59
3,00	6,02	3,10	3,48	0,94	3,04	0,97	4,20
3,33	6,36	3,34	0,50	1,12	3,14	1,05	6,18
3,87	6,86	3,70	4,31	1,30	3,47	1,28	1,07
4,07	7,44	4,11	1,15	1,50	3,60	1,37	8,08
1,62	4,10	1,73	7,12				

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 77 % des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du S et les valeurs issues de la relation (2.5) sont inférieurs à 5%.

2.3.1.3. Position relative de la marche en fonction de nombre de Froude

L'analyse des résultats expérimentaux 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 le ressaut. La figure (2.11) montre que la représentation graphique des points expérimentaux de la fonction $X = f(F_1)$ est une fonction linéaire pour la gamme $0,031 \leq M \leq 0,093$. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés non linéaire a abouti à la relation (2.6) de la forme $Y = ax + b$.

$$X = 12,94F_1 - 9,038 \quad (2.6)$$

Pour : $2,62 \leq F_1 \leq 7,35$ et $0,031 \leq M \leq 0,093$

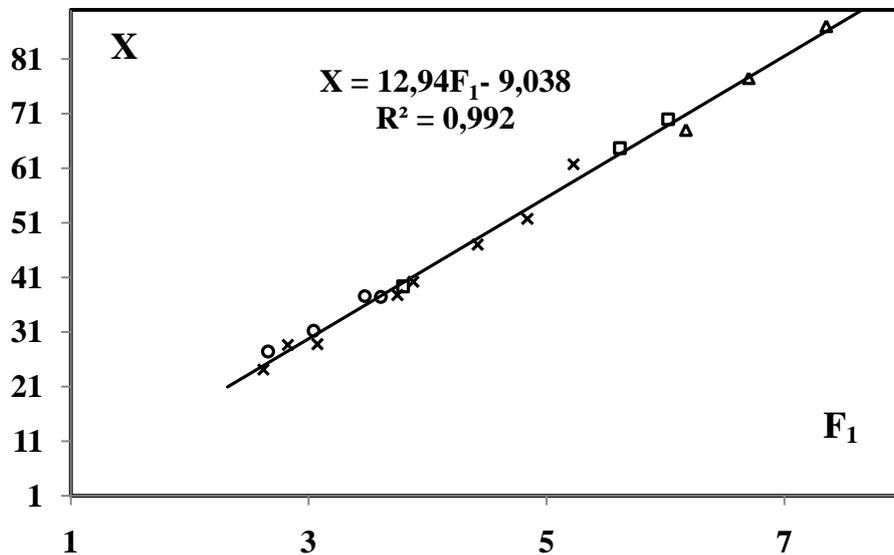


Figure 2.11: Variation expérimentale de la position relative $X = x/h_1$ de la marche positive en fonction du nombre de Froude F_1 . Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) $M= 0,031$; (Φ) $M= 0,046$; (ω) $M= 0,062$; (ϕ) $M= 0,077$; (—) Courbe d'ajustement.

Les mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la fonction $X = f(F_1)$, sont représentés par le tableau 2.5 :

Tableau 2.5 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $X = f(F_1)$

X_{exp}	F_1	X_{rel}	$\Delta X = (X_{exp} - X_{rel})/X_{exp}$ %	X_{exp}	F_1	X_{rel}	$\Delta X = (X_{exp} - X_{rel})/X_{exp}$ %
68,00	6,17	70,80	4,12	51,75	4,84	53,59	3,56
77,50	6,70	77,66	0,21	61,75	5,22	58,50	5,25
87,00	7,35	86,07	1,07	27,40	2,66	25,38	7,36
39,33	3,79	40,00	1,72	31,20	3,04	30,29	2,89
64,67	5,61	63,55	1,72	37,60	3,47	35,86	4,62
70,00	6,02	68,86	1,63	37,40	3,60	37,54	0,39
28,75	3,07	30,68	6,74	24,17	2,62	24,86	2,87
37,75	3,75	39,48	4,60	28,67	2,82	27,45	4,25
40,25	3,88	41,16	2,28				
47,00	4,42	48,15	2,46				

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 84 % des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du X et les valeurs issues de la relation (2.6) sont inférieurs à 5%.

2.3.1.4. Longueur relative du rouleau λ_r

D'après nos résultats expérimentaux, on a constaté qu'il y'a une relation unique liant la longueur relative $\lambda_r = L_r/h_1$, et le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. La figure (2.12) illustre la représentation graphique de la fonction $\lambda_r = f(F_1)$, ces une équation d'une droite de la forme $y = ax + b$. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés a donné la relation (2.7) suivante :

$$\lambda_r = 7,625F_1 \quad (2.7)$$

$$\text{Pour : } 2,62 \leq F_1 \leq 10,64 \quad \text{et} \quad 0,031 \leq M \leq 0,093$$

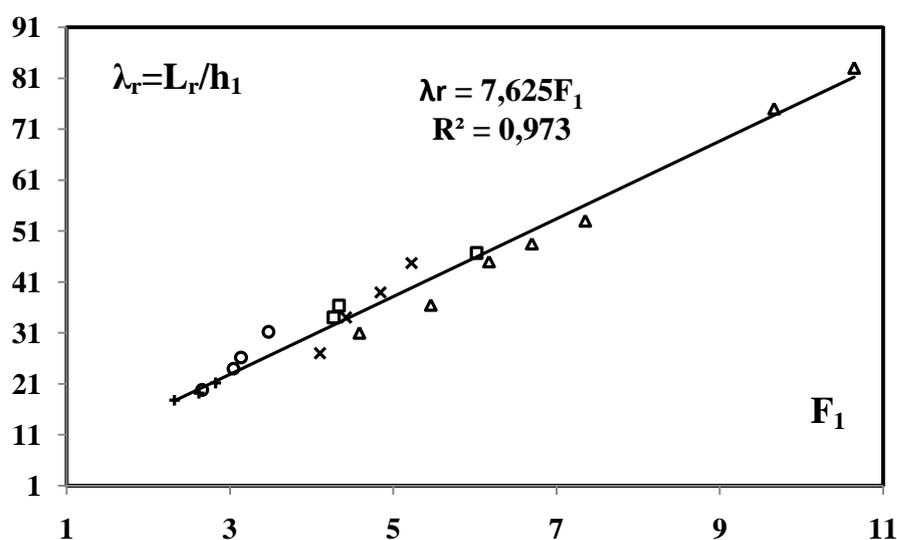


Figure 2.12 : Variation expérimentale de la longueur relative du rouleau $\lambda_r = L_r/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 . Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) $M = 0,031$; (Φ) $M = 0,046$; (ω) $M = 0,062$; (φ) $M = 0,077$; (—) Courbe d'ajustement.

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction $\lambda_r = f(S)$, sont représentés dans le tableau (2.6) :

Tableau 2.6 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_r = f(F_1)$

$\lambda_{r_{exp}}$	F_1	$\lambda_{r_{rel}}$	$\Delta\lambda_r = (\lambda_{r_{exp}} - \lambda_{r_{rel}}) / \lambda_{r_{exp}}$ %	$\lambda_{r_{exp}}$	F_1	$\lambda_{r_{rel}}$	$\Delta\lambda_r = (\lambda_{r_{exp}} - \lambda_{r_{rel}}) / \lambda_{r_{exp}}$ %
31,00	4,58	34,92	12,65	34,00	4,42	33,70	0,87
36,50	5,46	41,63	14,06	39,00	4,84	36,90	5,37
45,00	6,17	47,04	4,55	44,75	5,22	39,80	11,06
48,50	6,70	51,08	5,34	19,80	2,66	20,28	2,44
53,00	7,35	56,04	5,74	24,00	3,04	23,18	3,42
75,00	9,66	73,65	1,79	26,20	3,14	23,94	8,62
83,00	10,64	81,13	2,25	31,20	3,47	26,45	15,20
34,00	4,27	32,55	4,24	17,83	2,32	17,69	0,79
36,33	4,33	33,01	9,12	19,17	2,62	19,97	4,21
46,67	6,02	45,90	1,64	21,17	2,82	21,50	1,57
27,00	4,10	31,26	15,79				

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 52 % des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du λ_r et les valeurs issues de la relation (2.7) sont inférieurs à 5%.

Les résultats expérimentales 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 (2.13) 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 a abouti à la relation (2.8) :

$$\lambda_r = 11,06S + 12,93 \quad (2.8)$$

Pour : $0,031 \leq M \leq 0,093$

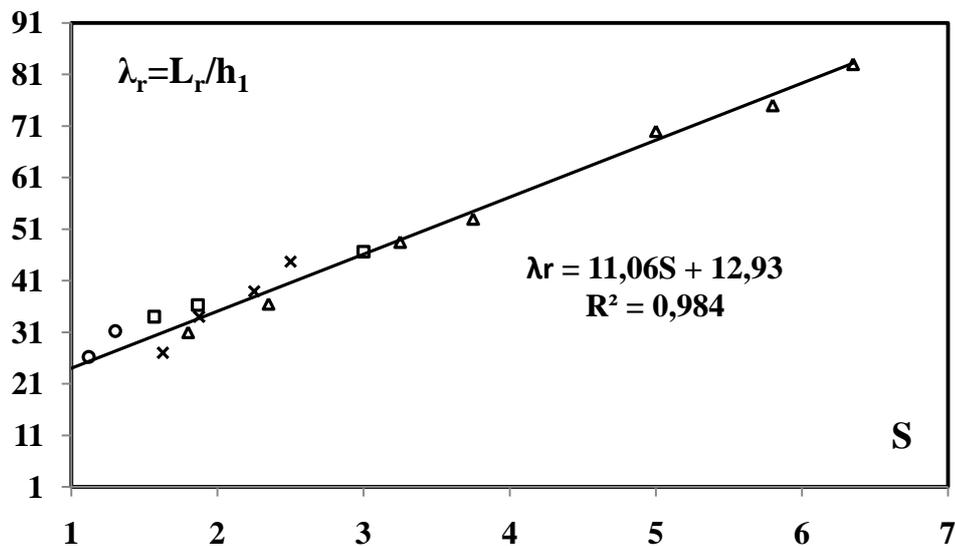


Figure 2.13 : Variation expérimentale de la longueur relative du rouleau $\lambda_r = L_r/h_1$ en fonction de la hauteur $S = s/h_1$ de la marche positive. Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) $M = 0,031$; (Φ) $M = 0,046$; (ω) $M = 0,062$; (φ) $M = 0,077$; (—) Courbe d'ajustement.

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction $\lambda_r = f(S)$, sont représentés dans le tableau (2.7) :

Tableau 2.7 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_r = f(S)$

$\lambda_{r_{exp}}$	S	$\lambda_{r_{rel}}$	$\Delta\lambda_r = (\lambda_{r_{exp}} - \lambda_{r_{rel}}) / \lambda_{r_{exp}}$ %	$\lambda_{r_{exp}}$	S	$\lambda_{r_{rel}}$	$\Delta\lambda_r = (\lambda_{r_{exp}} - \lambda_{r_{rel}}) / \lambda_{r_{exp}}$ %
31,00	1,80	32,83	5,93	34,00	1,87	33,61	1,14
36,50	2,35	38,92	6,63	39,00	2,25	37,81	3,04
48,50	3,25	48,87	0,77	44,75	2,50	40,58	9,32
53,00	3,75	54,40	2,65	19,80	0,72	20,89	5,52
70,00	5,00	68,23	2,53	24,00	0,94	23,32	2,81
75,00	5,80	77,07	2,77	26,20	1,12	25,31	3,37
83,00	6,35	83,16	0,19	31,20	1,30	27,30	12,47
34,00	1,57	30,29	10,90	17,83	0,60	19,56	9,74
36,33	1,87	33,61	7,48	19,17	0,78	21,55	12,45
46,67	3,00	46,11	1,20	21,17	0,93	23,21	9,66
27,00	1,62	30,84	14,25				

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 45 % des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du λ_r et les valeurs issues de la relation (2.8) sont inférieurs à 5%. Et que l'écart important est due à l'incertitude sur les mesures de la longueur L_r du rouleau.

2.3.1.5. Longueur relative du ressaut λ_j

Dans notre étude bibliographique nous avons montré que la limite aval du ressaut ne peut être déterminée que par la voie de l'expérimentation. Cette limite est la limite au-delà de laquelle la protection du bassin amortisseur n'est plus nécessaire. Les résultats obtenus par notre étude expérimentales ont 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 2.14). L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés a montré que la fonction $\lambda_j = L_j/h_1$ est linéaire dont l'équation est donnée par la relation suivante (2.9) :

$$\lambda_j = 8,793F_1 + 1,063 \quad (5.9)$$

$$\text{Pour : } 2,32 \leq F_1 \leq 10,64 \quad \text{et} \quad 0,031 \leq M \leq 0,093$$

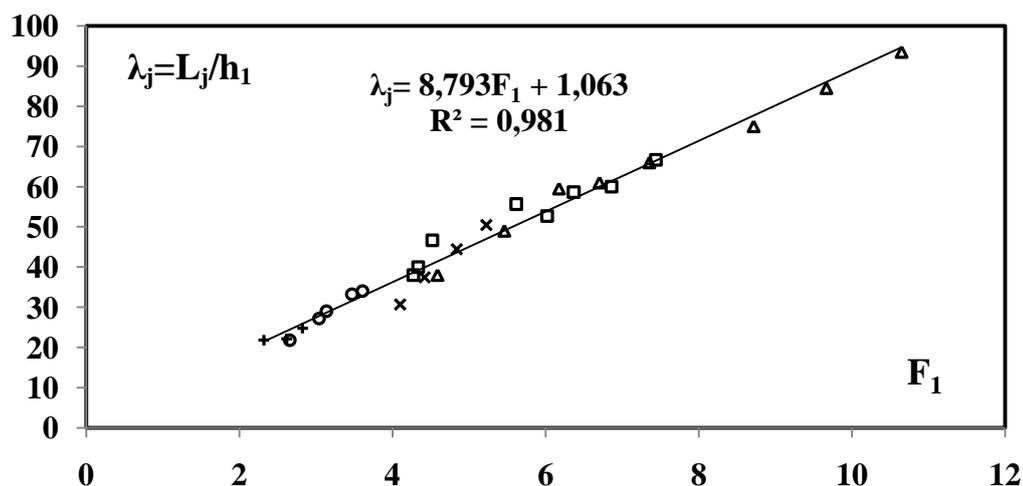


Figure 2.14 : Variation expérimentale de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 . Les motifs représentent les points expérimentaux pour : $(\Delta) M = 0,031$; $(\Phi) M = 0,046$; $(\omega) M = 0,062$; $(\phi) M = 0,077$; (—) Courbe d'ajustement.

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction $\lambda_j = f(F_1)$, sont représentés dans le tableau (2.8) :

Tableau 2.8: Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_j = f(F_1)$

$\lambda_{j_{exp}}$	F_1	$\lambda_{j_{rel}}$	$\Delta\lambda_j = (\lambda_{j_{exp}} - \lambda_{j_{rel}}) / \lambda_{j_{exp}}$ %	$\lambda_{j_{exp}}$	F_1	$\lambda_{j_{rel}}$	$\Delta\lambda_j = (\lambda_{j_{exp}} - \lambda_{j_{rel}}) / \lambda_{j_{exp}}$ %
38,00	4,58	41,33	8,78	60,00	6,86	61,38	2,30
49,00	5,45	48,98	0,03	66,67	7,83	69,91	4,86
59,50	6,17	55,31	7,03	30,75	4,10	37,11	20,70
61,00	6,70	59,97	1,68	37,50	4,42	39,92	6,47
66,00	7,35	65,69	0,47	44,50	4,84	43,62	1,98
75,00	8,71	77,65	3,53	50,50	5,22	46,96	7,01
84,50	9,66	86,00	1,78	21,80	2,66	24,45	12,17
93,50	10,64	94,62	1,20	27,20	3,04	27,79	2,18
38,00	4,27	38,60	1,60	29,00	3,14	28,67	1,13
40,00	4,33	39,13	2,16	33,20	3,47	31,57	4,90
46,67	4,52	40,80	12,56	34,00	3,60	32,71	3,77
55,67	5,61	50,39	9,48	21,83	2,32	21,46	1,68
52,67	6,02	53,99	2,52	22,17	2,62	24,10	8,71
58,67	6,36	56,98	2,87	24,83	2,82	25,85	4,15

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 68 % des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du λ_j et les valeurs issues de la relation (2.9) sont inférieurs à 5%. Et que l'écart important sur quelques valeurs est due aux incertitudes sur les mesures de la longueur L_j du ressaut.

Par ailleurs, la représentation graphique (figure 2.15) de la fonction $\lambda_j = f(X)$, 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 des moindres carrés nous a montré que la fonction $\lambda_j = f(X)$ est une fonction puissance et l'influence du rapport de position M est moins importante. Cette fonction est donnée par la relation suivante :

$$\lambda_j = 1,100X^{0,931} \quad (2.10)$$

Avec : $0,031 \leq M \leq 0,093$

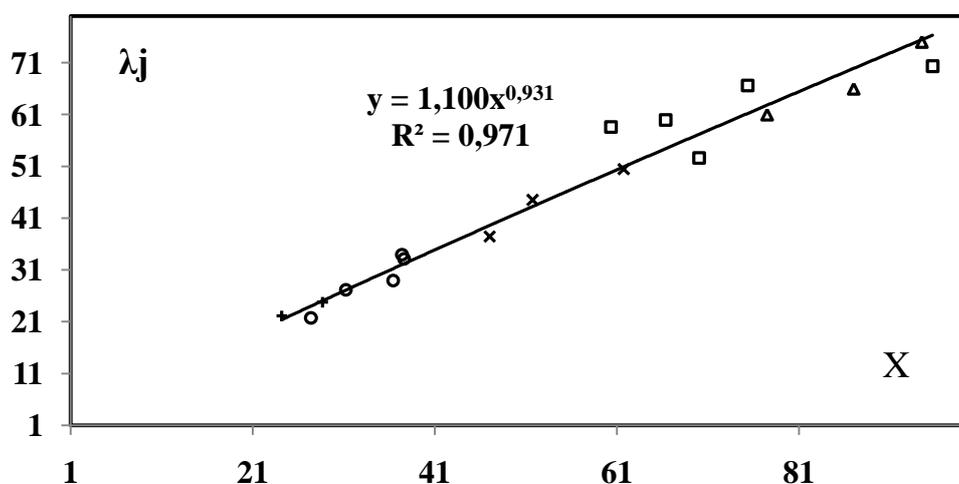


Figure 2.15: Variation expérimentale de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction de la position relative $X = x/h_1$ de la marche positive. Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) $M = 0,031$; (Φ) $M = 0,046$; (ω) $M = 0,062$; (ϕ) $M = 0,077$; (—) Courbe d'ajustement.

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction $\lambda_j = f(X)$, sont représentés dans le tableau (2.9) :

Tableau 2.9: Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_j = f(X)$

$\lambda_{j\text{exp}}$	X	λ_j	$\Delta\lambda_j = (\lambda_{j\text{exp}} - \lambda_j) / \lambda_{j\text{exp}}$ %	$\lambda_{j\text{exp}}$	X	λ_j	$\Delta\lambda_j = (\lambda_{j\text{exp}} - \lambda_j) / \lambda_{j\text{exp}}$ %
59.50	68.00	55.90	6.04	37.50	47.00	39.63	5.70
61.00	77.50	63.14	3.51	44.50	51.75	43.35	2.57
66.00	87.00	70.32	6.55	50.50	61.75	51.10	1.20
75.00	94.50	75.94	1.26	21.80	27.40	23.98	10.02
55.67	64.67	53.35	4.16	27.20	31.20	27.06	0.49
52.67	70.00	57.43	9.05	29.00	36.40	31.24	7.74
58.67	60.33	50.01	14.76	33.20	37.60	32.20	3.00
60.00	66.33	54.62	8.96	34.00	37.40	32.04	5.76
66.67	75.33	61.49	7.76	22.17	24.17	21.34	3.74
70.33	95.67	76.82	9.23	24.83	28.67	25.01	0.76

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 77 % des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du λ_j et les valeurs issues de la relation (2.10) sont inférieurs à 5%. Et que l'écart important sur quelques valeurs est due aux incertitudes sur les mesures de la longueur L_j du ressaut.

Une autre relation a été considérée par notre analyse expérimentale (2.11), liant la longueur relative λ_j du ressaut et la hauteur relative S de la marche positive. La figure (2.16) montre que la représentation graphique de cette relation est une droite qui ne passe pas par l'origine et que le rapport de forme M n'influe pas sur l'allure de cette courbe. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés, à donnée la relation suivante :

$$\lambda_j = 12,55S + 15,47 \quad (2.11)$$

Avec : $0,031 \leq M \leq 0,093$

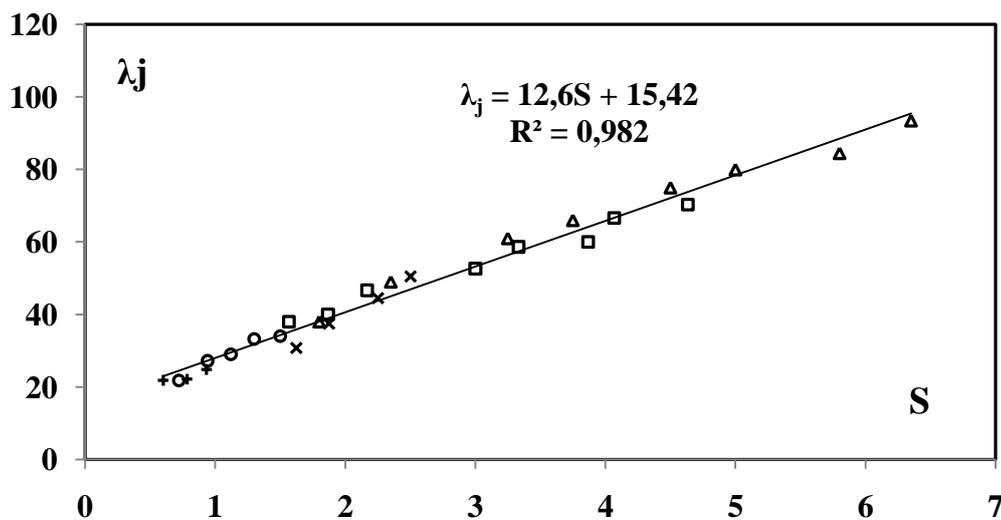


Figure 2.16 : Variation expérimentale de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive. Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) $M= 0,031$; (Φ) $M= 0,046$; (ω) $M= 0,062$; (φ) $M= 0,077$; (—) Courbe d'ajustement.

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction $\lambda_r = f(S)$, sont représentés dans le tableau (2.10) :

Tableau 2.10: Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_j = f(S)$

$\lambda_{j_{exp}}$	S	$\lambda_{j_{rel}}$	$\Delta\lambda_j = (\lambda_{j_{exp}} - \lambda_{j_{rel}}) / \lambda_{j_{exp}}$ %	$\lambda_{j_{exp}}$	S	$\lambda_{j_{rel}}$	$\Delta\lambda_j = (\lambda_{j_{exp}} - \lambda_{j_{rel}}) / \lambda_{j_{exp}}$ %
38.00	1.80	38.06	0.16	66.67	4.23	68.55	2.83
49.00	2.35	44.96	8.24	70.33	4.63	73.57	4.62
61.00	3.25	56.25	7.77	30.75	1.62	35.80	16.43
66.00	3.75	62.53	5.25	37.50	1.87	38.93	3.84
75.00	4.50	71.94	4.07	44.50	2.25	43.70	1.78
80.00	5.00	78.22	2.23	50.50	2.50	46.84	7.24
84.50	5.80	88.26	4.45	21.80	0.72	24.50	12.41
93.50	6.35	95.16	1.78	27.20	0.94	27.26	0.25
38.00	1.57	35.17	7.44	29.00	1.12	29.52	1.81
40.00	1.87	38.93	2.65	33.20	1.30	31.78	4.26
46.67	2.17	42.70	8.50	34.00	1.50	34.29	0.87
52.67	3.00	53.12	0.85	21.83	0.60	23.00	5.36
58.67	3.33	57.26	2.40	22.17	0.78	25.25	13.93
60.00	3.87	64.03	6.73	24.83	0.93	27.14	9.31

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 57% des écarts relatives entre les valeurs expérimentales du λ_j et les valeurs issues de la relation (2.11) sont inférieurs à 5%. Et que l'écart important sur quelques valeurs est due aux incertitudes sur les mesures de la longueur L_j du ressaut.

2.3.2. Ressaut hydraulique type A, forcé par marche positive

2.3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées

Durant les essais au laboratoire, nous avons constaté que l'expérimentation du ressaut type A, forcé par marche positive, est relativement délicate vue l'instabilité de ce type du ressaut.

L'analyse des résultats expérimentaux obtenus, a permis de représenter graphiquement (figure 2.17) la relation liant le rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$, et le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. Il a été constaté qu'il s'agit d'une droite ne passant pas par l'origine et les valeurs du rapport de forme M n'ont pas influés sur l'allure de la courbe. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés pour $0,031 \leq M \leq 0,093$, a abouté à la relation suivante :

$$Y = 0,246F_1 + 1,047 \quad (2.12)$$

$$\text{Pour : } 2,22 \leq F_1 \leq 8,86 \quad \text{et} \quad 0,031 \leq M \leq 0,093$$

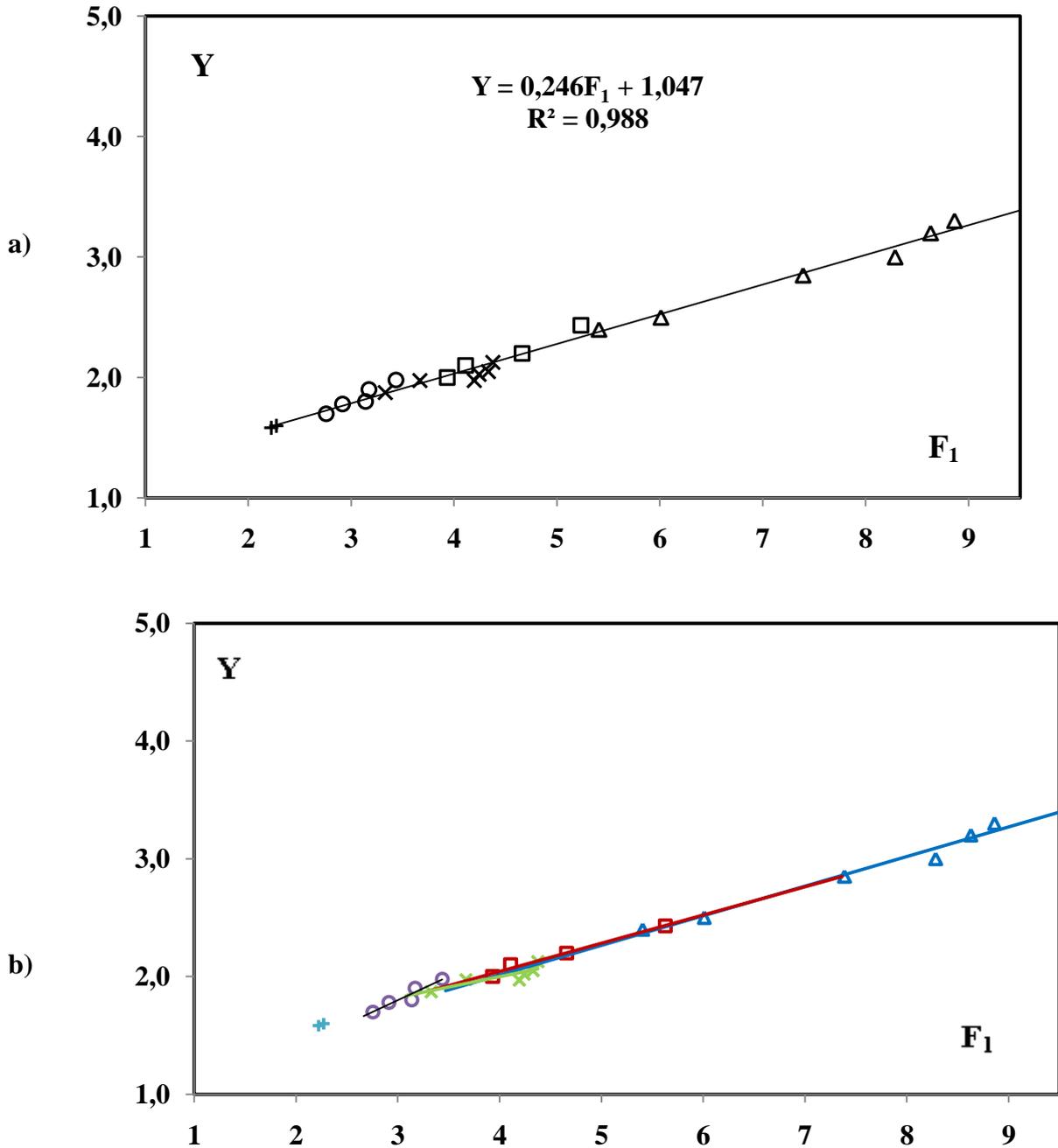


Figure 2.17: a) Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour le ressaut type A. (—) Courbe d'ajustement.
 b) (—) Courbes d'ajustement pour chaque valeurs du rapport de forme M . Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) $M = 0,031$; (Φ) $M = 0,046$; (ω) $M = 0,062$; (φ) $M = 0,077$; (+) $M = 0,093$

D'après la figure (2.17.b) on constate que les courbe obtenues pour chaque valeur du rapport de forme M sont confondues, dans ce cas on peut les remplacées par une courbe unique d'ajustement. Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction $Y = f(F_1)$, sont représentés dans le tableau (2.11) :

Tableau 2.11: Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $Y = f(F_1)$

Y_{exp}	F_1	Y_{rel}	$\Delta Y = (Y_{exp} - Y_{rel})/Y_{exp}$ %	Y_{exp}	F_1	Y_{rel}	$\Delta Y = (Y_{exp} - Y_{rel})/Y_{exp}$ %
2,40	5,40	2,37	1,03	1,87	3,32	1,86	0,34
2,50	6,01	2,52	1,02	1,97	4,19	2,07	5,47
3,00	8,28	3,08	2,80	2,05	4,33	2,11	3,03
2,85	7,38	2,86	0,44	2,12	4,37	2,12	0,10
3,20	8,62	3,16	1,02	1,70	2,75	1,72	1,38
3,30	8,86	3,22	2,23	1,80	3,13	1,81	0,94
2,20	4,65	2,19	0,41	1,98	3,43	1,89	4,51
2,43	5,23	2,33	3,97	1,78	2,91	1,76	0,96
2,00	3,93	2,01	0,69	1,90	3,17	1,82	3,85
2,10	4,10	2,05	2,11	1,60	2,27	1,60	0,34
1,97	3,66	1,94	1,15	1,58	2,22	1,59	0,83
2,02	4,24	2,09	3,47				

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 96% des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du Y et les valeurs issues de la relation (2.12) sont inférieurs à 5%.

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 (figure 2.18). L'ajustement des données expérimentales a donné la relation suivante :

$$Y = 0,399S + 1,379 \quad (2.13)$$

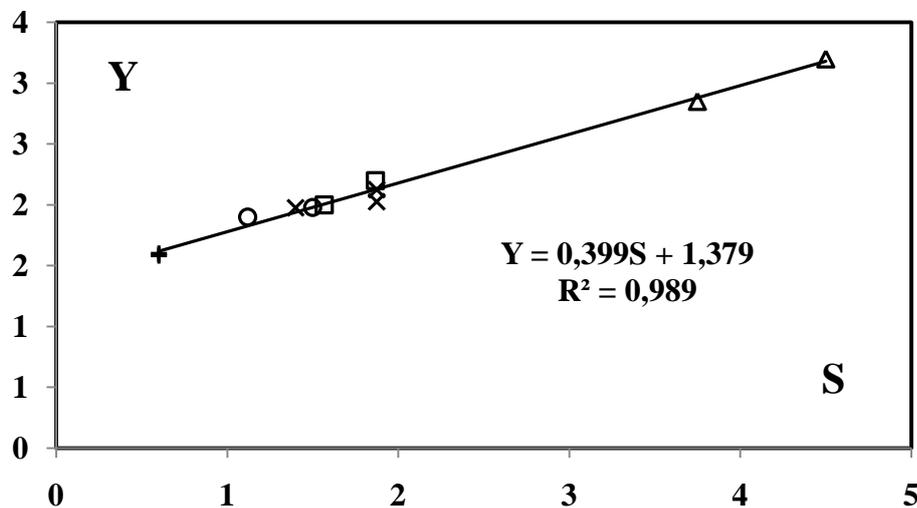


Figure 2.18: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative S de la marche positive. Les motifs représentent les points expérimentaux pour : $(\Delta) M = 0,031$; $(\Phi) M = 0,046$; $(\omega) M = 0,062$; $(\varphi) M = 0,077$; $(+) M = 0,093$; $(-)$ Courbe d'ajustement.

Les données expérimentales qui ont servi au traçage de la fonction $Y = f(S)$, sont regroupées dans le tableau 2.12 :

Tableau 2.12 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $Y = f(S)$

Y_{exp}	S	Y_{rel}	$\Delta Y = (Y_{exp} - Y_{rel})/Y_{exp}$ %	Y_{exp}	S	Y_{rel}	$\Delta Y = (Y_{exp} - Y_{rel})/Y_{exp}$ %
2,85	3,75	2,88	0,89	2,12	1,87	2,13	0,24
3,20	4,50	3,17	0,80	1,80	1,30	1,90	5,43
2,20	1,86	2,12	3,58	1,98	1,50	1,98	0,13
2,00	1,56	2,00	0,07	1,78	0,72	1,67	6,39
2,10	1,86	2,12	1,01	1,90	1,12	1,83	3,90
1,97	1,40	1,94	1,64	1,60	0,60	1,62	1,15
2,02	1,87	2,13	4,94	1,58	0,60	1,62	2,43
2,05	1,62	2,03	1,20				

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 87% des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales de $Y = f(S)$ et les valeurs issues de la relation (2.13) sont inférieurs à 5%.

2.3.2.2. Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de Froude

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

La figure (2.19) illustre la forme de la courbe obtenue. L'ajustement des couples de valeurs expérimentales (S, F_1) , par la méthode des moindres carrés non linéaire a montré que la fonction $S = f(F_1)$ est une droite représenté par la relation suivante :

$$S = 0,619F_1 - 0,849 \quad (2.14)$$

Pour : $2,22 \leq F_1 \leq 8,62$ et $0,031 \leq M \leq 0,077$

Vue les faibles valeurs de M on a constaté que la gamme de variation du rapport de forme M n'a pas influé sur l'allure de la droite obtenue.

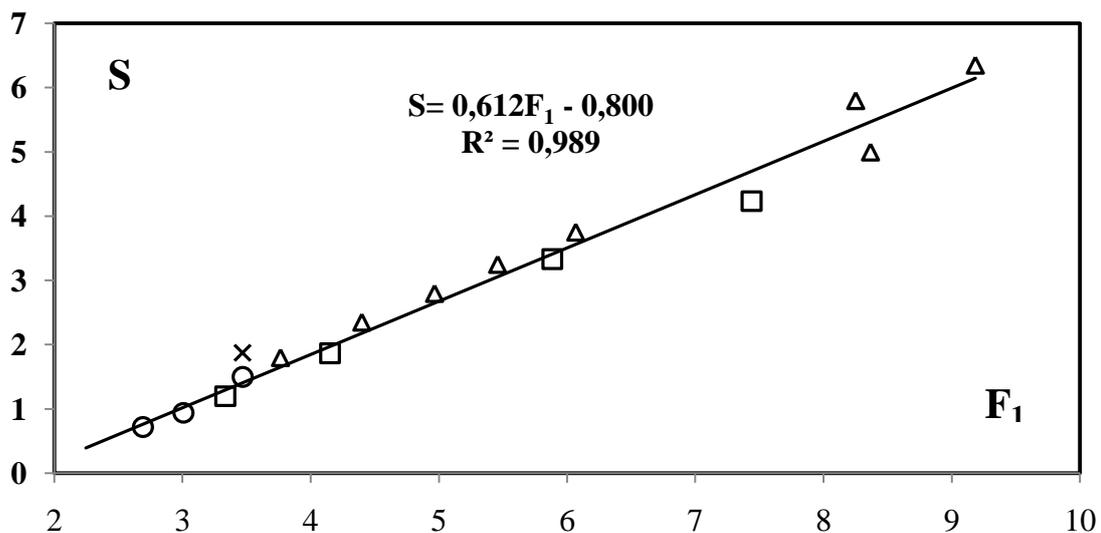


Figure 2.19 : Variation expérimentale de la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive, en fonction du nombre de Froude F_1 . Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) $M = 0,031$; (Φ) $M = 0,046$; (ω) $M = 0,062$; (φ) $M = 0,077$; (—) Courbe d'ajustement.

Les mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la fonction $S = f(F_1)$, sont représentés par le tableau 2.13 :

Tableau 2.13: Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $S = f(F_1)$

S_{exp}	F_1	S_{rel}	$\Delta S = (S_{exp} - S_{rel}) / S_{exp}$ %	S_{exp}	F_1	S_{rel}	$\Delta S = (S_{exp} - S_{rel}) / S_{exp}$ %
2,80	6,01	2,87	2,79	1,40	3,66	1,43	2,85
3,75	7,38	3,71	0,89	1,87	4,24	1,79	4,02
4,50	8,62	4,47	0,55	1,87	4,37	1,87	0,24
1,20	3,46	1,31	9,79	0,94	2,97	1,01	8,26
1,86	4,65	2,04	9,99	1,30	3,13	1,11	14,19
2,50	5,62	2,63	5,58	1,50	3,43	1,29	13,39
3,00	6,02	2,68	3,86	0,94	3,00	1,03	10,21
1,20	3,30	2,88	1,63	1,12	3,17	1,14	1,79
1,56	3,93	1,21	2,89	1,30	3,17	1,14	12,30
3,00	6,02	1,60	3,86	0,60	2,27	0,58	1,79
1,17	3,37	2,88	7,90	0,60	2,22	0,55	6,89

D'après le tableau ci-dessus on remarque que l'écart important entre la valeur de S_{exp} et S_{rel} est : 14,19 qui correspond à la valeur du nombre de Froude $F_1 = 3,13$ et $S = 1,11$.

2.3.2.3. Position relative de la marche en fonction de nombre de Froude

Comme pour le cas du ressaut contrôlé par marche positive, nous avons établi une relation pour le ressaut forcé de type A. Cette relation peut également s'écrire sous la forme $f(X_A, F_1) = 0$, tel que $X_A = x/h_1$ et F_1 le nombre de Froude de l'écoulement incident. Pour le ressaut forcé de type A, la position x de la marche correspond à la longueur L_r du rouleau de surface.

La figure (2.20) montre que la représentation graphique des points expérimentaux de la fonction $X = f(F_1)$ est une droite. La gamme de variation du rapport de forme M est donnée par : $0,031 \leq M \leq 0,093$. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés a abouti à la relation (2.15) de la forme $y = ax + b$.

$$X_A = 7,588F_1 + 7,464 \quad (2.15)$$

Pour : $0,031 \leq M \leq 0,077$ et $2,66 \leq F_1 \leq 8,28$

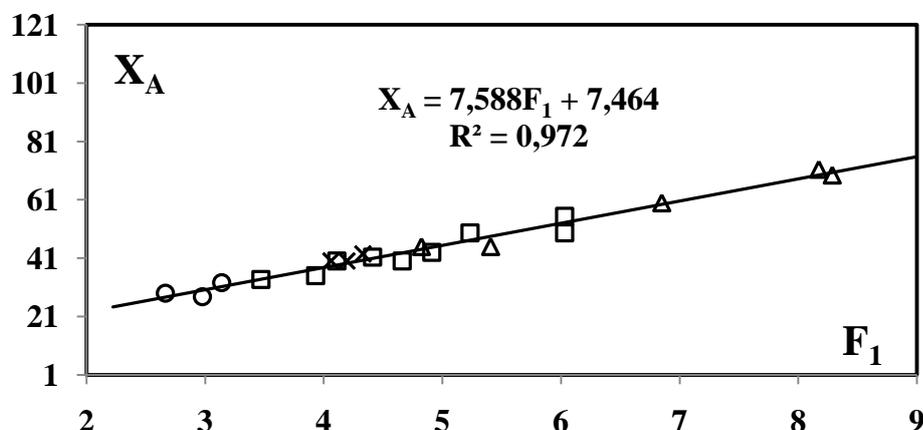


Figure 2.20: Variation expérimentale de la position relative $X_A = L_r/h_1$ de la marche positive en fonction du nombre de Froude F_1 . Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) $M = 0,031$; (Φ) $M = 0,046$; (ω) $M = 0,062$; (φ) $M = 0,077$; (—) Courbe d'ajustement.

Les mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la fonction $X = f(F_1)$, sont représentés par le tableau 2.14 :

Tableau 2.14: Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $X = f(F_1)$

X_{Aexp}	F_1	X_{Arel}	$\Delta X = (X_{Aexp} - X_{Arel}) / X_{Aexp}$ %	X_{Aexp}	F_1	X_{Arel}	$\Delta X_A = (X_{Aexp} - X_{Arel}) / X_{Aexp}$ %
45,00	5,40	48,43	7,64	40,00	4,10	38,57	3,56
69,50	8,28	70,29	1,14	43,00	4,91	44,72	4,00
71,50	8,17	69,45	2,86	49,66	6,02	53,14	7,02
45,00	4,82	44,03	2,14	55,33	6,02	53,14	3,95
60,00	6,84	59,36	1,06	40,00	4,06	38,27	4,32
33,66	3,46	33,71	0,17	40,00	4,19	39,25	1,86
41,33	4,41	40,92	0,97	42,50	4,33	40,32	5,13
40,00	4,65	42,74	6,87	29,00	2,66	27,64	4,66
49,66	5,23	47,14	5,06	27,80	2,97	30,00	7,91
35,00	3,93	37,28	6,53	32,60	3,13	31,21	4,25

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 96% des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du X_A et les valeurs issues de la relation (2.15) sont inférieurs à 5%.

2.3.2.4. Longueur relative du ressaut

Dans notre étude bibliographique on a montré que la limite aval du ressaut ne peut être déterminée que par la voie de l'expérimentation. Cette limite est la limite au-delà de laquelle la protection du bassin amortisseur n'est plus nécessaire. Les résultats obtenus par notre étude expérimentales 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 (figure 2.21). L'ajustement des points expérimentaux a montré que la fonction $\lambda_j = L_j/h_1$ est une droite et son équation est donnée par la relation (2.16) :

$$\lambda_j = 9,704F_1 + 0,135 \quad (2.16)$$

Pour : $2,91 \leq F_1 \leq 8,17$ et $0,031 \leq M \leq 0,077$

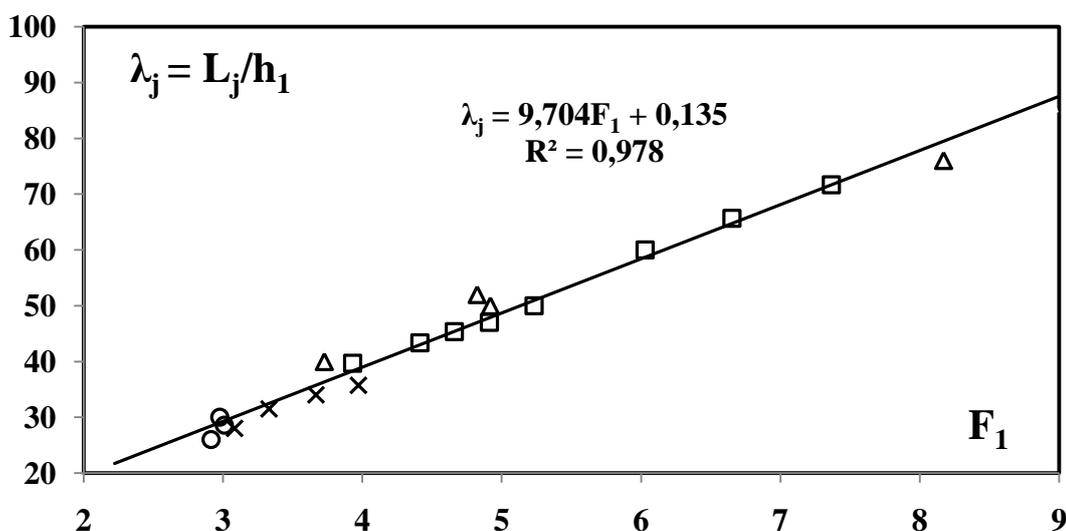


Figure 2.21: Variation expérimentale de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 . Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) $M = 0,031$; (Φ) $M = 0,046$; (\square) $M = 0,062$; (\times) $M = 0,077$; (—) Courbe d'ajustement.

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la fonction $\lambda_r = f(X)$, sont représentés sur le tableau (2.15) :

Tableau 2.15: Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_r = f(F_1)$

$\lambda_{j_{exp}}$	F_1	$\lambda_{j_{rel}}$	$\Delta\lambda_j = (\lambda_{j_{exp}} - \lambda_{j_{rel}}) / \lambda_{j_{exp}}$ %	$\lambda_{j_{exp}}$	F_1	$\lambda_{j_{rel}}$	$\Delta\lambda_j = (\lambda_{j_{exp}} - \lambda_{j_{rel}}) / \lambda_{j_{exp}}$ %
40,00	3,72	36,23	9,42	65,66	6,65	64,66	1,51
50,00	4,91	47,78	4,44	71,66	7,36	71,55	0,14
76,00	8,17	79,41	4,50	28,00	3,08	30,02	7,23
52,00	4,82	46,90	9,79	34,00	3,66	35,65	4,86
43,00	4,41	42,92	0,92	35,75	3,97	38,65	8,14
45,33	4,65	45,25	0,16	31,50	3,32	32,35	2,71
50,00	5,23	50,88	1,77	30,00	2,97	28,95	3,48
39,66	3,93	38,27	3,50	26,00	2,91	28,37	9,13
47,00	4,91	47,78	1,66	28,60	3,00	29,24	2,26
60,00	6,02	58,55	2,41				

D'après le tableau ci-dessus on remarque que 74% des écarts relatifs entre les valeurs expérimentales du $\lambda_{j_{exp}}$ et les valeurs issues de la relation (2.16) sont inférieurs à 5%.

2.4. Etude comparative

A travers ce sous chapitre nous allons faire une étude comparative des différents paramètres constitutif de ces deux types du ressaut hydraulique, et de tirer quelques conclusions concernant ces deux configurations du ressaut.

2.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées

Comme nous avons cité ci-dessus, la variation de Y en fonction de F_1 pour les deux types de ressaut est de type linéaire. La figure (2.22) illustre cette variation.

Le trait en pointer est la variation du rapport Y^* théorique de ressaut classique trapézoïdal en fonction de nombre de Froude F_1 donnée par la relation théorique suivante :

$$F_1^2 = \frac{\frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{3}MY\right) - \left(1 + \frac{2}{3}M\right) \right]}{\left[1 - \frac{(1+M)}{Y \cdot (1+MY)} \right]} \quad (2.15)$$

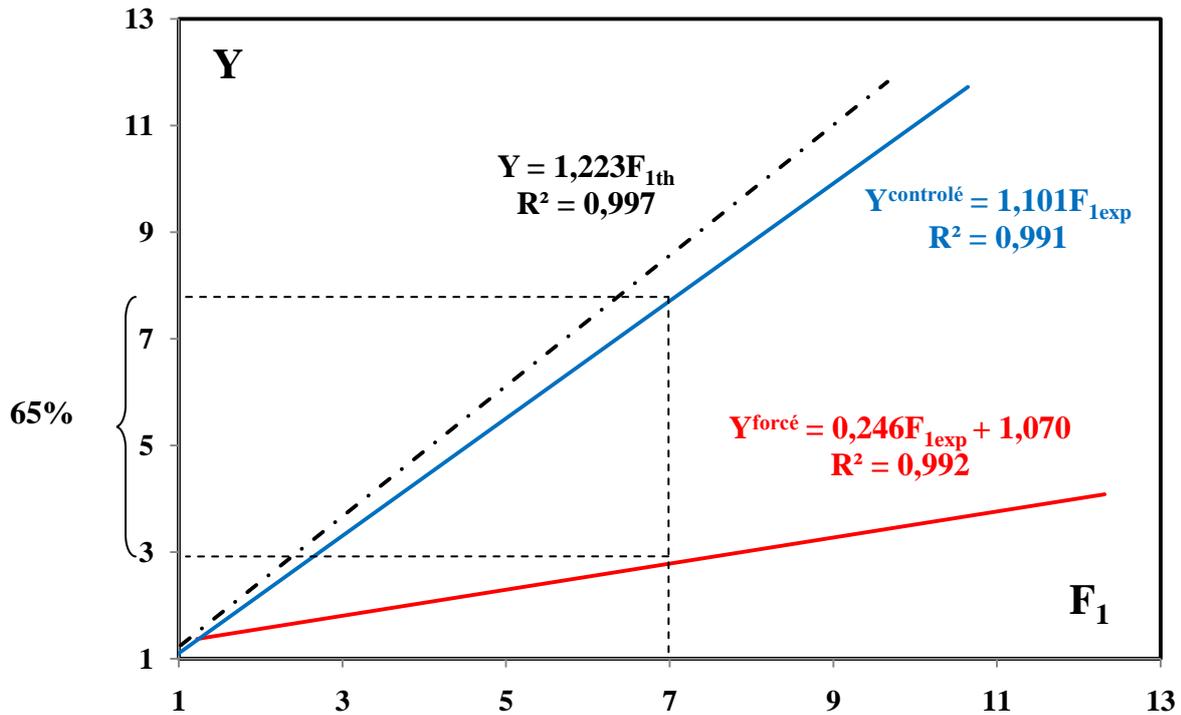


Figure 2.22 : Variation de Y des hauteurs conjuguées en fonction de nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. (---) Courbe du ressaut classique ($S=0$) tracé selon la relation (2.15). (—) Ressaut contrôlé par marche positive. (—) Ressaut forcé de type A.

En remarque d'après la figure (2.22) qu'il ya un grand décalage entre la courbe du ressaut contrôlé et son analogue forcé de type A. cela est due à l'effet de la marche positive sur les rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut. Donc le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut forcé de type A est réduit de 65% par rapport à son homologue contrôlé pour $F_1 = 7$.

Le traitement des résultats par la méthode de moindre carré a aboutie aux relations linéaires (2.2) et (2.13) de la forme $Y = aF_1 + b$ où :

Tableau (2.16) : Valeurs des coefficients a et b .

	Ressaut contrôlé	Ressaut forcé de type A
a	1,101	0,246
b	0	1,070

2.4.2. Hauteur relative de la marche positive

A travers l'analyse expérimentale des résultats obtenus pour le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut forcé de type A, on a constaté que la variation de la hauteur relative S de la marche positive en fonction du nombre de Froude F_1 est de type linéaire $S = aF_1 - b$. La figure (2.23) montre cette variation, qui montre bien cette relation. En effet un décalage significatif est constaté. Ce décalage indique clairement que pour la même hauteur relative de la marche positive,

le ressaut forcé nécessite un nombre de *Froude* incident plus important que son homologue contrôlé pour assurer son apparition.

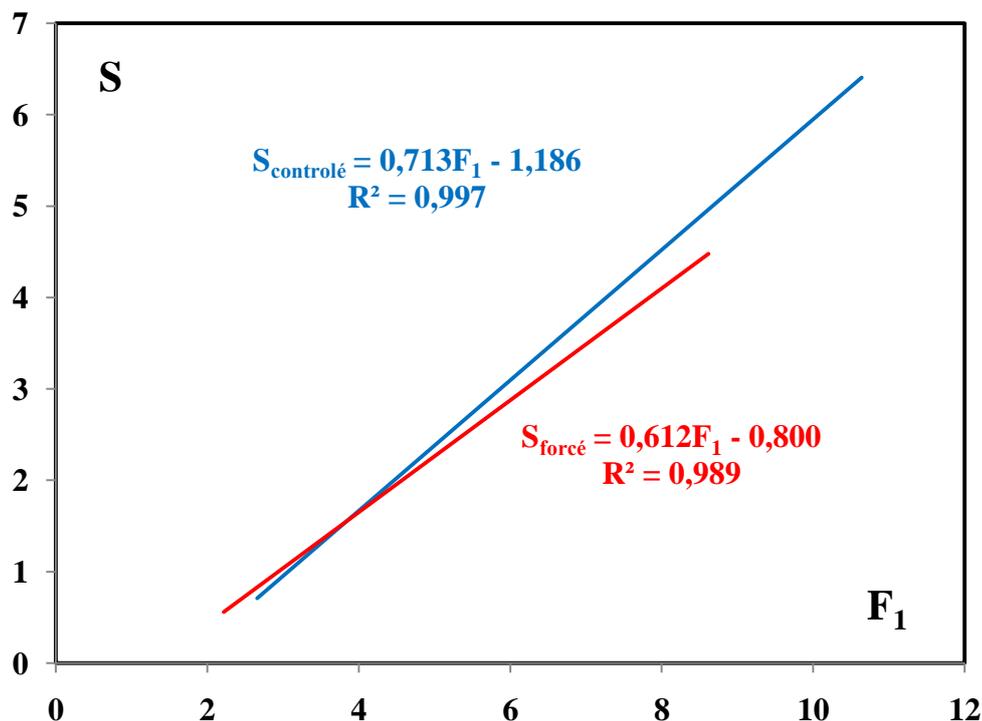


Figure 2.23: Variation de la hauteur relative S de la marche positive en fonction du nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident. (—) Ressaut contrôlé par marche positive. (—) Ressaut forcé de type A.

L'ajustement des valeurs expérimentales par la méthode des moindres carrés, a donné des droites de la forme $Y = aF_1 - b$ représentées par les relations (2.5) et (2.15) desquelles les constantes sont comme suit :

Tableau (2.17) : Valeurs des coefficients a et b .

	Ressaut Contrôlé	Ressaut Forcé de type A
a	0,713	0,612
b	1,186	0,800

2.4.3. Longueur relative du bassin

La variation de la longueur relative $X = x/h_1$ de bassin amortisseur en fonction du nombre de *Froude* F_1 a donnée de une relation linéaire pour les deux cas du ressaut, le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut type A, forcé par marche positive les relations expérimentales sont de la forme $X = aF_1 - b$. La figure (2.23) illustre cette variation pour les deux types de ressaut.

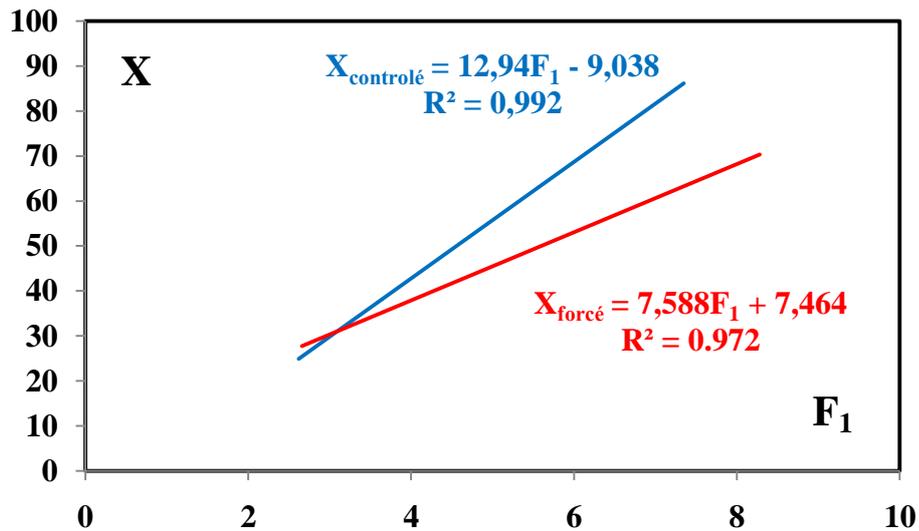


Figure 2.24: Variation de la longueur relative du bassin X en fonction de nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. (—) Ressaut contrôlé par marche positive. (—) Ressaut forcé de type A.

L'ajustement des valeurs expérimentales par la méthode des moindres carrés, a donné des droites de la forme $Y = aF_1 - b$ représentées par les relations (2.6) et (2.16) selon le tableau suivant :

Tableau (2.18) : Valeurs des coefficients a et b .

	Ressaut Contrôlé	Ressaut Forcé de type A
a	12,94	7,588
b	9,038	7,464

D'après les courbes représentées par la figure (2.23) un décalage significatif est constaté. Ce décalage indique clairement que pour la même longueur relative du bassin d'amortissement, le ressaut forcé nécessite un nombre de *Froude* incident plus important que son homologue contrôlé pour assurer son apparition.

2.4.4. Rendement du ressaut hydraulique

Comme s'est indiqué dans la première partie de notre étude, la perte de charge ΔH_{12} du ressaut est par définition la différence des charges initiale et finale : $\Delta H_{12} = H_1 - H_2$. Donc on pourra la déterminer analytiquement en utilisant le théorème de *Bernoulli*, en admettant que $z_1 = z_2$ (canal horizontal), on obtient :

$$\Delta H_{12} = \left(h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \right) - \left(h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \right) \quad (2.17)$$

La perte de charge relative est par définition comme étant le rapport de ΔH_{12} à la charge initiale H_1 :

$$\eta = \frac{\Delta H_{12}}{H_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (2.18)$$

Le rapport H_2/H_1 est appelé efficacité du ressaut. D'après (2.17) on a :

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \\ H_2 &= h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

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

$$A_1 = bh_1 + mh_1^2 \quad (2.20)$$

$$A_2 = bh_2 + 2msh_2 + mh_2^2 \quad (2.21)$$

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2 \cdot (b + 2mh_1)}{g \cdot A_1^3} \quad (2.22)$$

En introduisant les relations (2.20), (2.21), (2.22) et (2.19) dans la relation (2.18) on aura :

$$\eta = 1 - \frac{h_2 + \left[\frac{(bh_1 + mh_1^2)^3}{(b + 2mh_1)} \right] \cdot \left[\frac{F_1^2}{2 \cdot (bh_2 + 2msh_2 + mh_2^2)^2} \right]}{h_1 + \left[\frac{(bh_1 + mh_1^2)^3}{(b + 2mh_1)} \right] \cdot \left[\frac{F_1^2}{2 \cdot (bh_1 + mh_1^2)^2} \right]}$$

Si on fait sortir le bh_1 en facteur on aura :

$$\eta = 1 - \frac{h_2 + \left[\frac{bh_1^3 \cdot \left(1 + \frac{mh_1}{b}\right)^3}{b \cdot \left(1 + 2\frac{mh_1}{b}\right) \cdot 2b^2 h_2^2 \cdot \left(1 + 2\frac{ms}{b} + \frac{mh_2}{b}\right)^2} \right] \cdot F_1^2}{h_1 + \left[\frac{bh_1 \cdot \left(1 + \frac{mh_1}{b}\right)}{2b \cdot \left(1 + 2\frac{mh_1}{b}\right)} \right] \cdot F_1^2}$$

On divise le tous sur h_1 on aura :

$$\eta = 1 - \frac{\frac{h_2}{h_1} + \left[\frac{h_1^2}{h_2^2} \cdot \frac{\left(1 + \frac{mh_1}{b}\right)^3}{2 \cdot \left(1 + 2\frac{mh_1}{b}\right) \cdot \left(1 + 2\frac{ms}{b} + \frac{mh_2}{b}\right)^2} \right] \cdot F_1^2}{1 + \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{\left(1 + \frac{mh_1}{b}\right)}{\left(1 + 2\frac{mh_1}{b}\right)} \right] \cdot F_1^2} \quad (2.23)$$

La relation (2.23) est obtenue par l'application du théorème de *Bernoulli*, entre les sections initiales et finales du ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive évoluant dans un canal de forme trapézoïdal. Dans la pratique on représente les relations sous forme adimensionnelle, pour faciliter le passage du model réduit au model réel, on prend :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} \quad ; \quad M = \frac{mh_1}{b} \quad ; \quad S = \frac{s}{h_1}$$

Finalement la relation (2.23) prend la forme :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \cdot \left[\frac{(1+M)^3}{(1+2M) \cdot (1+2MS+MY)^2} \right]}{1 + \frac{F_1^2}{2} \cdot \left[\frac{(1+M)}{(1+2M)} \right]} \quad ; \quad 0 < \eta < 1 \quad (2.24)$$

Donc pour le calcul de la perte de charge relative pour un ressaut de type forcé par marche positive évaluant dans un canal trapézoïdal, la relation (2.24) se présente sous sa forme adimensionnelle. On remarque toujours que les mêmes paramètres qui rentre en jeux, et que la perte de charge relative est en fonction de quatre paramètres significatifs : Y le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, S la hauteur relative de la marche positive, M le rapport de forme et F_1 le nombre de *Froude* de l'écoulement incident.

Les études théoriques montre que pour le cas du ressaut classique, la perte de charge relative du ressaut ne dépend que du rapport des hauteurs conjuguées Y, de rapport de forme M et du nombre de *Froude* F_1 . Donc si on reprend la relation (2.24) et on remplace $S = 0$, on pourra valider notre approche théorique :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \cdot \left[\frac{(1+M)^3}{(1+2M) \cdot (1+MY)^2} \right]}{1 + \frac{F_1^2}{2} \cdot \frac{(1+M)}{(1+2M)}} \quad ; \quad 0 < \eta < 1 \quad (2.25)$$

Donc a partir de la relation (2.24) de notre approche théorique, on a aboutie à la relation (2.25) connue du ressaut classique.

Nous avons tracé les courbes du rendement de ressaut contrôlé par marche positive et du ressaut de type A, forcé par marche positive, évoluant dans un canal trapézoïdal. Le but est de comparer les

deux rendements et de déterminer l'effet de la marche positive sur la dissipation de la charge. A partir des deux courbes (figure 2.25), on remarque clairement et pour un nombre de *Froude* donné, que le ressaut type A, forcé par marche positive dissipe mieux la charge hydraulique que son homologue contrôlé.

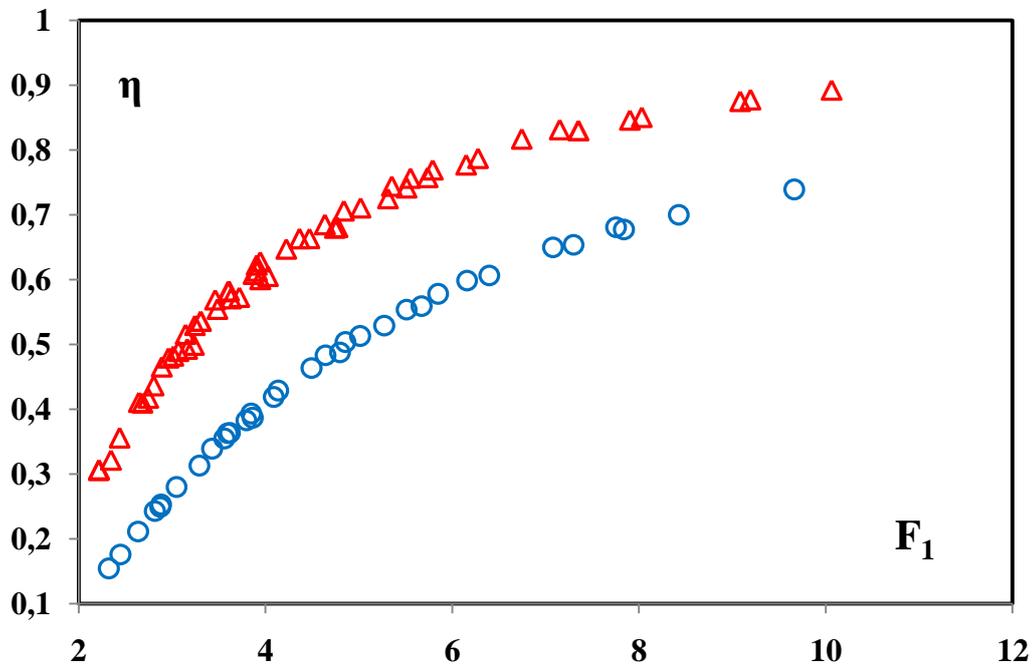


Figure (2.25) : Variation du rendement η en fonction de Froude F_1 .
 (○) Ressaut contrôlé par marche positive. (△) Ressaut type A, forcé par marche positive.

Tableau 2.19: Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de η en fonction de F_1 , pour le cas du Ressaut hydraulique contrôlé et de type A, forcé par marche positive

Ressaut Forcé		Ressaut Forcé		Ressaut Contrôlé	
η	F_1	η	F_1	η	F_1
0,60	3,94	0,41	2,74	0,38	3,86
0,66	4,46	0,48	3,06	0,48	4,79
0,71	5,01	0,53	3,30	0,52	5,27
0,74	5,51	0,58	3,59	0,55	5,67
0,77	6,14	0,62	3,90	0,60	6,39
0,82	7,35	0,40	2,68	0,65	7,29
0,84	7,90	0,48	3,01	0,67	7,83
0,87	9,08	0,53	3,30	0,69	8,42
0,89	10,06	0,58	3,60	0,73	9,66
0,57	3,71	0,62	3,94	0,31	3,29
0,68	4,77	0,32	2,34	0,38	3,79
0,60	4,02	0,41	2,64	0,41	4,08
0,67	4,74	0,46	2,89	0,46	4,49
0,72	5,31	0,51	3,14	0,51	5,01
0,75	5,73	0,56	3,46	0,55	5,51
0,78	6,27	0,35	2,43	0,57	5,84
0,82	7,35	0,43	2,80	0,59	6,15
0,85	8,02	0,47	2,96	0,64	7,07
0,87	9,19	0,52	3,24	0,68	7,75
0,49	3,16	0,30	2,21	0,24	2,87
0,57	3,63	0,30	2,21	0,35	3,55
0,61	3,90			0,36	3,62
0,66	4,36			0,39	3,84
0,70	4,84			0,42	4,13
0,75	5,55			0,48	4,64
0,49	3,23			0,50	4,85
0,55	3,48			0,17	2,44
0,60	3,87			0,25	2,88
0,64	4,22			0,28	3,04
0,68	4,63			0,33	3,42
0,74	5,35			0,36	3,59
0,76	5,79			0,15	2,32
0,81	6,74			0,21	2,63
0,83	7,14			0,24	2,81

2.5. Conclusion

A travers ce chapitre nous avons étudié et analysé les résultats expérimentaux de deux types de ressaut hydraulique, à savoir, le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive et le ressaut de type A, forcé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal. Il a été démontré dans un premier temps que la variation des rapports des hauteurs conjuguées, pour les deux types de ressaut hydraulique étudiés, est de type linéaire. L'étude comparative, entre la fonction $Y = f(F_1)$ pour les deux configurations de ressaut, a montré que le ressaut forcé de type A a plus d'avantage que son homologue, le ressaut contrôlé. Cet avantage a une incidence directe sur l'aspect économique.

Un second avantage du ressaut forcé a été également obtenu vis-à-vis de la longueur du bassin d'amortissement. Cette constatation est justifiée par la relation $X = f(F_1)$.

L'analyse expérimentale a permis enfin de montrer que le ressaut forcé de type A dissipe mieux la charge hydraulique que son homologue contrôlé.

Conclusion de la deuxième partie

A travers cette deuxième partie nous avons abordé la partie expérimentale de l'étude du ressaut hydraulique, contrôlé par marche positive ainsi que le ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive, évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique, à angle d'inclinaison des talus de 73°.

Deux chapitres ont été nécessaires : le premier a été consacré à la description du modèle expérimental, qui a servi de base à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique.

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

Une étude comparative a été présentée à la fin de la deuxième partie de l'étude expérimentale, le but étant de déterminer le ressaut hydraulique le plus avantageux et le plus rentable. Toutes ces comparaisons nous ont permis de valider notre choix entre tel ou tel type de ressaut hydraulique. Le premier résultat obtenu est la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées Y et le nombre de Froude F_1 ; cette relation a montré que la marche positive a diminué le rapport des hauteurs conjuguées jusqu'à $\approx 65\%$ ce qui présente un avantage de dimensionnement et d'économie.

Les relations obtenues sont suffisantes pour dimensionner ce type de bassin d'amortissement. Par ailleurs, il a été démontré, moyennant une étude comparative entre le ressaut contrôlé et le ressaut forcé par marche positive, que le ressaut forcé de type A est plus avantageux sur les trois plans : hauteur, longueur du bassin et dissipation de charge.

Troisième Partie :
Etude Théorique du Ressaut Hydraulique de
Type A, Forcé Par Marche Positive

Chapitre I

Etude théorique du ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive

1.1. Introduction

Cette partie sera consacrée à l'établissement des relations théoriques qui régissent le ressaut hydraulique type A, forcé par marche positive évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale. 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 : $f(F_1, Y, S) = 0$, où F_1 représente le nombre de *Froude* de l'écoulement incident, Y représente le rapport des hauteurs conjuguées défini comme le rapport de la hauteur h_2 en aval et sur la hauteur h_1 en amont du ressaut S est la hauteur relative de la marche positive, qui est le rapport de la hauteur géométrique « s » de la marche sur la hauteur h_1 du ressaut à sa section amont.

La présente étude a pour but d'établir une forme pratique de la relation liant F_1 , Y et S . ceci pouvant être rendu possible par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections en amont et en aval délimitant le ressaut. La relation établie fera l'objet d'une comparaison avec celle obtenue pour le cas du ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal trapézoïdal.

Notre approche théorique sera ensuite validée par une comparaison avec les résultats expérimentaux.

1.2. Equation de la quantité de mouvement

A travers notre étude bibliographique nous avons montré 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 une section droite trapézoïdale comme le montre la figure (1.1). La section transversale de la marche est donc de forme trapézoïdale caractérisée par sa hauteur « s ». La face latérale de la marche forme alors un obstacle constituant le siège d'une réaction opposée au sens de l'écoulement. Celle-ci résulte de la pression agissant sur la face latérale de la marche. Cette pression sera étudiée en tant qu'une pression agissant 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.

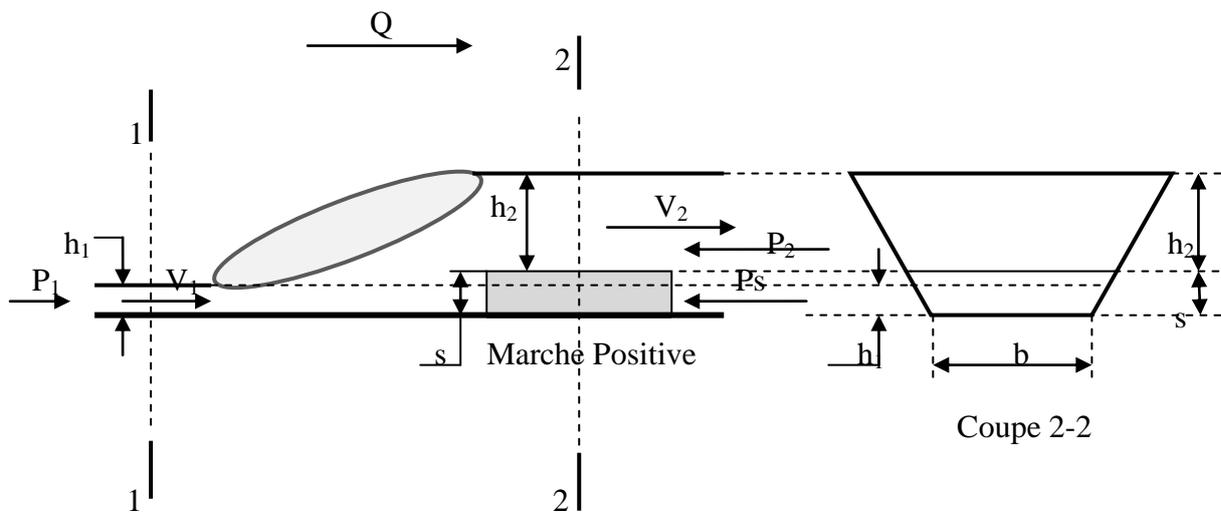


Figure 1.1: Représentation graphique des différentes forces agissantes sur le ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal

L'équation de la quantité de mouvement sera appliquée en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- la répartition des pressions dans les sections 1-1 et 2-2 est hydrostatique.
- les frottements sur les parois et le fond du canal le long de la faible distance séparant 1-1 et 2-2 sont négligeables par rapport à la perte de charge due à la turbulence créée par le ressaut.
- les vitesses des différents filets liquides dans chacune des sections 1-1 et 2-2 sont parallèles à la vitesse moyenne V , et sont considérées uniformes.
- la résistance de l'aire est négligeable.

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

$$\rho \cdot Q \cdot V_2 - \rho \cdot Q \cdot V_1 = P_1 - P_2 - P_s \quad (1.1)$$

D'où :

P_1, P_2 et P_s : Représente les forces extérieures. Ces forces sont :

- la force de pression hydrostatique P_1 appliquée à la section 1-1.
- la force de pression hydrostatique P_2 appliquée au dessus de la marche à la section 2-2.
- la réaction P_s engendrée par la présence de la marche à la section 2-2.

En tenant compte de toutes ces forces, la relation (1.1) s'écrit :

$$\rho \cdot Q \cdot V_1 + P_1 = \rho \cdot Q \cdot V_2 + P_2 + P_s \quad (1.2)$$

Notons que le point d'application de chacune de ces forces coïncide avec le centre de gravité de la section considérée. D'après la figure (1.1), toutes les forces sont appliquées sur des sections trapézoïdales. Ces forces peuvent être exprimées, en appliquant les lois de l'hydrostatique :

$$P_1 = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_1 \cdot A_1 \quad , \quad P_2 = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_2 \cdot A_2 \quad \text{et} \quad P_s = \bar{\omega} \cdot \bar{s} \cdot A_s$$

Où : $\bar{\omega}$ 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, 2 et s et la surface libre de l'écoulement, et A_1 et A_2 sont respectivement l'aire de la section mouillée 1 et 2, et A_s représente l'aire de la face latérale de la marche positive.

En remplaçant les expressions de P_1 , P_2 et P_s dans la relation (1.2), on obtient :

$$\rho \cdot Q \cdot V_1 + \bar{\omega} \cdot \bar{h}_1 \cdot A_1 = \rho \cdot Q \cdot V_2 + \bar{\omega} \cdot \bar{h}_2 \cdot A_2 + \bar{\omega} \cdot \bar{s} \cdot A_s \quad (1.3)$$

L'équation de continuité nous donne la relation entre la vitesse moyenne de l'écoulement V d'une part, le débit volume Q et l'aire de la section mouillée A d'autre part : $V = Q/A$. 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 toutes ces considérations et sachant que $\bar{\omega} = \rho \cdot g$, la relation (1.3) peut s'écrire, en divisant tous ses membres par ρg :

$$\bar{h}_1 \cdot A_1 + \frac{Q^2}{g \cdot A_1} = \bar{h}_2 \cdot A_2 + \bar{s} \cdot A_s + \frac{Q^2}{g \cdot A_2} \quad (1.4)$$

En se basant sur la figure (1.2), on peut déterminer les expressions de : A_1 , A_2 , A_s , \bar{h}_1 , \bar{h}_2 et \bar{s}

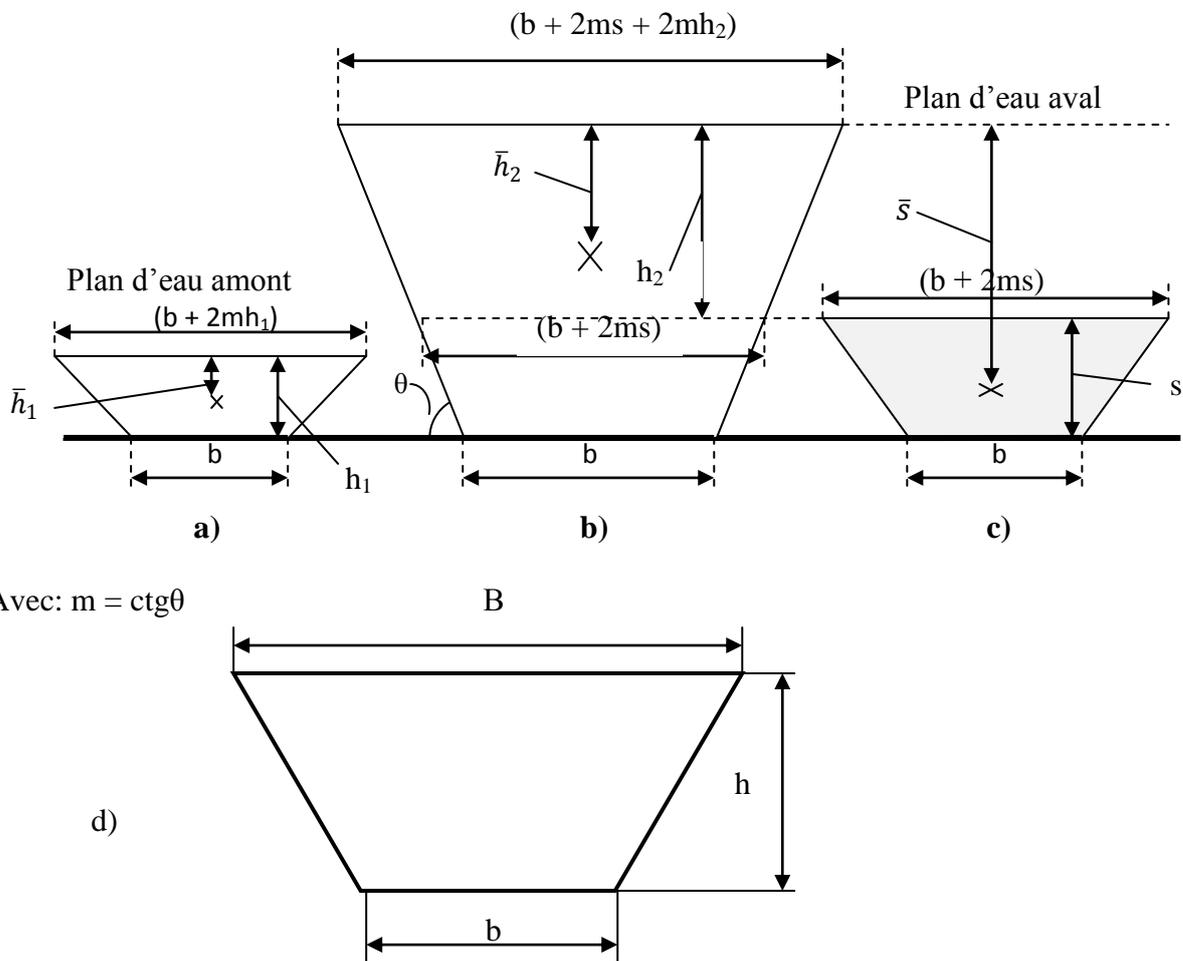


Figure 1.2: Section transversale du canal trapézoïdal

La figure (1.2.a) désigne la section trapézoïdale au pied du ressaut, c.-à-d. à la hauteur h_1 du plan d'eau amont. Le paramètre m défini comme la cotangente de l'angle d'inclinaison θ des parois du canal trapézoïdal. Donc géométriquement l'aire de la section mouillée A_1 et la distance \bar{h}_1 du centre de gravité sont données par les relations suivantes :

$$A_1 = b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2 \quad (1.5)$$

Dans le cas général et pour une section trapézoïdale la distance \bar{h} du centre de gravité est donnée par l'expression géométrique suivante :

$$\bar{h} = \frac{h}{3} \cdot \left(\frac{B+2b}{B+b} \right)$$

Où B : est la grande base du trapèze. D'après la figure (1-2-d) $B = b + 2mh$

Donc :

$$\bar{h} = \frac{h}{3} \cdot \left(\frac{3b+2mh}{2b+2mh} \right) = \frac{h}{6} \cdot \left(\frac{3b+2mh}{b+mh} \right)$$

On multipliant et on divise l'expression résultante par h en obtient :

$$\bar{h} = \frac{h^2}{6} \cdot \left(\frac{3b+2mh}{bh+mh^2} \right) = \frac{h^2}{6} \cdot \left(\frac{3b+2mh}{A} \right)$$

Finalement pour la section amont du ressaut la profondeur du centre de gravité s'écrit comme suit :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6} \cdot \left(\frac{3b+2mh_1}{A_1} \right) \quad (1.6)$$

Signalant ici qu'on peut déterminer le centre de gravité par le principe des moments statiques, et cela ce fait par rapport à un axe horizontal confondu avec la surface libre de l'écoulement.

La figure (1.2.b) désigne la section trapézoïdale à l'aval du ressaut forcé de type A où la fin de son rouleau se trouve à l'extrémité amont de la marche positive. A l'aval du rouleau, le liquide franchit la marche par-dessus. Le profil liquide en écoulement au dessus de la marche prend toujours la forme trapézoïdale. L'aire de la section mouillée A_2 et la distance \bar{h}_2 du centre de gravité sont données par les relations suivantes :

$$A_2 = b \cdot h_2 + 2 \cdot m \cdot s \cdot h_2 + m \cdot h_2^2 \quad (1.7)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6} \cdot \left(\frac{3b+6ms+2mh_2}{A_2} \right) \quad (1.8)$$

Les mêmes démarches se font pour la figure (1.2.c), mais dans ce cas la distance du centre de gravité par rapport à l'axe horizontale de la surface libre \bar{s} , c'est le centre de gravité propre à la marche positive en ajoutant la hauteur d'eau aval h_2 . Donc l'aire de la section trapézoïdale de la marche positive ainsi la distance \bar{s} s'écrit :

$$A_s = b \cdot s + m \cdot s^2 \quad (1.9)$$

$$\bar{s} = h_2 + \frac{s^2}{6} \cdot \left(\frac{3b+2ms}{A_s} \right) \quad (1.10)$$

Dans un écoulement brusquement varié tel que le ressaut hydraulique en exprime le débit volume Q et l'aire de la section mouillée A , par le paramètre adimensionnel F_1 ou nombre de *Froude* de l'écoulement incident à l'amont du ressaut. Ce nombre est donné généralement par la relation universelle:

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^3} \cdot \frac{\partial A_1}{\partial h_1} \quad (1.11)$$

La relation (1.11) montre que le nombre de *Froude* F_1 dépend de quatre paramètres tels que :

- Q est le débit volume écoulé à travers le canal trapézoïdal ;
- G est l'accélération de la pesanteur ;
- A_1 est l'aire de la section mouillée au niveau de h_1 ;
- $\frac{\partial A_1}{\partial h_1}$ est la dérivée partielle de l'aire de la section mouillée initiale par rapport à la hauteur conjuguée h_1 . En réalité le rapport $\frac{\partial A_1}{\partial h_1} = B$, ces tous simplement la largeur superficielle de la lame d'eau écoulé. On aura donc : $\partial A_1 = B \cdot \partial h_1$.

Pour une section trapézoïdale tel notre cas, la dérivée partielle de A_1 par rapport à h_1 nous donne : $\frac{\partial A_1}{\partial h_1} = \frac{\partial}{\partial h_1}(b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2) = b + 2mh_1$, donc la relation (1.11) prend la forme :

$$F_1^2 = \frac{Q^2 \cdot (b+2mh_1)}{g \cdot A_1^3} \quad (1.12)$$

En remplaçant les relations (1.6), (1.8), (1.10) et (1.12) dans la relation (1.4) on obtient :

$$\frac{h_1^2}{6} \cdot \left[\frac{3b+2mh_1}{A_1} \right] \cdot A_1 + \frac{A_1^3}{(b+2mh_1)} \cdot \frac{F_1^2}{A_1} =$$

$$\frac{h_2^2}{6} \cdot \left[\frac{3b+6ms+2mh_2}{A_2} \right] \cdot A_2 + \left[h_2 + \frac{s^2}{6} \cdot \left(\frac{3b+2ms}{A_s} \right) \right] A_s + \frac{A_1^3}{(b+2mh_1)} \cdot \frac{F_1^2}{A_2}$$

Après simplification des sections mouillées A_1 , A_2 et A_s on obtient :

$$h_1^2 \cdot \left(\frac{1}{2}b + \frac{1}{3}mh_1 \right) + \frac{A_1^2}{(b+2mh_1)} \cdot F_1^2 =$$

$$h_2^2 \cdot \left(\frac{1}{2}b + ms + \frac{1}{3}mh_2 \right) + \left[h_2 A_s + s^2 \cdot \left(\frac{1}{2}b + \frac{1}{3}ms \right) \right] + \frac{A_1^3}{(b+2mh_1)} \cdot \frac{F_1^2}{A_2}$$

On remplace les sections mouillées par leurs expressions :

$$h_1^2 \cdot \left(\frac{1}{2}b + \frac{1}{3}mh_1 \right) + \frac{(bh_1 + mh_1^2)^2}{(b + 2mh_1)} \cdot F_1^2 =$$

$$h_2^2 \cdot \left(\frac{1}{2}b + ms + \frac{1}{3}mh_2 \right) + \left[h_2 \cdot (bs + ms^2) + s^2 \cdot \left(\frac{1}{2}b + \frac{1}{3}ms \right) \right] +$$

$$\frac{(bh_1 + mh_1^2)^3}{(b + 2mh_1)} \cdot \frac{F_1^2}{(bh_2 + 2msh_2 + mh_2^2)}$$

En mettant bh_1 en facteur on obtient :

$$h_1^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{mh_1}{b} \right) + \frac{h_1^2 \left(1 + \frac{mh_1}{b} \right)^2}{\left(1 + 2 \cdot \frac{mh_1}{b} \right)} \cdot F_1^2 =$$

$$h_2^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{ms}{b} + \frac{1}{3} \cdot \frac{mh_2}{b} \right) + h_2 \cdot s \cdot \left(1 + \frac{ms}{b} \right) + s^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{ms}{b} \right) +$$

$$\frac{h_1^3 \cdot \left(1 + \frac{mh_1}{b} \right)^3}{\left(1 + 2 \cdot \frac{mh_1}{b} \right) h_2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{ms}{b} + \frac{mh_2}{b} \right)} \cdot F_1^2 \quad (1.13)$$

1.3. Analyse dimensionnelle

La relation (1.13) est obtenue par l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections (1-1) et (2-2) (figure 1.1) du ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive et évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale. Dans la pratique on ne peut pas utiliser la relation (1.13) pour le dimensionnement des bassins d'amortissements, car sa forme implicite et dimensionnelle, donne des difficultés sur la projection du modèle physique au modèle réel. Donc c'est nécessaire de passer à la forme adimensionnelle.

La littérature montre que ces rapports adimensionnels peuvent être exprimés par les relations suivantes :

- Le rapport des hauteurs conjuguées : $Y = \frac{h_2}{h_1}$
- La hauteur relative de la marche positive : $S = \frac{s}{h_1}$
- Le rapport de forme : $M = \frac{mh_1}{b}$

Si en reprend la relation (1.13) est on divise les membres par h_1^2 on obtient :

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{mh_1}{b} \right) + \frac{\left(1 + \frac{mh_1}{b}\right)^2}{\left(1 + 2\frac{mh_1}{b}\right)} \cdot F_1^2 = \\ & \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{ms}{b} + \frac{1}{3} \cdot \frac{mh_2}{b} \right) + \frac{h_2}{h_1} \cdot \frac{s}{h_1} \cdot \left(1 + \frac{ms}{b} \right) \\ & \quad + \left(\frac{s}{h_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{ms}{b} \right) \\ & + \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{\left(1 + \frac{mh_1}{b}\right)^3}{\left(1 + 2\frac{mh_1}{b}\right) \cdot \left(1 + 2\frac{ms}{b} + \frac{mh_2}{b}\right)} \cdot F_1^2 \end{aligned}$$

L'analyse dimensionnelle donne :

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} M \right) + \frac{(1+M)^2}{(1+2M)} \cdot F_1^2 = \\ & Y^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + MS + \frac{1}{3} MY \right) + Y \cdot S \cdot (1 + MS) + S^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cdot MS \right) + \\ & \frac{1}{Y} \cdot \frac{(1 + M)^3}{(1 + 2M) \cdot (1 + 2MS + MY)} \cdot F_1^2 \end{aligned}$$

D'où :

$$F_1^2 = \frac{\frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \cdot \left[Y^2 \cdot \left(1 + 2MS + \frac{2}{3}MY \right) + 2SY \cdot (1 + MS) + S^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{3}MS \right) - \left(1 + \frac{2}{3}M \right) \right]}{\left[1 - \frac{(1+M)}{Y \cdot (1 + 2MS + MY)} \right]} \quad (1.14)$$

Donc pour un ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive, évaluant dans un canal de section droite trapézoïdal la relation (1.14) se présente et elle exprime le nombre de *Froude* F_1 en fonction du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y , la hauteur relative de la marche positive S et en fin le rapport de forme M .

Les études théoriques montrent que pour le cas du ressaut classique, le nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident ne dépend que du rapport des hauteurs conjuguées Y et de rapport de forme M . Si on remplace $S = 0$ dans la relation (1.14), on obtient :

$$F_1^2 = \frac{\frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{3}MY \right) - \left(1 + \frac{2}{3}M \right) \right]}{\left[1 - \frac{(1+M)}{Y \cdot (1+MY)} \right]} \quad (1.15)$$

1.4. Effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique

La figure (1.4) représente une représentation graphique de la variation théorique du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de nombre de *Froude* F_1 . Les courbes en traits continus pour ($S = 1, 2, 3, 4$ et 5) sont tracées selon la relation théorique (1.14). Et la courbe en pointillé est tracée selon la relation théorique (1.15) du ressaut classique pour ($S = 0$).

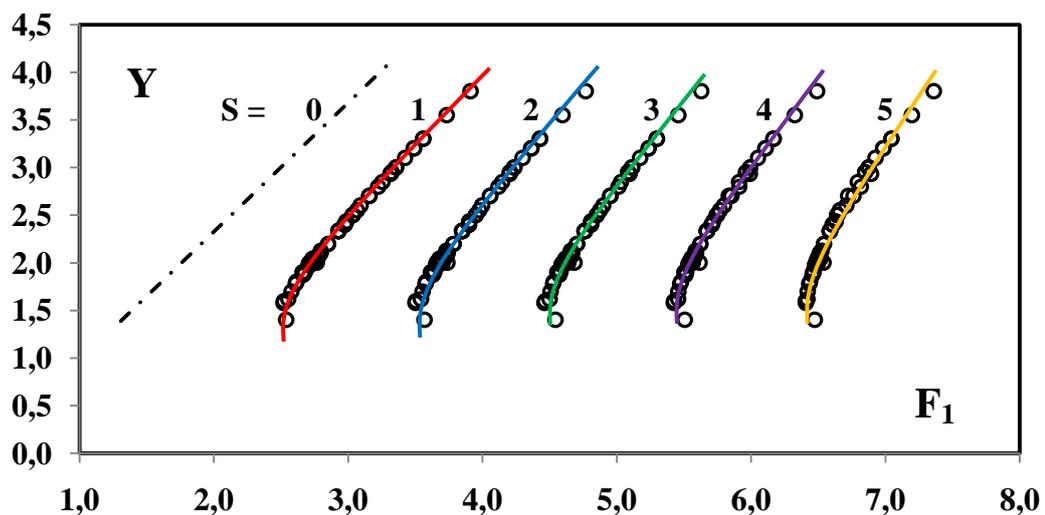


Figure (1.3) : Variation de Y en fonction de F_1 selon la relation (1.14) pour un ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive pour différentes S . (...) Courbe correspondant au ressaut classique dans un canal trapézoïdal ($S = 0$) selon la relation (1.15).

D'après la figure (1.3), on remarque que plus la hauteur relative de la marche positive augmente, plus le rapport Y des hauteurs conjuguées diminue, pour une valeur de nombre de *Froude* F_1 fixe.

Une autre représentation graphique qui s'impose dans ce chapitre (figure 1.4), c'est de représenter la distribution des points expérimentaux obtenus autour des courbes théoriques tracées selon la relation (1.14). On remarque que la plus part des points expérimentaux se trouvent dans les intervalles théoriques des hauteurs relatives des marches positives. Les points qui se trouvent hors ces intervalles dus aux hypothèses théoriques de départ pendant l'application de l'équation de la quantité de mouvement.

Tableau 1.2: Ecart relatifs entre le F_{1ex} et le F_{1th}

F_{1ex}	F_{1th}	$(F_{1ex}-F_{1th})/F_{1ex}$ %									
3,72	3,94	5,84	6,95	5,73	17,53	4,91	4,22	14,05	4,33	3,60	16,68
4,35	4,46	2,63	7,38	6,27	15,07	6,02	4,63	23,09	4,37	3,94	9,85
4,91	5,01	2,02	8,62	7,35	14,82	6,02	5,35	11,23	2,66	2,34	11,91
5,40	5,51	1,95	8,86	8,02	9,40	5,82	5,79	0,61	2,97	2,64	11,13
6,01	6,14	2,31	12,3	9,19	25,37	6,65	6,74	1,37	2,75	2,89	4,84
6,21	7,35	18,25	3,46	3,16	8,87	7,36	7,14	2,95	3,13	3,14	0,21
8,28	7,90	4,63	4,41	3,63	17,69	3,08	2,74	10,98	3,43	3,46	0,80
8,17	9,08	11,15	4,65	3,90	16,09	3,37	3,06	9,01	2,91	2,43	16,34
9,09	10,0	10,61	5,23	4,36	16,59	3,66	3,30	9,81	3,00	2,80	6,87
3,46	3,71	7,21	5,62	4,84	13,96	3,97	3,59	9,42	3,17	2,96	6,54
4,26	4,77	11,91	6,02	5,55	7,91	4,24	3,90	7,84	3,17	3,24	2,32
4,82	4,02	16,53	3,30	3,23	2,03	3,32	2,68	19,40	2,27	2,21	2,25
6,84	4,74	30,74	3,93	3,48	11,36	4,06	3,01	25,83	2,22	2,21	0,41
6,01	5,31	11,61	4,10	3,87	5,80	4,19	3,30	21,15			

D'après les résultats regroupés dans le tableau 1.2, 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 positive, c'est la raison pour laquelle nous avons proposé de corriger la relation théorique (1.14) par les mesures expérimentales.

1.5.2. Correction de la relation théorique par les mesures expérimentales

La figure (1.5) illustre la variation des nombres de *Froude* expérimentaux F_{1exp} en fonction de ceux théorique $F_{1thé}$ en vertu des données du tableau (1.2). Cette figure dénote un décalage du nuage de points par rapport à la première bissectrice qui augmente au fur et à mesure que le nombre de *Froude* incident augmente. Ceci a été commenté au sous titre précédent.

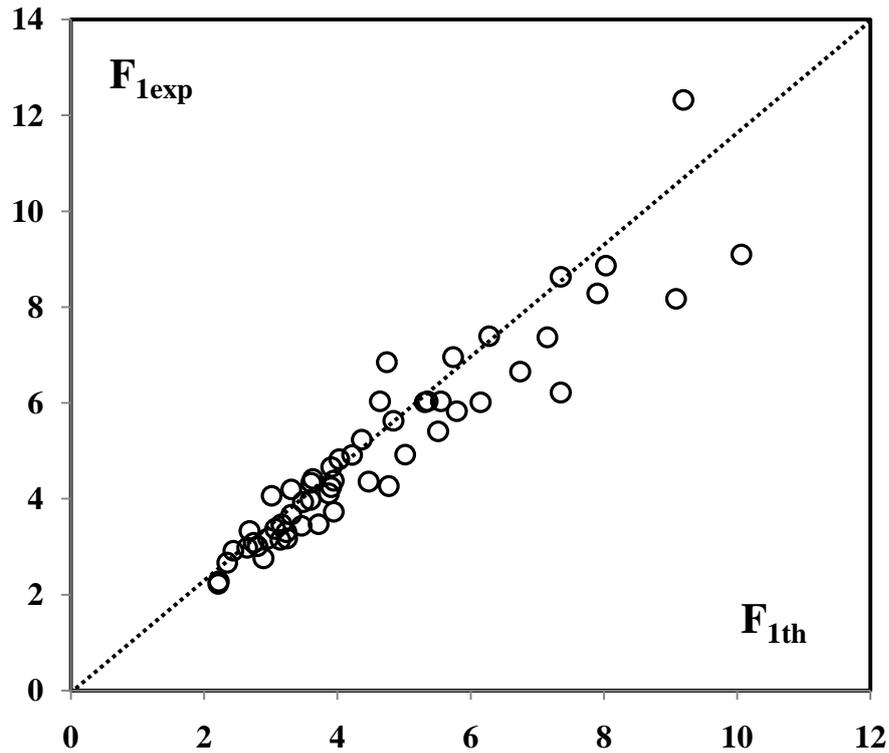


Figure 1.5 : Représentation graphique des nombres de Froude expérimental (F_{1exp}) et théorique (F_{1th}). (.....) Première bissectrice.

Pour palier à cet écart, nous proposons un ajustement de la relation théorique par la méthode des moindres carrés, en se basant sur les résultats expérimentaux.

L'ajustement entre les deux paramètres a abouti à une droite (figure 1.6) qui passe par l'origine de pente égale à 1,03.

$$F_{1exp} = 1,03F_{1th} \quad (1.16)$$

Le but de cet ajustement est de corriger la relation théorique (1.14), par le coefficient de pente 1.03.

$$F_1^2 = 0,53 \cdot \frac{\frac{(1+2M)}{(1+M)^2} \cdot [Y^2 \cdot (1+2MS + \frac{2}{3}MY) + 2SY \cdot (1+MS) + S^2 \cdot (1 + \frac{2}{3}MS) - (1 + \frac{2}{3}M)]}{[1 - \frac{(1+M)}{Y \cdot (1+2MS + MY)}]} \quad (1.17)$$

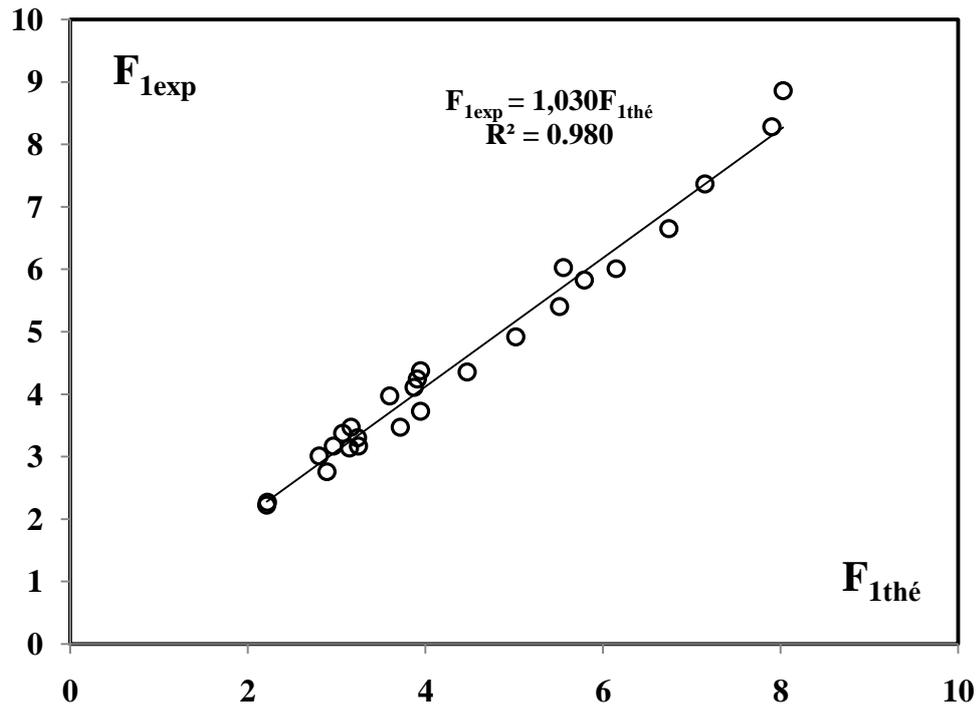


Figure 1.6 : Correction du nombre de Froude théorique par les données expérimentales

1.6. Ajustement de la relation théorique

Dans le but de faciliter les calculs hydraulique et de remplacer la relation implicite (1.17) de notre développement théorique, par une autre relation plus pratique et explicite. Dans ce cas nous allons effectuer un ajustement des courbes théorique situer au-dessus de la courbe limite et de les remplacer par des droites presque tangente comme le désigne la figure (1.7).

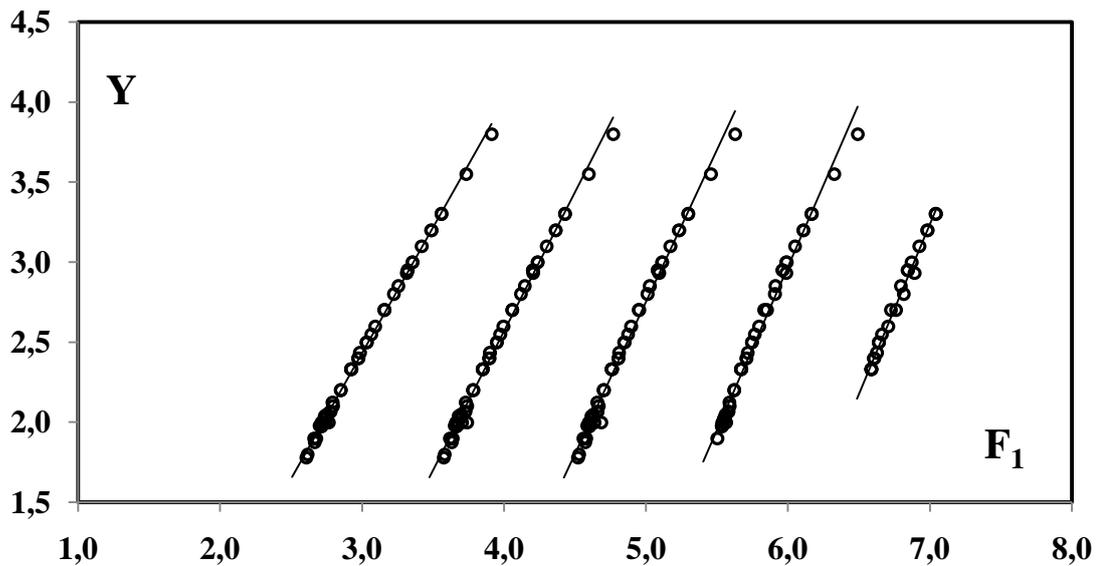


Figure (1.7) : Variation $Y = f(F_1)$. (o) Courbe théorique selon la relation (1.18). (—) Droite d'ajustement.

En remarque que toutes les droites données par la figure (1.7), sont de type linéaire de la forme

$$Y = a F_1 - b \quad (1.18)$$

Les droites d'ajustements théoriques obtenues pour chaque valeur de S sont données par le tableau (1.3) :

Tableau 1.3 : Equations des courbes d'ajustement pour chaque valeur de S .

variation de S	Equation de la courbe d'ajustement	
1	$Y_1 = 1,569F_1 - 2,276$	$R^2 = 0,998$
2	$Y_2 = 1,738F_1 - 4,385$	$R^2 = 0,995$
3	$Y_3 = 1,900F_1 - 6,752$	$R^2 = 0,992$
4	$Y_4 = 2,041F_1 - 9,276$	$R_2 = 0,990$
5	$Y_5 = 2,117F_1 - 11,580$	$R_2 = 0,990$

Les paramètres a et b varient en fonction de la hauteur relative de la marche positive selon le tableau (1.4) :

Tableau (1.4) : Variation des paramètres a et b en fonction de la hauteur relative S de la marche Positive.

S	a	b
1	1,569	2,276
2	1,738	4,385
3	1,900	6,752
4	2,041	9,276
5	2,117	11,580

La représentation graphique de S en fonction du paramètre « a », est donnée par la figure (1.8).

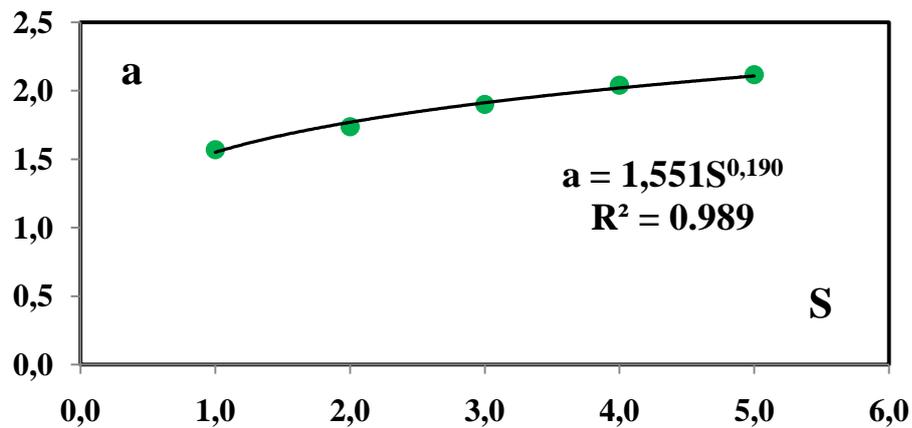


Figure (1.8) : Variation de « a » en fonction de S selon le tableau 1.4.

Selon la courbe représentée par la figure (1.8) on constate que, la variation du paramètre « a » en fonction de « S », est de type puissance $y = ax^b$. Donc l'équation de cette courbe est donnée par la relation (1.19) :

$$a = 1,551S^{0,190} \quad (1.19)$$

Par ailleurs la représentation graphique de « S » en fonction de « b » est donnée par la figure (1.9)

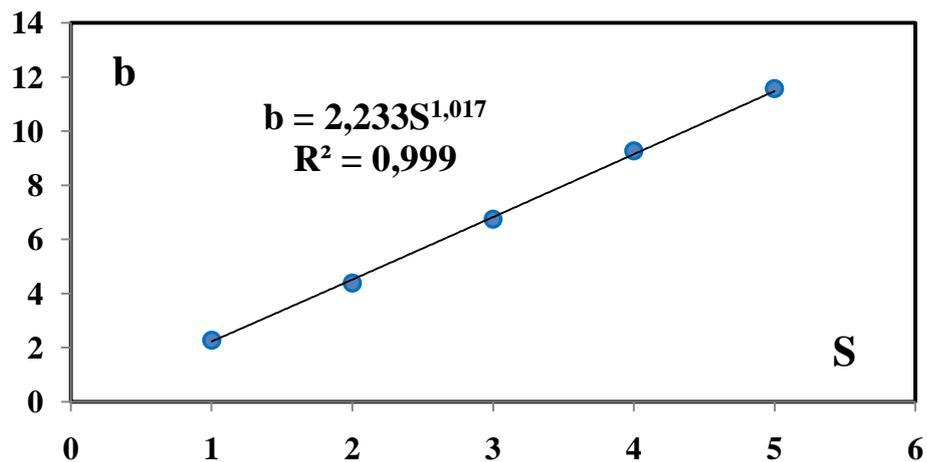


Figure (1.9) : Variation de « b » en fonction de S selon le tableau (1.4)

La figure (1.9) montre que la courbe obtenue par cet ajustement est de type linéaire. Celle-ci est représentée par la relation (1.20).

$$b = 2,233S^{1,017} \quad (1.20)$$

Si on remplace les relations (1.19) et (1.20) dans la relation (1.18) on obtient l'expression du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de *Froude* F_1 pour une gamme de variation du rapport de forme M : $0,031 \leq M \leq 0,093$.

$$Y_{app} = 1,551S^{0,19}F_1 - 2,233S^{1,017} \quad (1.21)$$

Pour : $2,60 \leq F_1 \leq 7,04$

On a abouti donc à une relation explicite qui donne la possibilité de déterminer le rapport des hauteurs conjuguées Y , connaissant la valeur du nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident et la hauteur relative de la marche positive S .

Tableau 1.5: Ecarts relatifs entre Y résulte de la relation (1.17) et Y_{app} calculés par la Relation approchée (1.21).

Y	S = 1			S = 2			S = 3		
	F_1	Y_{app}	$\Delta Y = (Y - Y_{app})/Y$ %	F_1	Y_{app}	$\Delta Y = (Y - Y_{app})/Y$ %	F_1	Y_{app}	$\Delta Y = (Y - Y_{app})/Y$ %
2.55	3.06	2.52	1.18	3.97	2.51	1.46	4.87	2.49	2.52
2.40	2.97	2.38	0.80	3.90	2.38	0.95	4.80	2.36	1.76
2.50	3.03	2.47	1.09	3.95	2.47	1.35	4.84	2.44	2.35
2.40	2.97	2.38	0.80	3.90	2.38	0.95	4.80	2.36	1.76
2.50	3.03	2.47	1.09	3.95	2.47	1.35	4.84	2.44	2.35
3.20	3.49	3.18	0.64	4.36	3.20	0.04	5.23	3.18	0.70
3.00	3.35	2.97	1.02	4.24	2.98	0.78	5.11	2.95	1.76
3.30	3.56	3.29	0.41	4.43	3.32	0.50	5.29	3.30	0.08
3.80	3.91	3.83	0.89	4.77	3.92	3.10	5.62	3.93	3.36
2.00	2.77	2.06	2.79	3.74	2.10	4.85	4.68	2.13	6.32
3.00	3.35	2.97	1.02	4.24	2.98	0.78	5.11	2.95	1.76
2.70	3.16	2.67	1.28	4.06	2.66	1.50	4.94	2.63	2.64
2.95	3.32	2.92	1.09	4.21	2.92	0.96	5.08	2.89	1.98
3.10	3.42	3.07	0.84	4.30	3.09	0.40	5.17	3.06	1.26
2.95	3.32	2.92	1.09	4.21	2.92	0.96	5.08	2.89	1.98
2.85	3.25	2.82	1.21	4.14	2.81	1.25	5.02	2.78	2.35
3.20	3.49	3.18	0.64	4.36	3.20	0.04	5.23	3.18	0.70
3.30	3.56	3.29	0.41	4.43	3.32	0.50	5.29	3.30	0.08
3.55	3.73	3.56	0.21	4.60	3.61	1.77	5.45	3.61	1.59
2.20	2.85	2.19	0.68	3.78	2.18	1.06	4.70	2.16	1.63
2.33	2.93	2.30	1.24	3.85	2.29	1.78	4.76	2.27	2.57
2.20	2.85	2.19	0.68	3.78	2.18	1.06	4.70	2.16	1.63
2.43	2.99	2.40	1.43	3.90	2.39	1.97	4.80	2.36	2.81
2.60	3.09	2.56	1.47	4.00	2.55	1.81	4.89	2.53	2.60
2.80	3.22	2.77	1.19	4.12	2.77	1.12	5.01	2.75	1.68
2.33	2.93	2.30	1.24	3.85	2.29	1.78	4.76	2.27	2.57
2.00	2.74	2.02	1.16	3.70	2.03	1.63	4.63	2.04	1.86
2.10	2.79	2.10	0.05	3.74	2.10	0.01	4.66	2.09	0.27
2.07	2.78	2.07	0.37	3.73	2.08	0.45	4.65	2.07	0.34
2.07	2.78	2.07	0.37	3.73	2.08	0.45	4.65	2.07	0.34
2.33	2.93	2.30	1.24	3.85	2.29	1.78	4.76	2.27	2.57
2.33	2.93	2.30	1.24	3.85	2.29	1.78	4.76	2.27	2.57
2.93	3.31	2.91	0.89	4.20	2.92	0.47	5.09	2.91	0.82
2.70	3.16	2.66	1.36	4.06	2.66	1.52	4.95	2.64	2.21
2.00	2.73	2.00	0.21	3.68	1.99	0.70	4.61	1.98	0.82
2.03	2.74	2.02	0.45	3.69	2.00	1.02	4.61	2.00	1.20
1.98	2.71	1.98	0.06	3.67	1.97	0.35	4.60	1.97	0.39
2.03	2.74	2.02	0.45	3.69	2.00	1.02	4.61	2.00	1.20
2.03	2.74	2.02	0.45	3.69	2.00	1.02	4.61	2.00	1.20
1.88	2.67	1.90	1.46	3.63	1.90	1.59	4.57	1.91	1.95
1.90	2.68	1.92	1.05	3.64	1.92	1.02	4.57	1.92	1.26
1.98	2.71	1.98	0.06	3.67	1.97	0.35	4.60	1.97	0.39
2.05	2.75	2.04	0.66	3.70	2.02	1.29	4.62	2.02	1.53
2.13	2.79	2.10	1.16	3.73	2.08	1.91	4.65	2.08	2.26
1.80	2.62	1.82	1.29	3.58	1.82	0.96	4.52	1.83	1.50
1.98	2.70	1.96	1.06	3.65	1.94	1.98	4.58	1.94	1.85
1.78	2.61	1.81	1.6	3.58	1.81	1.49	4.52	1.82	2.11
2.00	2.71	1.98	1.22	3.66	1.96	2.16	4.59	1.96	2.04
1.90	2.66	1.90	0.26	3.62	1.88	1.01	4.55	1.89	0.76
2.04	2.74	2.01	1.48	3.68	1.99	2.44	4.61	1.99	2.34

Tableau 1.5 (suite et fin) : Ecart relatifs entre Y résulte de la relation (1.17) et Y_{app} calculés Par la Relation approchée (1.21).

S = 4				S = 5			
Y	F ₁	Y _{app}	$\Delta Y=(Y-Y_{app})/Y$ %	Y	F ₁	Y _{app}	$\Delta Y=(Y-Y_{app})/Y$ %
2.55	5.77	2.49	2.21	2,55	6.66	2.55	0.03
2.40	5.71	2.37	1.09	2,40	6.61	2.44	1.62
2.50	5.75	2.45	1.94	2,50	6.64	2.51	0.43
2.40	5.71	2.37	1.09	2,40	6.61	2.44	1.62
2.50	5.75	2.45	1.94	2,50	6.64	2.51	0.43
3.20	6.11	3.18	0.58	3,20	6.98	3.23	1.01
3.00	5.99	2.95	1.74	3,00	6.87	3.00	0.10
3.30	6.17	3.30	0.11	3,30	7.04	3.36	1.70
3.80	6.49	3.95	4.07	2,70	6.72	2.68	0.61
3.00	5.99	2.95	1.74	2,95	6.85	2.94	0.31
2.70	5.83	2.63	2.54	3,10	6.93	3.11	0.40
2.95	5.96	2.89	1.97	2,95	6.85	2.94	0.31
3.10	6.05	3.06	1.20	2,85	6.79	2.83	0.58
2.95	5.96	2.89	1.97	3,20	6.98	3.23	1.01
2.85	5.91	2.78	2.32	3,30	7.04	3.36	1.70
3.20	6.11	3.18	0.58	2,33	6.59	2.40	2.66
3.30	6.17	3.30	0.11	2,43	6.63	2.48	2.05
3.55	6.33	3.62	2.02	2,60	6.71	2.65	1.92
2.20	5.62	2.20	0.06	2,80	6.82	2.88	2.73
2.33	5.67	2.30	1.31	2,33	6.59	2.40	2.66
2.20	5.62	2.20	0.06	2, 33	6.59	2.40	2.66
2.43	5.72	2.39	1.69	2,33	6.59	2.40	2.66
2.60	5.80	2.56	1.57	2,93	6.89	3.04	3.65
2.80	5.91	2.78	0.61	2,70	6.76	2.76	2.22
2.33	5.67	2.30	1.31				
2.00	5.56	2.09	4.31				
2.10	5.59	2.13	1.67				
2.07	5.58	2.12	2.42				
2.07	5.58	2.12	2.42				
2.33	5.67	2.30	1.31				
2.33	5.67	2.30	1.31				
2.93	5.99	2.94	0.34				
2.70	5.85	2.67	1.18				
2.00	5.54	2.04	2.07				
2.03	5.55	2.06	1.61				
1.98	5.53	2.03	2.59				
2.03	5.55	2.06	1.61				
2.03	5.55	2.06	1.61				
1.98	5.53	2.03	2.59				
2.05	5.56	2.07	1.21				
2.13	5.59	2.13	0.30				
1.98	5.53	2.02	2.10				
2.00	5.54	2.04	1.86				
1.90	5.50	1.96	3.38				
2.04	5.56	2.07	1.49				

D'après les tableaux ci-dessus on remarque que la relation (1.21) occasionne des écarts relatifs inférieurs à 5% par rapport à la relation implicite (1.17).

1.7. 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 type A, forcé par marche positive évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale. Ce développement nous a mené à proposer une relation théorique (relation 1.14). Cette relation a été établie sur la base l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre les sections en amont et en aval du ressaut.

Connaissant le nombre de *Froude* F_1 et la hauteur relative S de la marche positive, le rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ peut être obtenue à partir de la relation (1.14). Puisque la hauteur h_1 du ressaut à sa section amont est toujours connue, la valeur du rapport de forme M est connue et à partir de la valeur de Y , on peut déterminer la hauteur h_2 du ressaut à sa section aval. En outre, la relation (1.14) mène à celle (1.15) du ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal trapézoïdal en écrivant $S = 0$. Cette dernière considération conforme la validation du développement théorique entrepris.

Cependant, la confrontation des valeurs des nombres de *Froude* F_1 , déterminés à partir de la relation universelle (1.12), en utilisant les valeurs expérimentales avec celles déterminées par application de la relation théorique (1.14), a montré un décalage plus ou moins important. Ce décalage a été attribué en grande partie à la singularité au niveau de l'extrémité en amont de la marche positive. Cette dernière constatation nous a aidés à corriger la relation (1.14) par les mesures expérimentales, la relation (1.17) est alors obtenue.

Par ailleurs, l'application de la relation générale (1.17) nécessite l'utilisation d'un procédé itératif puisqu'elle se présente, analytiquement, sous une forme implicite, vis-à-vis du rapport des hauteurs conjuguées Y . Pour résoudre le problème, nous avons proposé de remplacer cette dernière relation par la relation explicite (1.21). Cette dernière permet alors, la détermination aisée du rapport des hauteurs conjuguées Y , en fonction du nombre de *Froude* F_1 et de la hauteur relative S de la marche positive

Discussion et conclusion générale

La présente étude s'intéresse à développer, expérimentalement et théoriquement, deux types du ressaut hydraulique, à savoir, le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive et le ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive, évoluant dans un canal de section droite trapézoïdal, à angle d'inclinaison des talus de 73° . Trois grandes parties ont été proposées:

Dans la première partie d'étude bibliographique, nous avons examiné les trois cas du ressaut et, chaque cas représentera un chapitre.

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

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

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

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

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

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

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

A la fin du premier chapitre, nous avons présenté l'étude de *Negm et Abdel-Azim* (2000) annoncent que la cavitation est possible au voisinage de la marche positive, tel que le coefficient de la force de pression négative au niveau des marches négatives, sous l'effet du ressaut hydraulique. Mais dans le cas de la marche positive, ce coefficient est toujours positive et aucune cavitation n'est observée dans les deux cas des ressauts type A et type B.

Concernant le deuxième chapitre, nous avons passé en revue les travaux principaux, établis par *Hager et Wanoschek* (1987), sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire d'angle d'ouverture 45° . Les auteurs ont appliqué le théorème de la quantité de mouvement entre la section initiale et finale d'un canal horizontal de section trapézoïdal, puis ils ont déduit le cas de la section triangulaire. Le but de cette étude est de déterminer la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées Y et le nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident. Les résultats donnés par la représentation graphique de $Y = f(F_1)$, montrent clairement que la plus faible valeur de Y est obtenue dans le cas du profil triangulaire.

Les caractéristiques géométriques de ce type de ressaut hydraulique, ont été déterminées expérimentalement par *Argyropoulos* (1962), *Rajaratnam* (1964) et *Hager et Wanoschek* (1987). Ces derniers ont évalué les longueurs relatives L_r/h_2 et de L_j/h_2 en fonction du nombre de *Froude* F_1 et de m (pentes de talus) et ont remarqué que cette longueur varie dans le même sens que F_1 . Ils ont aussi déterminé la surface généralisée $y(x)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire.

Une grande partie de ce chapitre, préoccupe des travaux les plus récents, ceux de *Debabeche et Achour* (2007), dans le domaine du ressaut hydraulique en canal triangulaire. Ces auteurs ont contribué à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par seuil à paroi mince et épaisse. Leurs recherches expérimentales, ont été consacrées à la détermination de l'influence du seuil sur le rapport des hauteurs conjuguées Y d'une part, et de l'influence du seuil sur la longueur relative X du bassin, d'autre part. Les auteurs sur-cités ont établi des relations avec des coefficients pour chaque type de seuil. D'après les courbes obtenues ils ont remarqué qu'un décalage entre x/h_1 du ressaut contrôlé par seuil mince et épais. Pour le même nombre de *Froude* F_1 le seuil épais réduit beaucoup plus la longueur du bassin que le seuil mince. Ce décalage est remarquable aussi dans le cas du ressaut forcé. En effet, pour des nombres de *Froude* supérieurs à 3,5, la longueur relative du bassin du ressaut est largement inférieure à celle du ressaut contrôlé.

Nous avons exposé à travers ce chapitre les travaux de *Debabech et al.* (2008), concernant l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire. Les courbes d'ajustement obtenues ont montré qu'il y a un écart important, entre le ressaut de type A forcé par marche positive et son homologue analysé par *Debabech et Achour* (2007), le ressaut contrôlé par seuil.

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

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

D'après notre recherche bibliographique, nous avons constaté que le comportement du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive, évolue dans un canal trapézoïdal, ainsi que ces principales caractéristiques qui n'ont connu que très peu d'études. Plus loin et à travers notre étude théorique et expérimentale, nous avons consacré notre travail à l'analyse de ce type de ressaut.

La deuxième partie se préoccupe de l'étude expérimentale à travers laquelle nous avons abordé les travaux expérimentaux de l'étude du ressaut hydraulique, contrôlé par marche positive, et le ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive, évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique, d'angle d'inclinaison des talus de 73° .

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

Le deuxième chapitre a été consacré à la position du problème et à l'analyse expérimentale des résultats obtenus. A travers cette analyse nous avons proposé les relations fonctionnelles régissant le ressaut hydraulique, provoqué par marche positive, évoluant dans un canal trapézoïdal. Un

nombre suffisant des relations entre les différents paramètres du ressaut hydraulique, nous permettra, dans la pratique, de dimensionner notre bassin amortisseur.

Une étude comparative a été présentée à la fin de la deuxième partie de l'étude expérimentale, le but étant de déterminer le ressaut hydraulique le plus avantageux du point de vue dissipation d'énergie. Toutes ces comparaisons nous ont permis de valider notre choix entre tel ou tel type de ressaut hydraulique. Le premier résultat obtenu est la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées Y et le nombre de *Froude* F_1 ; cette relation a montré que la marche positive a diminué le rapport des hauteurs conjuguées jusqu'à $\approx 65\%$ pour un nombre de *Froude* donné, ce qui est un avantage de dimensionnement et d'économie.

En ce qui concerne la relation de la hauteur relative S de la marche positive, nous avons démontré que cette hauteur est minimum pour le cas du ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive, évoluant dans un canal de section droite trapézoïdal. C'est toujours un avantage pour le ressaut de type A. Finalement la relation reliant la longueur relative X du bassin amortisseur et le nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident, a montré qu'un décalage significatif est constaté. Ce décalage indique clairement que pour la même longueur relative du bassin d'amortissement, le ressaut forcé nécessite un nombre de *Froude* incident plus important que son homologue contrôlé pour assurer son apparition.

Donc, à partir des trois cas étudiés nous pouvons conclure que le ressaut hydraulique type A, forcé par marche positive est plus avantageux que son homologue, le ressaut contrôlé.

D'après notre étude expérimentale et à partir des résultats obtenus nous pouvons constater que, les conditions de déroulement des essais ont été satisfaisantes, compte tenu des hypothèses simplificatrices dans l'application de l'équation de la quantité de mouvement et aux pertes de charges singulières dues à l'élargissement à l'amont de la marche positive. Ces hypothèses ont influé sur les valeurs du nombre de *Froude* théorique, ce qui a nécessité une correction de la relation théorique par les résultats expérimentaux.

La troisième partie consiste au développement théorique de la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, S, M) = 0$ pour le ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive évoluant dans un canal de section droite trapézoïdal.

La relation (1.14) a été établie pour déterminer la hauteur conjuguée $Y = h_2/h_1$ du ressaut en connaissant le nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident ainsi que la hauteur relative de la marche positive S . Puisque la hauteur h_1 dans la section initiale du ressaut hydraulique est toujours connue donc le $M = (mh_1)/b$ est connu dans ce cas on peut facilement déterminer la hauteur h_2 dans la section finale du ressaut hydraulique.

Au cours de notre développement théorique, nous avons effectué la validation de la relation (1.14) on faisant éliminer la hauteur relative ($S = 0$) de la marche positive et nous avons abouti à la relation (1.15) du ressaut classique évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale.

Dans tous les cas, la relation théorique (1.14) se présente sous une forme implicite vis-à-vis du rapport Y des hauteurs conjuguées et par conséquent, son application nécessite l'utilisation d'un procédé itératif. Cette considération nous a conduits à proposer la relation explicite (1.21) par un ajustement de la relation théorique (1.14) et de la correction du nombre de *Froude* théorique par les données expérimentales. Le calcul d'erreur entre le Y issus de la relation théorique (1.17) et la relation approchée (1.21), a donné 99% des valeurs inférieures à 5% ce ci nous favorise à adopter la relation explicite (1.21) au lieu de la relation implicite (1.14).

PRINCIPALES NOTATIONS

PRICIPALES NOTATIONS

A_1	L'aire de la section mouillée initiale	$[m^2]$
A_2	L'aire de la section mouillée finale	$[m^2]$
B	La grande base du canal trapézoïdal	$[m]$
b	La petite base du canal trapézoïdal	$[m]$
F_1	Nombre de <i>Froude</i> incident	$[-]$
f	Force de frottement	$[N/m^2]$
g	Accélération de la pesanteur	$[m/s^2]$
G	Poids de la tranche liquide	$[N]$
h	Hauteur du ressaut	$[m]$
h_1	Hauteur initiale du ressaut	$[m]$
h_2	Hauteur finale du ressaut	$[m]$
\bar{h}	Distance entre le centre de gravité de la section transversale et la surface libre de l'écoulement	$[m]$
$h(x)$	Profondeur d'eau à la distance x du pied du ressaut	$[m]$
H	Charge totale	$[m]$
ΔH	Perte de charge due au ressaut	$[m]$
K	Facteur de position	$[-]$
L_B	Longueur du bassin	$[m]$
L_j	Longueur du ressaut	$[m]$
L_r	Longueur du rouleau de surface	$[m]$
L_{RF}	Longueur du rouleau de fond	$[m]$
L_S	Position du seuil ou d'une marche par rapport au début de ressaut	$[m]$
M	La hauteur relative initiale du ressaut $M = (mh_1)/b$	$[-]$
m	Cotangente de l'angle d'inclinaison d'un talus	$[-]$
P_1	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	$[N]$
P_2	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	$[N]$
P_s	Force de réaction due à la force de pression exercée sur la face latérale de la marche positive	$[N]$
Q	Débit volume	$[m^3/s]$
q	Débit unitaire	$[m^2/s]$
s	Hauteur du seuil ou de la marche positive	$[m]$
S	Hauteur relative du seuil ou de la marche positive	$[-]$
V_1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	$[m/s]$

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

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Première partie

Chapitre I :

Figure 1.1 : Ressaut hydraulique.....	3
Figure 1.2.a : Ressaut ondulé.....	4
Figure 1.2.b : Le pré-ressaut.....	4
Figure 1.2.c : Le ressaut de transition.....	5
Figure 1.2.d : Le ressaut stable.....	5
Figure 1.2.e : Le ressaut clapoteux.....	5
Figure 1.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut.....	6
Figure 1.4 : Représentation graphique de l'équation de <i>Bélanger</i>	7
Figure 1.5 : Hauteur du ressaut.....	8
Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique.....	8
Figure 1.7 : Ligne de charge totale le long du ressaut classique.....	11
Figure 1.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction de nombre de <i>Froude</i> F_1	12
Figure 1.9 : Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.....	13
Figure 1.10 : Variation expérimentale du nombre de <i>Froude</i> F_1 en fonction de la hauteur Relative s/h_1 du seuil à paroi mince quelques valeurs de x/h_2 , selon <i>Forster</i> et <i>Skrinde</i> (1950).....	13
Figure 1.11 : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L	14
Figure 1.12 : Variation expérimentale du nombre de <i>Froude</i> F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon <i>Forster</i> et <i>Skrinde</i> (1950).....	15
Figure 1.13 : Ressaut forcé par marche positive de hauteur « s ».....	15
Figure 1.14 : Variation du nombre de <i>Froude</i> F_1 , en fonction de h_3/h_1 et de la hauteur relative x/h_1 de la marche positive, selon <i>Forster</i> et <i>Skrinde</i> (1950).....	16
Figure 1.15 : Cas typique d'écoulement divisés en trois classes, selon <i>Rand</i> (1957).....	17
Figure 1.16 : Hauteurs conjuguées h_2/h_1 , $f(S, K)$ pour $F_1 = 9$, valeurs et courbes expérimentales.....	18
Figure 1.17 : Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $F_1 = 5.23$ et $S = 1.42$	19
Figure 1.18 : Ressaut forcé par seuil, selon <i>Bretz</i> (1965).....	20
Figure 1.19 : Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_A = f(F_1, S)$ avec $0.5 \leq S \leq 6$. $S = s/h_1$	21
Figure 1.20 : Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_B = f(F_1, S)$	21

Figure 1.21 : Ressaut forcé type B_{\min} . Rapport des hauteurs conjuguées $Y_{B-\min} = f(F_1, S)$	22
Figure 1.22 : Longueur relative $\lambda_S = f(F_1)$ pour le ressaut forcé.....	23
Figure 1.23 : Longueur relative $\lambda_B = f(F_1)$ pour le ressaut forcé.....	23
 <u>Chapitre II :</u>	
Figure 2.1 : Ressaut en canal semi-triangulaire, selon <i>Hager et Wanoschek</i> (1987).....	28
Figure 2.2 : Variation du nombre de <i>Froude</i> F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M	29
Figure 2.3 : Longueur relative L_T/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1 , selon <i>Hager et Wanoschek</i> (1987) ($m = 1$). (Δ) : $m = 0.58$, selon <i>Rajaratnam</i> (1964).....	30
Figure 2.4 : Longueur relative L_j/h_2 du ressaut du ressaut triangulaire en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1 , selon <i>Hager et Wanoschek</i> (1987) ($m = 1$), (∇) : $m = 0.44$, selon <i>Argyropoulos</i> (1962).....	31
Figure 2.5 : Profil de surface généralisé $y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal Triangulaire ($m = 1$), selon <i>Hager et Wanoschek</i> (1987).....	32
Figure 2.6 : a) Ressaut contrôlé. b) Ressaut forcé de type B_{\min}	33
Figure 2.7 : profil de l'écoulement au-dessus des seuils.....	33
Figure 2.8 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1 de l'écoulement incident, dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour ($m = 1$).....	34
Figure 2.9 : Variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative S du seuil. Points expérimentaux pour ($m = 1$).....	35
Figure 2.10 : Variation expérimentale de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1 , pour un ressaut évaluant dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour ($m = 1$).....	36
Figure 2.11 : Variation expérimentale de la longueur relative X du bassin en fonction Du nombre de <i>Froude</i> F_1 , pour un ressaut évaluant dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour ($m = 1$).....	37
Figure 2.12 : Schéma du ressaut hydraulique provoqué par marche positive. a) forcé de type A b) contrôlé.....	38
Figure 2.13 : Variation expérimentale de $(Y_A - 1)$ en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1 Pour le ressaut de type A.....	39
Figure 2.14 : Variation de la hauteur relative S_A de la marche en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1	39

Figure 2.15 : Variation de $(Y_A - 1)$ en fonction de la hauteur relative S_A de la marche positive.....	40
Figure 2.16 : Variation de $(S_A + F_1^{0.4})$ en fonction de la position relative $\lambda_r = L_r/h_1$ de la marche positive.....	41
Figure 2.17 : Variation de $(S_A + F_1^{0.4})$ en fonction de la longueur relative $\lambda_B = L_B/h_1$ du bassin.....	42

Chapitre III :

Figure 3.1 : Variation du nombre de <i>Froude</i> F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M	47
Figure 3.2 : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdal.....	48
Figure 3.3 : Représentation graphique de la relation (3.12) du rendement η en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1	49

Deuxième partie

Chapitre I :

Figure 1.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal, ayant servi à l'expérimentation.....	55
Figure 1.2 : Photographie du model expérimentale du canal.....	56
Figure 1.3 : Pompe centrifuge axiale.....	56
Figure 1.4 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction Latérale ayant servi à la mesure du débit.....	57
Figure 1.5 : Photographie d'une boîte en charge.....	57
Figure 1.6 : Photographie d'une série de convergent.....	58
Figure 1.7 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.....	59
Figure 1.8 : Photographie des marches positives testée.....	60
Figure 1.9 : Photographie d'une marche positive.....	60

Chapitre II :

Figure 2.1 : Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive.....	65
Figure 2.2 : Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive, évoluant dans un canal trapézoïdal. Vue de profil.....	65
Figure 2.3 : Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive, évoluant dans un canal trapézoïdal. Vue de face.....	65

Figure 2.4 : Ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive.....	66
Figure 2.5 : Photographie d'un ressaut hydraulique type A, forcé par marche positive, évoluant dans un canal trapézoïdal. Vue de profil.....	66
Figure 2.6 : Photographie d'un ressaut hydraulique type A, forcé par marche positive, évoluant dans un canal trapézoïdal. Vue de face.....	66
Figure 2.7 : a) Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1 de l'écoulement incident, pour le ressaut contrôlé. ; (—) Courbe d'ajustement b) (—) Courbes d'ajustement pour chaque valeurs du rapport de forme M. Les motifs représentent les points expérimentaux pour : (Δ) M= 0,031 ; (Φ) M= 0,046 ; (ω) M= 0,062 ; (φ) M= 0,077 ; (+) M= 0,093.....	67
Figure 2.8 : Variation expérimentale du rapport Y en fonction de la hauteur relative S de la marche positive.....	69
Figure 2.9 : Variation expérimentale du rapport Y en fonction de la position relative X de la marche positive.....	70
Figure 2.10 : Variation expérimentale de la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive, en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1	71
Figure 2.11 : Variation expérimentale de la position relative $X = x/h_1$ de la marche positive en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1	72
Figure 2.12 : Variation expérimentale de la longueur relative du rouleau $\lambda_r = L_r/h_1$ en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1	73
Figure 2.13 : 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.....	74
Figure 2.14 : Variation expérimentale de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1	75
Figure 2.15 : 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.....	76
Figure 2.16 : Variation expérimentale de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive.....	77
Figure 2.17.a : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1 de l'écoulement incident, pour le ressaut type A. b : Courbes d'ajustement pour chaque valeurs du rapport de forme M.....	79
Figure 2.18 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative S	

de la marche positive.....	80
Figure 2.19 : Variation expérimentale de la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive, en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1	81
Figure 2.20 : Variation expérimentale de la position relative $X = x/h_1$ de la marche positive en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1	82
Figure 2.21 : Variation expérimentale de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de <i>Froude</i> F_1	83
Figure 2.22 : Variation de Y des hauteurs conjuguées en fonction de nombre de <i>Froude</i> F_1 de l'écoulement incident.....	85
Figure 2.23 : Variation de S de la hauteur relative de la marche positive en fonction de nombre de <i>Froude</i> F_1 de l'écoulement incident.....	86
Figure 2.24 : Variation de X de la longueur relative du bassin en fonction de nombre de <i>Froude</i> F_1 de l'écoulement incident.....	87
Figure 2.25 : Variation du rendement η en fonction de <i>Froude</i> F_1	90

Troisième partie

Chapitre I :

Figure 1.1 : Représentation graphique de différentes forces agissantes sur le ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive dans un canal trapézoïdal.....	95
Figure 1.2 : Section transversale du canal trapézoïdal.....	96
Figure 1.3: Variation de Y en fonction de F_1 selon la relation (1.14) pour un ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive pour différentes S.....	101
Figure 1.4: Répartition des points expérimentaux sur les courbes théoriques tracées selon la relation (1.14).....	102
Figure 1.5 : Représentation graphique des nombres de <i>Froude</i> expérimental (F_{1exp}) et théorique (F_{1th}).....	104
Figure 1.6 : Correction du nombre de <i>Froude</i> théorique par les données expérimentales.....	105
Figure 1.7: Variation $Y = f(F_1)$. ($\Delta\Delta\Delta$) courbe théorique selon la relation (1.28).....	106
Figure 1.8: Variation de « a » en fonction de S selon le tableau (1.4).....	107
Figure 1.9: Variation de « b » en fonction de S selon le tableau (1.4).....	107

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Première partie

Chapitre II :

Tableau 2.1 : Les constantes a et b de l'équation (2.13).....	36
---	----

Deuxième partie

Chapitre 2 :

Tableau 2.1 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de Y en fonction de F_1	68
Tableau 2.2 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $Y = f(S)$	69
Tableau 2.3 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $Y = f(X)$	70
Tableau 2.4 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $S = f(F_1)$	71
Tableau 2.5 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $X = f(F_1)$	72
Tableau 2.6 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_r = f(F_1)$	73
Tableau 2.7 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_r = f(S)$	74
Tableau 2.8 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_j = f(F_1)$	76
Tableau 2.9 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_j = f(X)$	77
Tableau 2.10 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_j = f(S)$	78
Tableau 2.11 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $Y = f(F_1)$	80
Tableau 2.12 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique $Y = f(S)$	81
Tableau 2.13 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $S = f(F_1)$	82
Tableau 2.14 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $X = f(F_1)$	83
Tableau 2.15 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $\lambda_j = f(F_1)$	84
Tableau 2.16 : Valeur des coefficients a et b pour les deux type du ressaut.....	85
Tableau 2.17 : Valeur des coefficients a et b pour les deux type du ressaut.....	86
Tableau 2.18 : Valeur des coefficients a et b pour les deux type du ressaut.....	87
Tableau 2.19 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de η en fonction de F_1 , pour le cas du ressaut hydraulique contrôlé et de type A, forcé par marche positive.....	91

Troisième Partie

Chapitre I :

Tableau 1.1 : Valeurs de Y et S expérimentales ayant servi au calcul de F_1 théorique.....	102
Tableau 1.2 : Ecart relatif entre le F_{1exp} et le F_{1th}	103
Tableau 1.3 : Equations des courbes d'ajustement théoriques pour chaque valeur de S.....	106
Tableau 1.4 : Variation des paramètres a et b en fonction de la hauteur relative de la marche positive S.....	106
Tableau 1.5 : Ecart relatif entre Y_1 résulte de la relation (1.17) et Y_{app} calculés par la Relation approchée (1.21).....	109
Tableau 1.5 (suite et fin) : Ecart relatif entre Y_1 résulte de la relation (1.17) et Y_{app} calculés par la relation approchée (1.21).....	110

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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