

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



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

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Magister en Hydraulique

Option : **Hydraulique Urbaine**

Thème

**ÉTUDE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ
EVOLUANT DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL
À PENTE NÉGATIVE**

Présenté par :
OUASSAF Sana

Soutenu le :/...../ 2015

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 M. Tewfik	Professeur	Examineur	Université de Biskra.

Résumé:

Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier, d'un point de vue théorique et expérimental, le ressaut hydraulique, dans un canal trapézoïdal non prismatique, incliné d'une pente négative. Des relations fonctionnelles, en terme adimensionnel, liant les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'influence de la pente du fond du canal, ont été proposées. Les équations obtenues sont représentées en termes adimensionnels, afin de permettre leur utilisation dans la pratique.

Abstract:

This "mémoire" aims to study, from a theoretical and experimental point of view, the hydraulic jump in a non prismatic trapezoidal channel of a negative slope. Functional relationships, linking the various characteristics of the jump, showing the influence of the channel bottom slope, were proposed. The obtained equations are represented in non-dimensional terms to allow their use in the practice.

ملخص:

هذه المذكرة تهدف إلى الدراسة النظرية والتجريبية للقفزة الهيدروليكية في قناة ذات شكل شبه منحرف غير موشوري مع ميل سلبي. تم إيجاد علاقات عامة تظهر تأثير الانحدار السالب لقعر القناة على خصائص هذا النوع من القفزات الهيدروليكية. المعادلات التي تم الحصول عليها هي بدون أبعاد، و ذلك لاستعمالها في الواقع.

Remerciement

Je tiens à remercier mon promoteur le professeur Debabeche Mahmoud, qui n'a, à aucun moment, cessé de prodiguer ses judicieux conseils ni ménager ses efforts pour prêter aide et assistance afin de rendre plus aisé mon travail pour l'achèvement du mémoire.

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

Je remercie aussi le professeur Ouamane Ahmed et le professeur Bouziane M. Tewfik pour avoir accepté de me faire l'honneur par leur présence en leur qualité de membres de jury et de juger de la soutenabilité de mon mémoire de magistère.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

PARTIE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	1
--	---

Chapitre I

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

I.1. INTRODUCTION.....	3
I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE	3
I.2.1. Forme du ressaut classique.....	4
I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	5
I.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	6
I.2.3.1. Longueur du ressaut.....	6
I.2.3.2. Longueur du rouleau.....	6
I.2.4. Rendement du ressaut.....	7
I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINÉ À PENTE POSITIVE.....	8
I.3.1. Classification des ressauts inclinés.....	9
I.3.2. Ressaut hydraulique de type C et de type D	10
I.4. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINE A PENTE NÉGATIVE.....	11
I.4.1. Classification du ressaut à pente négative	11
I.4.2. Etude de Mc Corcodal et Mohamed (1994).....	12
I.5. CONCLUSION	15

Chapitre II

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRIANGULAIRE

II.1. INTRODUCTION.....	17
II.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE.....	17
II.2.1. Étude de Hager et Wanoschek	17
II.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	18
II.2.1.2. Équation de quantité de mouvement.....	19
II.2.1.3. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	21
II.2.1.4. Profil de surface généralisé du ressaut.....	23
II.2.2. ressaut hydraulique contrôlé par seuil.....	25

II.2.2.1. Etude de Achour et Debabeche (2003).....	25
II.2.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	25
II.2.2.1.2. Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude.....	26
II.2.2.1.3. Relation générale régissant le contrôle du ressaut.....	26
II.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINÉ À PENTE	
POSITIVE.....	28
II.3.1. Etude de Debabeche et al (2009) et Cherhabil (2010).....	28
II.3.1.1. Analyse théorique.....	28
II.3.1.2 Analyse expérimental.....	30
II.3.1.2.1. détermination du coefficient k.....	30
II.3.1.2.2. relation explicite du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal.....	31
II.3.1.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	31
II.3.1.2.3.1. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1	31
II.3.1.2.3.2. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F_1	32
II.4. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINE À PENTE	
NÉGATIVE.....	33
II.4.1. etude de Debabeche et de Temim (2008).....	33
II.4.1.1. Analyse théorique.....	33
II.4.1.2 Analyse expérimentale.....	35
II.4.1.2.1. Détermination du coefficient k	35
II.4.1.2.2. Relation explicite du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal.....	36
II.4.1.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut	37
II.4.1.2.3.1. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1	37
II.4.1.2.3.2. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F_1	37
II.5. conclusion	38

Chapitre III

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPÉZOÏDAL

III.1. NTRODUCTION.....	40
III.2. Approche de Hager et Wanoschek (1989).....	40

III.2.1. Généralités.....	40
III.2. 2. Description des essais.....	40
III.2. 3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	40
III.2.4. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	43
III.2.4.1. longueur du rouleau de fond.....	43
III.2.4.2. longueur du ressaut.....	44
III.2.5. Rendement du ressaut.....	45
III.2.6. Description du ressaut.....	47
III.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOIDAL A PENTE POSITIVE	48
III.3.1 Analyse théorique.....	48
III.3.1.1 Equation de la quantité de mouvement.....	48
III.3.1.2 Analyse expérimentale de l'équation semi théorique.....	50
III.3.1.2.1 Estimation du coefficient k de correction.....	50
III.3.1.2. 2Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F1 et de l'angle α d'inclinaison du canal.....	50
III.3.2 Résultats expérimentaux.....	51
III.3.2.1 Longueurs caractéristiques du ressaut	51
III.3.2.1.1 Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F1.....	51
III.3.2.1.2. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F1	52
III.4. CONCLUSION.....	53
CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE.....	55

PARTIE II

CONTRIBUTION A L'ETUDE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL A PENTE NEGATIVE

INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE.....	58
--	----

Chapitre IV

ETUDE THEORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOÏDAL INCLINE A PENTE NEGATIVE

IV.1. INTRODUCTION	59
IV.2. ANALYSE THEORIQUE	59

IV.2.1. Equation de la quantité de mouvement.....	59
IV.2.2. Evaluation du volume du ressaut.....	62
IV.2.3. Nombre de Froude.....	62
IV.3. ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'EQUATION SEMI THEORIQUE	65
IV.3.1. Estimation du coefficient k de correction.....	65
IV.3.2. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle α d'inclinaison du canal.....	68
IV.4. CONCLUSION	75

Chapitre V

ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOÏDAL INCLINÉ A PENTE NEGATIVE

V.1. INTRODUCTION	77
V.2. DESCRIPTION DU MODELE	77
V.2.1. description du canal	77
V.2.2. Appareillages de mesure.....	82
V.2.2.1. débitmètre électromagnétique	82
V.2.2.2. limnimètre	82
V.3. DESCRIPTION DES ESSAIS	83
V.3.1. Procédure expérimentale	83
V.4. RESULTATS EXPERIMENTAUX	85
V.4.1. Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	85
V.4.2. Longueurs caractéristiques du ressaut	92
V.4.2.1. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1	92
V.4.2.2. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F_1	94
V.4.3. rendement du ressaut hydraulique	96
V.5. CONCLUSION	97
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE.....	100
CONCLUSION GENERALE.....	102
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	106
LISTE DES FIGURES	108
LISTE DES TABLEAUX	112
PRINCIPALES NOTATIONS	113

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le ressaut est le principal moyen qu'utilisent les ouvrages hydrauliques pour dissiper l'énergie. Ce ressaut est formé lors de la transition brusque d'un écoulement torrentiel à un écoulement fluvial. Durant cette transition une onde stationnaire se forme et l'énergie est alors dissipée par turbulence.

Un rôle important des ouvrages sera donc d'amener l'écoulement du cours d'eau (généralement fluvial) à un écoulement torrentiel afin que le ressaut puisse se former.

Afin de bien dimensionner ces ouvrages hydrauliques, une bonne connaissance des caractéristiques des ressauts est essentielle. Celles-ci sont principalement les hauteurs d'eau en amont et en aval du ressaut (hauteurs conjuguées), l'efficacité en terme d'énergie et la longueur nécessaire pour l'accomplissement de ce ressaut

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

Les recherches expérimentales ont d'abord confirmé que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. C'est en d'autres termes la seconde loi de Newton qui est appliquée, qui montre que la variation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut est égale à la résultante des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement (Achour, 1997; Debabeche, 2003). L'application de la quantité de mouvement a eu pour but d'évaluer le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 incident caractérisant l'écoulement à l'amont. La relation la plus simple est celle obtenue par Bélanger pour le cas du ressaut classique en canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible et dont la validité a été vérifiée par plusieurs auteurs.

La longueur minimale du bassin amortisseur correspond en règle générale à la longueur L_j du ressaut défini comme étant la longueur au-delà de laquelle aucune protection du bassin n'est nécessaire. Jusqu'à ce jour aucun développement théorique n'a pu mener à l'établissement d'une relation analytique permettant d'évaluer la longueur L_j ; seuls les essais au laboratoire ont permis de la quantifier. C'est ainsi que Bradley et Peterka (1957) ont

élaboré une courbe moyenne expérimentale, représentant la variation de la longueur relative L_j^*/h_2^* en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut. Les auteurs concluent que pour la gamme pratique des nombres de Froude tels que $4 < F_1 < 12$, la longueur relative L_j^*/h_2^* prend la valeur moyenne de 6 ; ce résultat est encore admis de nos jours.

Une autre caractéristique géométrique du ressaut est la longueur L_r^* sur laquelle s'étend son rouleau de surface. Comme pour la longueur L_j^* , L_r^* n'a pu être évaluée que par la voie expérimentale. Plusieurs auteurs ont quantifié cette longueur (Bradley et Peterka, 1957 ; Safranez, 1929 ; Bakhmeteff, 1936 ; Moore, 1943), mais nous citerons surtout les travaux relativement récents de Hager (1990) qui montrent que la longueur relative L_r^*/h_1 dépend à la fois du nombre de Froude F_1 et du rapport d'aspect $w=h_1/b$; h_1 et b sont respectivement la hauteur initiale du ressaut et la largeur du canal rectangulaire.

Récemment plusieurs chercheurs ont abordé la question du ressaut hydraulique d'un point de vue théorique et appliqué, les plus importants et les plus récents d'entre eux sont certainement Hager et Sinniger (1990), Hager et Bretz (1987) et Rajaratnam (2002) qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal, Hager et Wanoschek (1987), Achour et Debabeche (2003) et Debabeche et Achour (2007) dont les travaux sont relatifs au ressaut triangulaire horizontal. Par ailleurs, (Rajaratnam, 1966; Mc Corcodal, 1994; Pagliara. S. et Peruginelli, 2000 ; Beiram et Chamani, 2006...) ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. La première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné fut celle de Bakhmeteff et Matzké (1938), qui ont évoqué dans leur étude, le profil de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. Kindsvater (1944) classifiât les ressauts à pente positive en quatre principaux types : le type A, type B, type C et type D. Les études récentes concernant le ressaut dans les canaux inclinés ont été dirigées par Hager (1988) et Ohtsu et Yasuda (1991) mais toujours dans un canal rectangulaire. Debabeche et al (2009) ont étudié théoriquement le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° incliné d'une pente positive. En 2010, Cherhabil a abordé dans sa thèse de doctorat le ressaut hydraulique dans deux profils de canaux inclinés : le canal triangulaire et le canal profilé en "U". Cette dernière étude a approché le sujet d'un point de vue théorique et expérimental. Par ailleurs, pour ce qui concerne le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, la première étude devrait être attribuée à Posey et Hsing (1938). Par la suite Sandover et Holmes (1962) ont étudié le ressaut hydraulique dans des canaux trapézoïdaux pour des inclinaisons de parois latérales de 30° , 45° , 60° . Hager et Wanoschek ont étudié en 1989 le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique à angle d'ouverture de 45° .

Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier, d'un point de vue théorique et expérimental, le ressaut hydraulique, dans un canal trapézoïdal non prismatique, incliné d'une pente négative. Des relations fonctionnelles, en terme adimensionnel, liant les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'influence de la pente du fond du canal sur les caractéristiques du ressaut, seront proposées. Il est nécessaire de noter que le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal à fond incliné n'a jamais fait l'objet d'études antérieures, et c'est d'ailleurs ce qui nous a motivés à entreprendre ce sujet.

Notre mémoire est scindé en deux grandes parties :

✓ La première partie concernera une étude bibliographique à travers laquelle nous passerons en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique, en canal de section droite trapézoïdal, rectangulaire et triangulaire, à fond horizontal et incliné.

✓ Une deuxième partie concernera notre propre contribution dans l'étude du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal non prismatique incliné d'une pente négative, d'un point de vue théorique et expérimentale. Une analyse expérimentale des équations théoriques sera également élaborée, afin de leur trouver une meilleure représentation.

Première partie

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans cette partie une synthèse bibliographique sera proposée, elle fait le point sur l'état de connaissances des principaux travaux entrepris dans le domaine de la dissipation d'énergie par ressaut hydraulique, ayant abordé le ressaut hydraulique dans trois canaux prismatiques: le canal trapézoïdal, le canal rectangulaire, et le canal triangulaire, à fond horizontal et incliné.

Cette partie est scindée en trois chapitres.

- Le premier chapitre, nous permettra d'aborder les travaux relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire. Trois types de ressaut seront alors étudiés:

- Le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons des travaux de Hager (1990) concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal.

- Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à pente positive, où on abordera les travaux de Kindsvater (1944) qui concernent le ressaut hydraulique en canal rectangulaire à pente positive.

- Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à pente négative, où nous examinerons en particulier l'étude de Mc Corcodal et Mohamed (1994), qui ont été consacrée à l'étude théorique et expérimentale de ce type de ressaut. L'étude intéressera à l'analyse des différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. Des relations liant des paramètres adimensionnels, seront alors proposées.

- Le deuxième chapitre, sera consacré les travaux les plus importants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire. Trois types de ressaut seront étudiés :

- Le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons dans un premier temps des travaux de Hager et Wanoschek (1987) concernant le ressaut évoluant dans un canal triangulaire de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° . Dans un second temps nous aborderons le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, concernant l'étude de Achour et Debabeche (2003), qui a pour objectif d'expérimenter le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° . L'étude se proposera de trouver des relations fonctionnelles liant les caractéristiques du ressaut hydraulique.

- Le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire incliné à pente positive, où on va aborder les travaux de Debabeche et al (2009) et de Cherhabil (2010) (thèse de doctorat), qui ont traité au ressaut hydraulique dans un canal triangulaire incliné à pente positive à angle d'ouverture de 90° .

- Le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire incliné à pente négative, où on va aborder les résultats du mémoire de magister de Temim (2008), qui ont trait au ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° à fond incliné, formant une pente négative par rapport à l'horizontal.

• Dans le troisième chapitre nous allons examiner les travaux relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal. Deux types de ressaut seront alors traités:

- Le premier partie a été consacré à un bref aperçu sur le ressaut hydraulique • classique, ensuite nous passerons en revue les travaux de Hager et Wanoschek (1989) relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal de pente géométrique horizontale, à parois latérales inclinées d'un angle de 45° .

- Le deuxième partie a été consacrée à un développement théorique et expérimental du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique, à fond incliné, formant une pente positive avec l'horizontale, où on va aborder les résultats du mémoire de magister de Riguet (2011).

Chapitre I

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

I.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons traiter les travaux relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire. Trois types de ressaut seront alors étudiés:

- Le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons des travaux de Hager et al (1990) qui concernent le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal.

- Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à pente positive, où on va citer les travaux de Kindsvater (1944) relatifs au ressaut hydraulique en canal rectangulaire à pente positive.

- Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à pente négative. Nous examinerons dans ce sous chapitre l'étude de Mc Corcodal et Mohamed (1994) qui ont étudié le cas limite d'existence des ressauts en pente négative. Une relation théorique a été proposée pour le type D.

I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

Le ressaut hydraulique désigne le passage de l'écoulement torrentiel (ou supercritique) à l'écoulement fluvial (sub-critique). Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur L_r appelée longueur du rouleau. Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible.

Les caractéristiques du ressaut sont essentiellement les longueurs L_r et L_j , qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut, et les hauteurs h_1 et h_2 , appelées également hauteurs conjuguées.

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

On s'accorde à dire que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 (Debabeche, 2003).

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse, continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative. Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau à l'aval, de

contrôler sa position lors de changement des paramètres de l'écoulement tels que les débits et de contribuer enfin à une meilleure compacité du bassin.

I.2.1. Forme du ressaut classique

Bradley et Peterka (1957) ont classifié le ressaut classique sous quatre formes différentes :

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

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

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

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

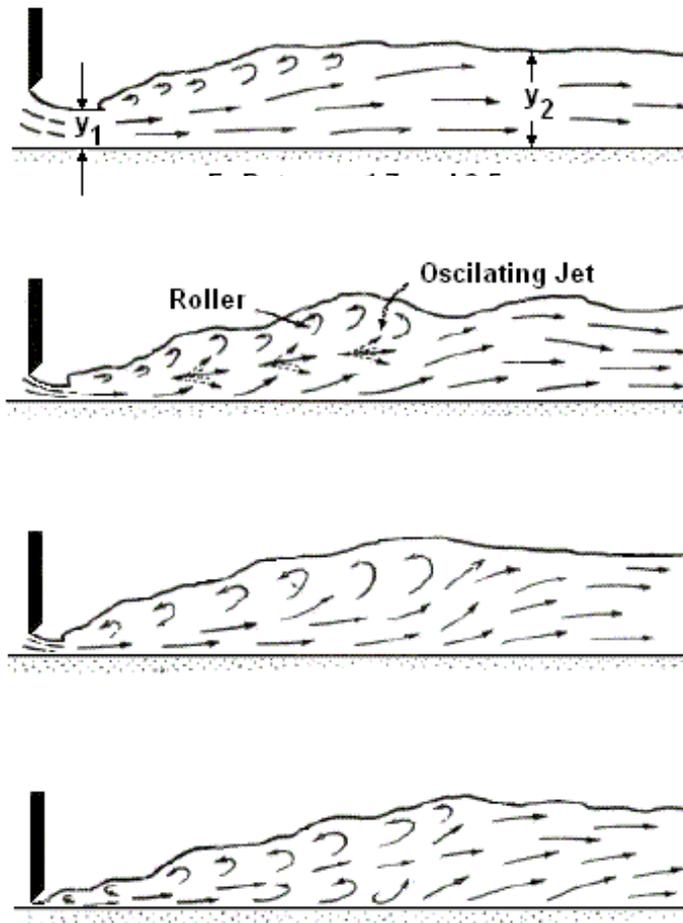


Figure 1.1 : *Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). a) Pré-ressaut, b) Ressonant de transition, c) Ressonant stable, d) Ressonant agité.*

I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

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 $m = \cotg 90^\circ = 0$, ou bien à $M = 0$.

$$F_1^2 = Q^2 / (gb^2h_1^3) \quad (1.1)$$

$$Y^* = h_2^*/h_1 = 0,5 [\sqrt{1+8 F_1^2} - 1] \quad (1.2)$$

La relation (1.2) est connue sous le nom d'équation de Bélanger et permet d'évaluer le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 . Hager et Sinniger (1985) proposent une relation approchée applicable pour le nombre de Froude $F_1 > 2$:

$$Y^* = h_2^*/h_1 = \sqrt{2} \cdot F_1^{-1/2} \quad (1.3)$$

I.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut

Le ressaut hydraulique est caractérisé par la longueur L_r^* du 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.

I.2.3.1. Longueur du ressaut

La première caractéristique du ressaut est la longueur L_j^* sur laquelle il s'étend, ceci n'a pas 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 toujours entre le pied du ressaut et la section aval de sorte que :

1. la surface libre est pratiquement horizontale.
2. la surface de turbulence du rouleau est faible.
3. les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.
4. l'écoulement graduellement varié apparaît à l'extrémité aval du rouleau.

Toutes ces définitions ont pour but d'indiquer la limite aval du ressaut au-delà de laquelle la protection ou le rendement du bassin d'amortissement n'est pas 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:

$$L_j^* / h_1 = 220. T_{gh} [(F_1 - 1) / 22] \quad (1.4)$$

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

$$L_j^* / h_2^* = 6 \quad (1.5)$$

I.2.3.2. Longueur du rouleau

La deuxième caractéristique du ressaut est la longueur L_r^* .

En 1990 Hager et al (1990) définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisant ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé. La figure 1.2 montre ces deux type de ressaut et les longueurs L_r^* qui leur correspondent.

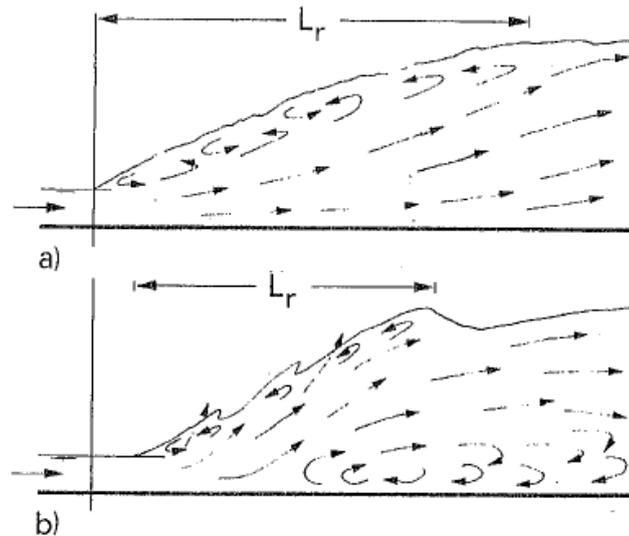


Figure 1.2 : Aspect du ressaut classique.
a) rouleau développé. b) rouleau non développé.

Le rouleau développé présente une surface relativement lisse et est caractérisée par une quasi-stabilité. Le jet entrant dans la section initiale du ressaut adhère sur une certaine distance au fond du canal puis diverge en s'orientant vers l'aval.

Le rouleau non-développé se caractérise par une longueur plus courte que celle du rouleau développé et sa surface à l'aval se présente sous l'aspect de vagues. Au fond de la masse liquide en mouvement, on peut distinguer une zone de rouleau dite de séparation formant un tourbillon de fond. En raison de la présence de cette zone, le jet entrant dans la section initiale du ressaut est dévié vers la surface libre.

Les essais effectués par Hager et al. (1990) indiquent que, pour le cas du ressaut classique, le rapport $\lambda_r^* = L_r^* / h_1$ dépend du nombre de Froude F_1 et du rapport d'aspect $w = h_1/b$. Les auteurs proposent les relations suivantes:

$$\lambda_r^* = -12 + 160 \operatorname{Tgh}(F_1/20) \quad \text{pour } w = h_1/b < 0,1 \quad (1.6)$$

$$\lambda_r^* = -12 + 100 \operatorname{Tgh}(F_1/12,5) \quad \text{pour } 0,1 < w < 0,7 \quad (1.7)$$

« Tgh » désigne la tangente hyperbolique.

Les auteurs notent que pour $F_1 < 8$, les relations (2.6) et (2.7) peuvent être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

$$\lambda_r^* = L_r^* / h_1 = 8 \cdot (F_1 - 1,5); \quad 2,5 < F_1 < 8 \quad (1.8)$$

I.2.4. Rendement du ressaut

Pour le cas du canal rectangulaire:

$$\eta^* = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (1.9)$$

Bien que la relation (1.9) permet le calcul explicite du rendement η^* , Hager et Sinniger (1986) proposent une expression approchée, applicable pour $F_1 > 2$:

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

Les relations (1.9) et (1.10) sont représentées graphiquement dans le système d'axes de coordonnées cartésiennes de la figure (1.2).

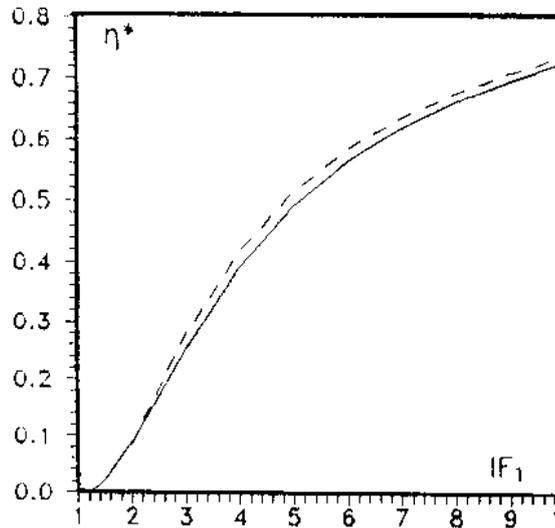


Figure 1.3 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbe tracée selon la relation (2.9). (---) Courbe tracée selon la relation (2.10).

La figure 1.3 montre d'une part que le rendement η^* du ressaut classique est supérieur à 50% pour $F_1 \geq 5,1$ et que les rendements calculés en application de la relation approchée (1.10) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.9) d'autre part; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINÉ À PENTE POSITIVE

A l'aval des ouvrages d'évacuation ou de vidange, un ressaut hydraulique se forme souvent à l'extrémité d'un canal à pente $\theta > 0$. Si la submersion aval est faible, le ressaut apparaît entièrement sur la partie horizontale (ressaut A), mais il se déplace vers l'amont pour des submersions aval plus importantes.

I.3.1. Classification des ressauts inclinés

D'après Rajaratnam (1966), les études de ce type de ressaut ont été déjà élaborées préalablement par Darcy et Bazin (1865), ainsi que par Riejel et Beebe (1917) qui sont toujours d'actualité. Selon Hager (1987), la première approche théorique a été effectuée par Ellms (1928, 1932). Safranez (1933) a repris les résultats de Ellms. La première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné a été celle de Bakhmeteff et Matzké (1938), qui ont évoqué dans leur étude, le profile de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. Kindsvater (1944) classe les ressauts inclinés selon la position du pied du ressaut par rapport à l'extrémité aval de la pente (figure 1.4):

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

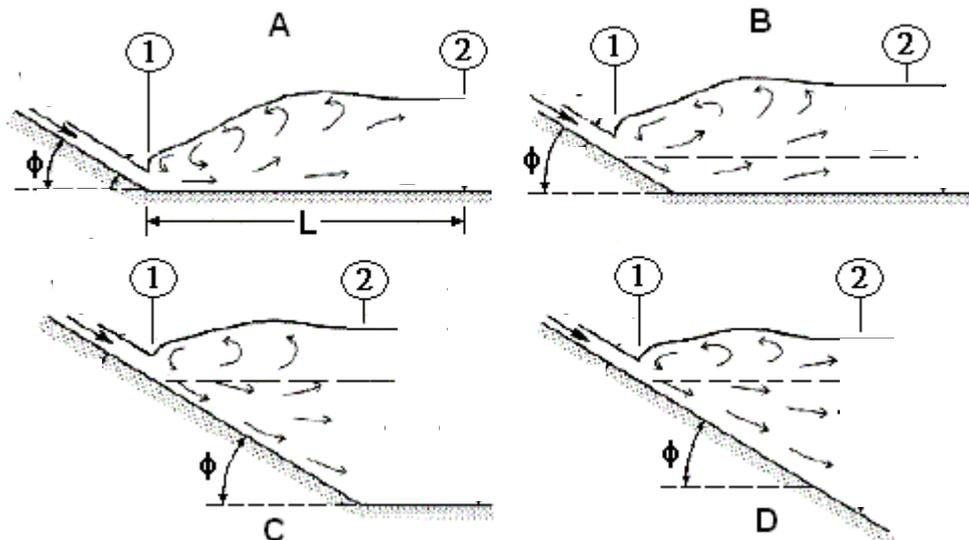


Figure 1.4 : Classification des ressauts inclinés selon Kindsvater (1944).

Le ressaut type C a été analysé expérimentalement par Kindsvater (1944), qui a proposé une approche pour le rapport des hauteurs conjuguées. D'autres chercheurs tels que Bradley et Peterka (1957), Ariemma (1958) et Van Besteen (1962) se sont également intéressés à ce type de ressaut.

Le ressaut de type D a été étudié par Bunyan (1958), Smith (1959), Rajaratnam (1963), Wilogorski et Wilson (1970), MuraHari (1973), Ohashi et al. (1973), Rajaratnam et Murahari (1974) et Mikhalev et Hoang (1976)

Hager (1988), Kawagoshi et Hager (1990) se sont également intéressés au ressaut de type B.

Mahmood (1964) a étudié le ressaut incliné pour différentes inclinaisons. Il a été montré que le ressaut de type A et le ressaut classique sont quasi semblable. Cette constatation a été confirmée également par Bradley et Peterka. Cependant, très peu d'études ont été faites sur le ressaut de type B.

I.3.2. Ressaut hydraulique de type C et de type D

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

$$Y = h_2 / h_1 = \frac{1}{2} \left[(1 + 8F_{1s}^2) \right]^{1/2} - 1 \quad (1.11)$$

Avec $h_1 = N_1 \cos \theta$ la profondeur initial, N_1 la longueur de la normal et θ l'angle d'inclinaison du canal (Figure 1.5), et le nombre de Froude modifié pour le canal inclinée ($F_{1s} = v_1 / g N_1^{1/2}$). Pour le canal horizontal ($\theta=0$) F_{1s} tend vers F_1 .

$$F_{1s} = \frac{(\cos \theta)^{3/2}}{(1 - 2K \tan \theta)^{1/2}} F_1 \quad (1.12)$$

En se basant sur les résultats expérimentaux de Bradley et Peterka (1957), et de Peterka (1958). Rajaratnam (1966) a obtenu la relation empirique suivante :

$$F_{1s} = \Gamma F_1 \quad (1.13)$$

où $\log_{10} \Gamma = 0,027\theta$. La relation (1.11) peut être approximée alors comme suit :

$$Y = \sqrt{2} \cdot 10^{0,027\theta} F_1 - \frac{1}{2} \quad (1.14)$$

La longueur du ressaut a été établie expérimentalement par Bradley et Peterka (1957) comme suit:

$$\frac{L_j}{L_j^*} = \exp\left(-\frac{4}{3}\theta\right) \quad (1.15)$$

Avec L_j^* étant la longueur du ressaut classique selon l'équation (1.4). Les équations (1.14) et (1.15) sont appliquées pour la pente : $\tan(\theta)=0,3(\theta<17^\circ)$.

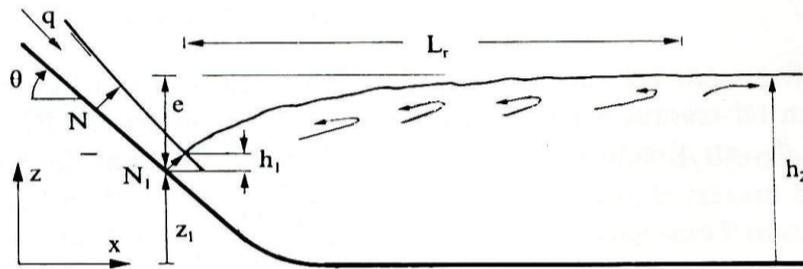


Figure 1.5 : Notation du ressaut incliné.

L'équation (1.14) peut également être appliquée au ressaut type D où h_2 représente la profondeur de l'écoulement à la fin du ressaut, mesurée verticalement du fond incliné jusqu'à la surface libre. Les longueurs de rouleau du type C et type D sont quasi identiques.

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

I.4. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINE A PENTE NEGATIVE

I.4.1. Classification du ressaut à pente négative

Stevensens (1942) a analysé théoriquement le ressaut à pente négative en utilisant l'équation de quantité de mouvement. Okada et Aki (1955) ont effectué une étude expérimentale sur la stabilité du ressaut à pente négative pour des nombres de Froude $F_1 > 9$. Rajaratnam (1966, 1967) classifie le ressaut à pente négative comme un ressaut de type F, et conclue qu'il est impossible de garder le ressaut complètement dans la contre pente. Ohashi et al (1973) étudient le ressaut à pente négative et confirment son instabilité lorsqu'il est entièrement dans la contre pente. Mc Corcodal et Mohammed (1994) ont effectué une analyse assez explicite sur ce type de ressaut, qu'ils ont appelé configuration du ressaut limite où le ressaut est localisé complètement dans la partie en contre pente.

La bibliographie montre que le ressaut à pente négative est classé en quatre configurations principales représentées dans la figure 1.6:

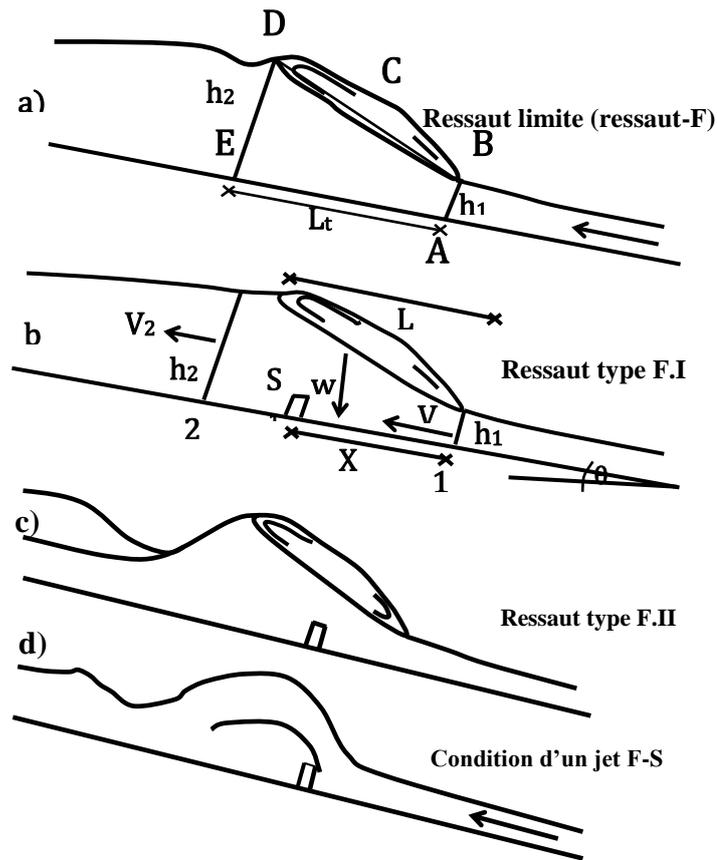


Figure 1.6 : Classification du ressaut à pente négative.

La figure 1.6 montre que le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à pente négative peut se présenter en quatre formes principales :

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

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

I.4.2. Etude de Mc Corcodal et Mohamed (1994)

Mc Corcodale et Mohamed (1994) ont étudié le ressaut hydraulique dans des canaux en pente négative, dans le but est de déterminer les paramètres de définition du cas limite d'existence de ce type de ressaut. La figure 1.7 montre le schéma de définition du ressaut à pente négative selon les auteurs.

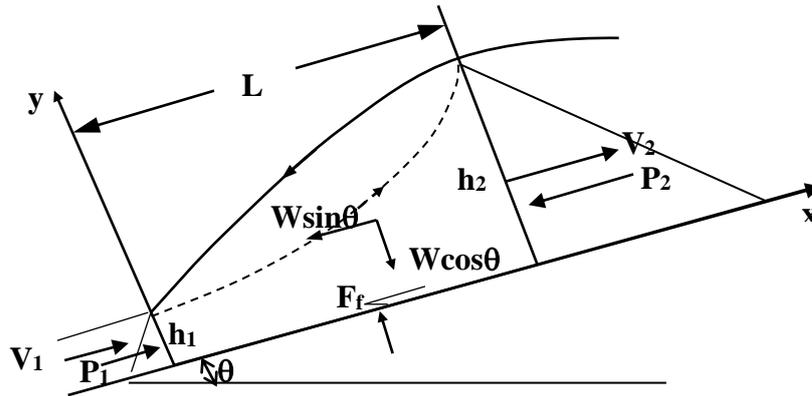


Figure 1.7 : Schéma de définition et volume de contrôle pour le ressaut à pente négative

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

$$\beta_2 \rho U_2 Q - \beta_1 \rho U_1 Q = P_1 - P_2 + W \sin \theta - F_f \quad (1.16)$$

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

$$W = \varphi_s \gamma L_r (h_1 + h_2) / 2 \quad (1.17)$$

Avec: γ le poids spécifique de l'eau, L_r la longueur du rouleau qui est prise dans ce cas comme longueur de ressaut, φ_s étant le facteur de forme. β est considéré comme égale à l'unité.

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

$$h_2 / h_1 = \left(\sqrt{1 + 8G_a^2} - 1 \right) / 2 \quad (1.18)$$

Avec:

$$G_a^2 = \frac{\beta_1 F_1^2}{1 - \frac{\varphi_s L_j \operatorname{tg} \theta}{h_2 - h_1} - \frac{2F_f}{\gamma (h_1^2 - h_2^2) \cos \theta}} \quad (1.19)$$

Avec $F_1 = v_1 / (gh_1 \cos \theta)^{1/2}$

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

La figure 1.8 montre la variation du rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 pour différentes valeurs du nombre de Froude F_1 et pour les trois pentes négatives.

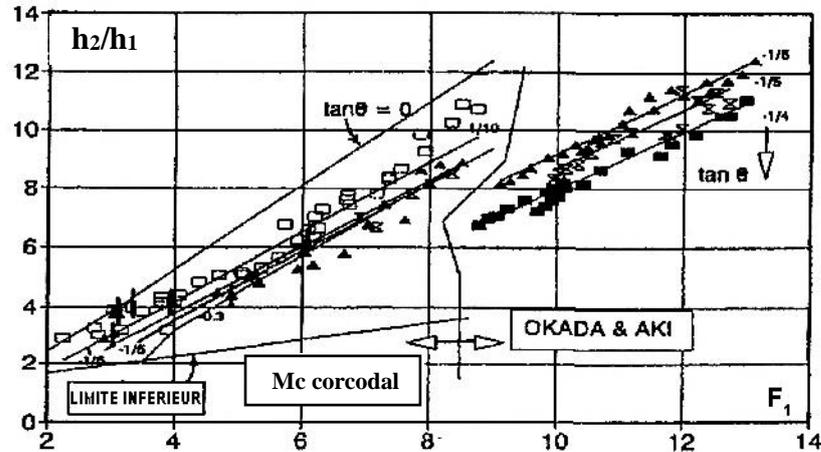


Figure 1.8 : Rapport des hauteurs conjuguées expérimentales et théoriques pour des cas limites et des cas stabilisés de ressaut en pente négative, provenant de l'étude de Mc Corcodal et Mohamed (1994), ainsi que celle de Okada et Aki (1959). $\tan \theta = (+) 0,0$; (\square) $-0,1$; (\blacktriangle) $-1/6$; (∇) $-1/5$; (\blacksquare) $-1/4$; (—) Equation théorique

La figure 1.8 montre que l'augmentation de la pente négative engendre la diminution du rapport h_2/h_1 des hauteurs conjuguées. En outre, les mesures de h_1 , h_2 , L_r et le débit Q ont permis aux auteurs d'estimer expérimentalement le facteur de forme φ_s dans l'équation 2.19. Ils trouvent une valeur constante $\varphi_s = 1,08 \pm 0,3$ pour les trois contre pentes étudiées. Ces valeurs sont différentes de celle de Okada et Aki (1959), qui a trouvé $\varphi_s = 1,39 \pm 0,1$. Mc Corcodal et Mohamed (1994) attribuent cette différence à la définition de la longueur du ressaut et à la différence entre les conditions des deux études, car Okada et al (1959) ont expérimenté un autre type de ressaut en contre pente dit stabilisé, qui commence dans une pente positive et fini dans une pente négative. En outre il a été montré que la position du ressaut est très sensible à la variation de la profondeur conjuguée aval h_2 et précisément pour les nombre de Froude $F_1 < 4$, et nécessite un ajustement continu des conditions aux limites pour maintenir une position stable. Cependant, pour les nombres de Froude $F_1 < 9$, les auteurs confirment que le ressaut limite en pente négative (type D) est difficile à établir.

La figure 1.9 montre la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour les trois pentes négative.

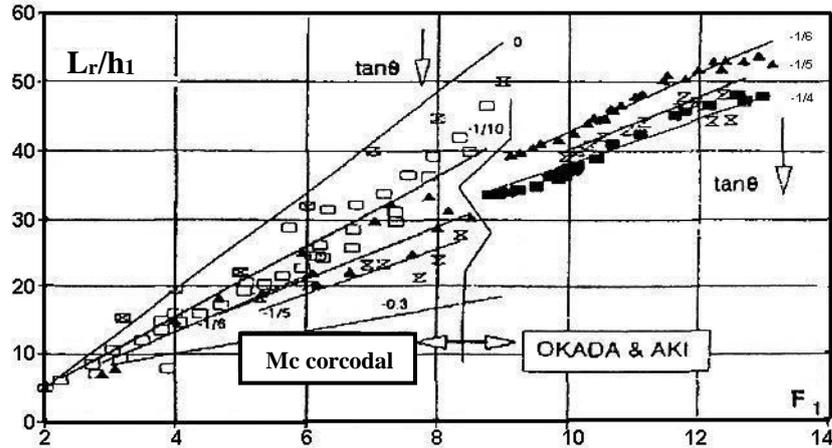


Figure 1.9 : Longueurs du rouleau mesurées dans les cas limites et les cas stabilisés de ressaut en pente négative. Provenant de l'étude de Mc Corcodal et Mohamed (1994) et de celle de Okada et Aki (1959).
 $tg\theta = (+) 0,0$; $(\square) -0,1$; $(\blacktriangle) -1/6$; $(\nabla) -1/5$; $(\blacklozenge) -1/4$; $(—)$ Equation théorique

La figure 1.9 montre que pour une valeur donnée de F_1 , la longueur relative L_r/h_1 du rouleau diminue avec l'augmentation de la pente négative. Les mesures expérimentales ont été comparées avec la longueur relative du rouleau horizontal ; il a été montré que le rapport L_r/h_1 de la pente négative, pour une valeur donnée de F_1 , est plus faible que son homologue horizontal. Une relation empirique a été effectuée par Okada et Aki (1959), de la forme :

$$L_r/h_1 = (C_0 + C_1 \sin\theta + C_2 \sin^2\theta)[F_1 - 1] + D_1(1 + D_2 \sin^4\theta) \quad (1.20)$$

où les constantes empiriques sont les suivantes :

a. Ressaut limite selon Mc Corcodal et Mohamed ($F_1 < 9$) :

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

b. Ressaut Stabilisé selon Okada et Aki (1959) $9 < F_1 < 13$:

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

I.5. CONCLUSION

A travers ce chapitre nous avons examiné, en premier temps, les travaux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale en négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut.

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

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

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

Chapitre II

**RESSAUT HYDRAULIQUE
EN CANAL TRIANGULAIRE**

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous examinerons les travaux les plus importants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire. Trois types de ressaut seront étudiés :

- Le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons dans un premier temps des travaux de Hager et Wanoschek (1987) concernant le ressaut évoluant dans un canal triangulaire de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° . Dans un second temps nous aborderons le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, concernant l'étude de Achour et Debabeche (2003), qui a pour objectif d'expérimenter le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° . L'étude se proposera de trouver des relations fonctionnelles liant les caractéristiques du ressaut hydraulique.

- Le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire incliné à pente positive, où on va aborder les travaux de Debabeche et al (2009) et de Cherhabil (2010) (thèse de doctorat), qui ont trait au ressaut hydraulique dans un canal triangulaire incliné à pente positive à angle d'ouverture de 90° .

- Le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire incliné à pente négative, où on va aborder les résultats du mémoire de magister de Temim (2008), qui ont trait au ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° à fond incliné, formant une pente négative par rapport à l'horizontal.

II.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

II.2.1. Etude de Hager et Wanoschek (1987)

Hager et Wanoschek (1987) ont réalisé leurs travaux concernant le ressaut hydraulique classique dans un canal triangulaire 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. 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°). Comme l'indique la figure 2.1.b.

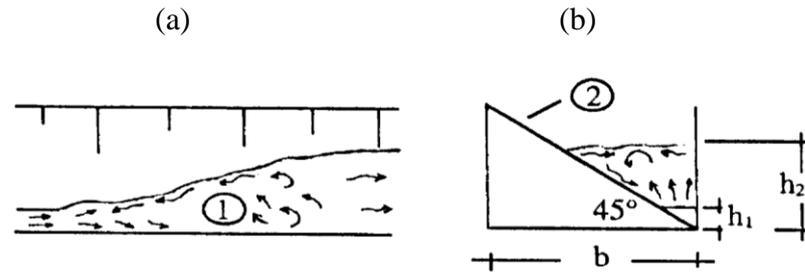


Figure 2.1 : Ressaut en canal semi triangulaire selon Hager et Wanoschek (1987). (a) vue en plan, (b) coupe transversale.
 1. vue en plan du ressaut. 2. paroi en PVC inclinée de 45°.
 h_1 et h_2 : hauteurs conjuguées du ressaut.

Les essais ont été effectués sous des débits volumes Q variés entre 4 et 20 l/s suivant des pas de $\Delta Q = 2$ l/s. Les 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.

Selon les auteurs, la mesure limnimétrique des profondeurs de l'écoulement à l'aval du ressaut a été effectuée avec une incertitude de plus ou moins 2 à 3 cm, en raison des grandes perturbations de la surface libre observées surtout à des nombres 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.

II.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées

Le profil triangulaire correspond à un profil trapézoïdal de base $b=0$, soit $M \rightarrow \infty$. le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut est tel que :

$$F_1^2 = 2Q^2 / (m^2 g h_1^5) \quad (2.1)$$

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^2 + Y + 1)}{3(Y + 1)} \quad (2.2)$$

L'équation (2.2) montre que Y s'exprime de manière fortement implicite en fonction de F_1 ; Hager et Wanoschek (1987) proposent alors la relation approchée :

$$Y = \left[\frac{3}{2} F_1^2 - 1 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.3)$$

La relation approchée (2.3) montre ainsi que $Y \approx F_1^{2/3}$

II.2.1.2. Équation de quantité de mouvement

Les essais effectués par Hager et Wanoschek (1987) dans un canal semi- triangulaire d'un angle d'ouverture de 45°, extrapolés ensuite au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90°, ont montré que les rapports Y expérimentaux sont légèrement inférieurs aux rapports Y théoriques obtenus par application de la relation (2.2) ; cet écart est attribué à l'effet des frottements sur les parois du canal et les auteurs proposent alors de modifier l'équation de la quantité de mouvement en tenant compte des pertes de charges le long des parois du canal. Le gradient de perte de charge S_f est évalué par la formule de Blasius :

$$S_f = \frac{0,3164}{R_e^{0,35}} \frac{V_2}{8gR_h} \quad (2.4)$$

Avec:

$$R_e = \frac{4.R_h.V}{\nu} : \text{Le nombre de Reynolds,}$$

$R_h = \frac{mh}{2(1 + \sqrt{1+m^2})}$: Le rayon hydraulique correspondant au profil semi triangulaire et ν la viscosité cinématique.

Le profil de surface du ressaut suit approximativement la loi $h(x) = h_1 + (h_2 - h_1).X^2$, dans laquelle x représente la coordonnée longitudinale comptée à partir du début du ressaut et X la coordonnée x rapportée à la longueur L_j du ressaut, soit $X = x/L_j$. La coordonnée x est telle que $0 \leq x \leq L_j$ et par suite $0 \leq X \leq 1$.

La force de frottement agissant sur le volume de contrôle correspondant à $0 \leq x \leq L_j$ est par définition :

$$W_x = \varpi \int A(x).S_f \quad (2.5)$$

$\varpi = \rho.g$ est le poids volumique du liquide, $A(x)$ l'aire de la section mouillée correspondant à x . Pour le cas du profil semi triangulaire d'angle d'ouverture de 45° ($m=1$), la relation (2.4) devient :

$$S_f = \left[\frac{2Q}{mh_1^2} \right]^{7/4} \frac{\nu^{1/4}}{5gh_1^{5/4}} \left[\frac{h(x)}{h_1} \right] \quad (2.6)$$

La relation (2.5) s'écrit alors :

$$W_x = (\varpi mh_1^2/2).L_j.S_{f1}. I(Y) \quad (2.7)$$

$$I(Y) = \int \frac{dx}{[1 + (Y-1)X^2]^{1/4}} \quad (2.8)$$

$$Y = \frac{h_2}{h_1}; \quad X = \frac{x}{L_j}$$

$$S_f = S_f \left[\frac{h(x)}{h_1} = 1 \right] \quad (2.9)$$

L'intégration numérique de $I(Y)$ donne approximativement :

$$I(Y) = \frac{1}{7} \left(1 + \frac{6}{Y} \right) \quad (2.10)$$

Pour les nombres de Froude $F_l < 15$, correspondant à des rapports $Y < 7$, l'application de la relation approchée (2.10) occasionne une erreur relative inférieure à 5% par rapport à la valeur exacte calculée par l'équation (2.8).

En tenant compte de la force W_x , l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre les sections initiale et finale du ressaut évoluant dans un canal de section droite semi triangulaire s'écrit:

$$\frac{mh_1^3}{6} + \frac{2Q^2}{gmh_1^2} = \frac{mh_2^3}{6} + \frac{2Q^2}{gmh_2^2} + W_x \quad (2.11)$$

En désignant par :

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{gmh_1^5}, \quad A = \left[\frac{vmh_1}{2Q^2} \right]^{1/4}, \quad S_{fi} = \Lambda \left(\frac{F_1^2}{10} \right),$$

la relation (2.11) s'écrit en termes adimensionnels :

$$1 + \frac{3}{2} F_1^2 = Y^3 + \frac{3F_1^2}{2Y^2} + \frac{3\Lambda L_j}{70h_1} \left(1 + \frac{6}{Y} \right) F_1^2 \quad (2.12)$$

La longueur relative L_j/h_1 figure dans la relation (2.12) peut s'écrire : $L_j/h_1 = Y \cdot (L_j/h_2)$ et Hager et Wanoschek (1987) estiment que pour un canal triangulaire correspondant à $m=1$, $L_j/h_2 \approx 6$. Par suite, la relation (2.12) s'écrit en définitive :

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^3 - 1)}{3 \left[Y^2 - 1 - \frac{\Lambda Y^2}{6} (6 + Y) \right]} \quad (2.13)$$

Cette dernière relation traduit ainsi la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut dans un canal de section droite triangulaire ($m=1$) en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, en tenant compte de l'effet des frottements sur les parois du canal. Cet effet est traduit par le paramètre adimensionnel Λ . Lorsque $\Lambda \rightarrow 0$, l'effet des frottements est négligeable et la relation (2.2) est reproduite. Hager et Wanoschek (1987) notent que l'écart maximum observé entre les valeurs expérimentales des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut et celles issues de l'application de la relation (2.13) ne dépasse guère 3%.

La figure 2.2 montre les mesures expérimentales de Hager et Wanoschek (1987) comparées à la fois aux valeurs théoriques obtenues par l'application de la relation (2.2) ($\Lambda \rightarrow 0$) et à celles issues de l'équation (2.13) pour $\Lambda > 0$.

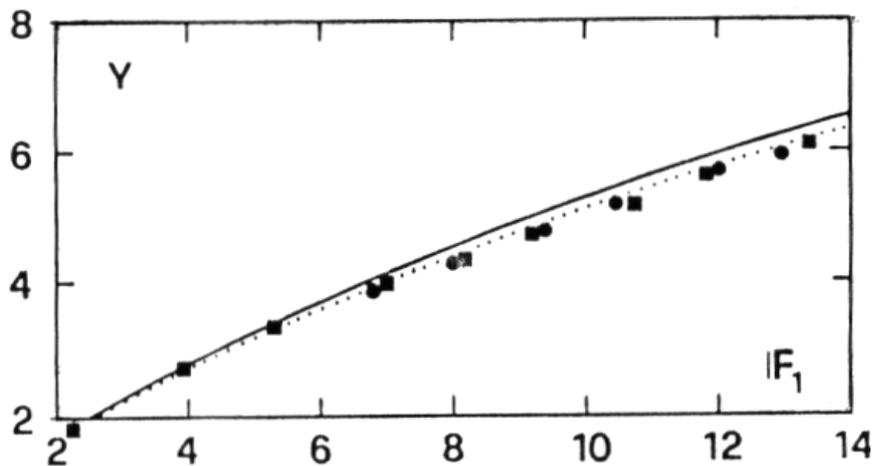


Figure 2.2 : Variation des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut triangulaire ($m=1$) en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoschek (1987).

(—) courbe tracée selon la relation (3.2). $\Lambda=0$.

(---) courbe tracée selon la relation (3.13). $\Lambda>0$.

II.2.1.3. Longueurs caractéristiques 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.

La figure 2.3 représente les mesures expérimentales de Hager et Wanoschek (1987) ($m=1$) ainsi que celles d'Argyropoulos (1962) concernant la longueur relative L_j/h_2 du ressaut dans un canal triangulaire, en fonction du nombre de Froude F_1 . Il apparaît ainsi que la

longueur relative L_j/h_2 dépend uniquement de m et de F_1 . La figure 2.3 montre également que la longueur relative 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 L_j/h_2 par application de la relation :

$$\frac{L_j}{h_2} = 2,4(m)^{0,5} F_1^{0,4/m} \quad (2.14)$$

$$0,4 < m \leq 1$$

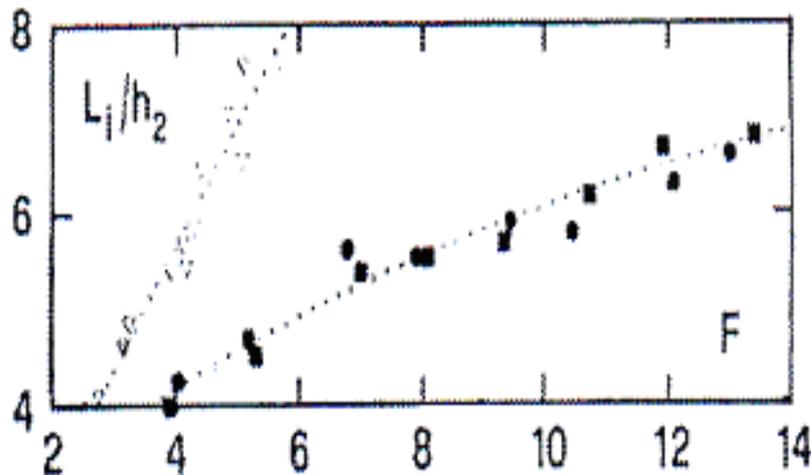


Figure 2.3 : Longueur relative L_j/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoschek (1987) ($m=1$).
(∇): $m=0,44$ selon Argyropoulos (1962).

En ce qui concerne la longueur relative L_r/h_2 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 dans un canal triangulaire, les mesures expérimentales de Rajaratnam (1964) ($m=0,58$) et celles de Hager et Wanoschek (1987) ($m=1$) sont représentées Sur la figure 2.4. Il apparaît ainsi que la longueur relative L_r/h_2 dépend uniquement de m et de F_1 . La figure 2.4 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 . Nous pouvons alors remarquer, comme pour L_j/h_2 , que la longueur relative L_r/h_2 dépend à la fois du nombre de Froude F_1 et du paramètre m .

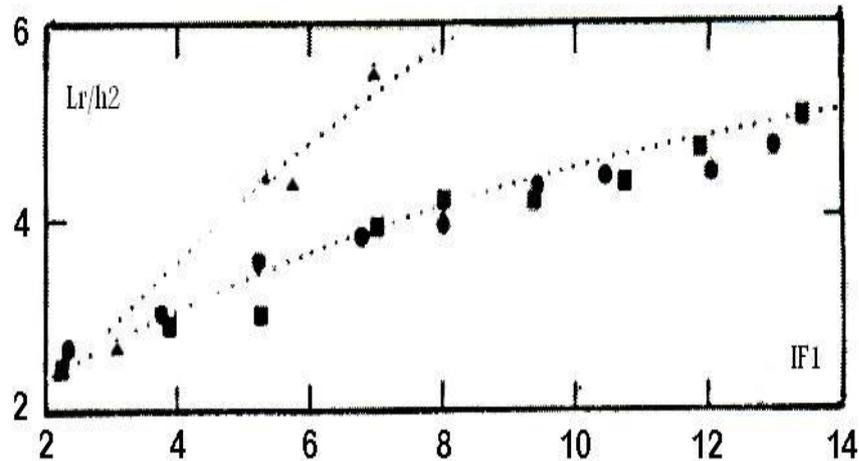


Figure 2.4 : Longueur relative L_r/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoschek (1987) ($m=1$).
(Δ) : $m=0,58$ selon Rajaratnam (1964).

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

$$\frac{L_r}{h_2} = 1,8(m)^{0,5} F_1^{0,4/m}, \quad 0,4 < m \leq 1 \quad (2.15)$$

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

II.2.1.4. 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 par suite $y=0$. 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 :

$$y(X) = (1 + \alpha X) \cdot \tanh(\beta X) \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (2.16)$$

Où " tanh " désigne la tangente hyperbolique.

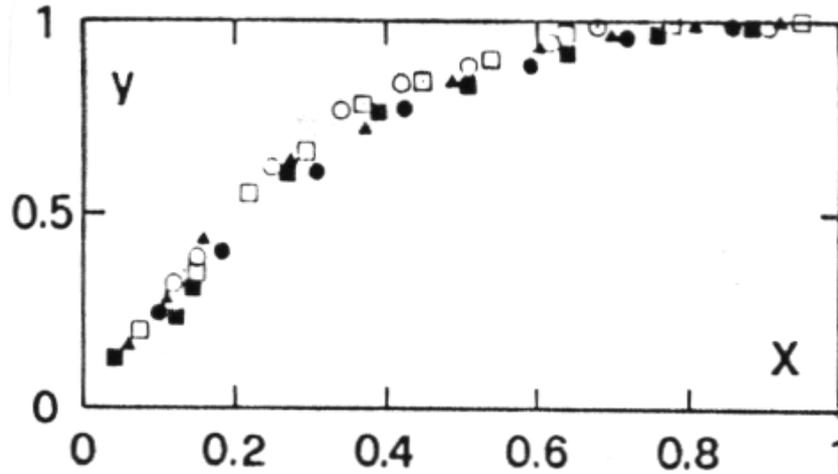


Figure 2.5 : Profil de surface généralisé $y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ($m=1$), selon Hager et Wanoschek (1987).

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 de coordonnées $(0,0)$ et coupe approximativement l'axe parallèle à X au point de coordonnées $(0,4, 1)$; le paramètre β figurant dans la relation (2.16) a donc pour valeur : $\beta = (1 - 0) / (0,4 - 0) = 1/0,4$; 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 :

$$y(X) = (1 + 0,014 \cdot X) \cdot \tanh(2,5 \cdot X) \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (2.17)$$

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, voire même équivalent.

II.2.2. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil

II.2.2.1. Etude de Achour et Debabeche (2003)

II.2.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

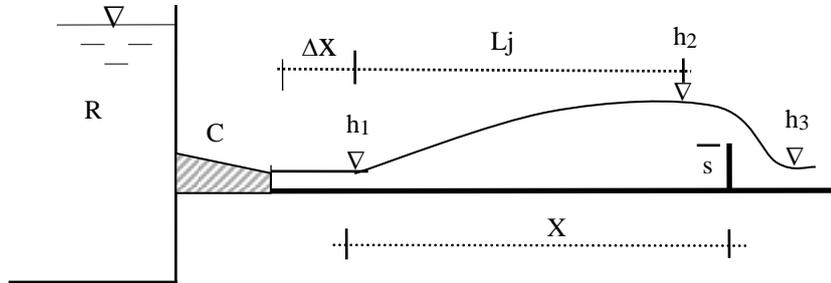


Figure 2.6 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

Lors du contrôle du ressaut, la mise en place du seuil à l'aval n'a théoriquement aucun effet réducteur sur le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut classique. Sous les mêmes conditions de l'écoulement amont, c'est à dire sous la condition de l'identité des débits volumes et des hauteurs initiales du ressaut, la hauteur finale h_2^* du ressaut classique est théoriquement égale à celle du ressaut contrôlé par un seuil.

La figure 2.7 montre à la fois la variation de Y^* et de Y_s en fonction du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement incident.

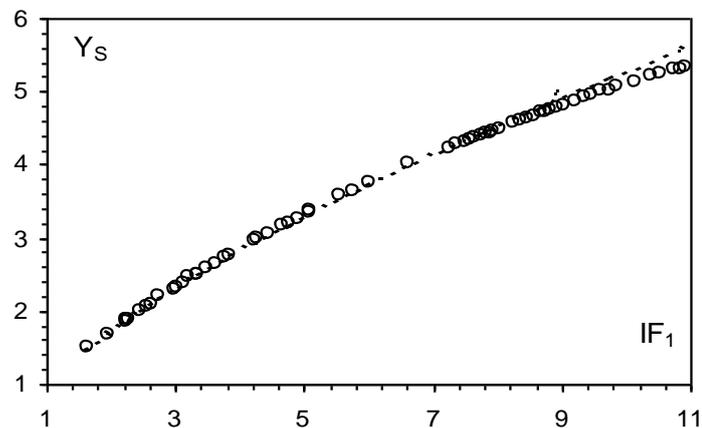


Figure 2.7 : Variation du rapport $Y_s = f(F_1)$ dans un canal triangulaire.
(---) Ressaut classique. (o) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

La figure 2.7 montre la variation de Y^* et de Y_s en fonction du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement incident. Il ressort que l'égalité $Y^* = Y_s$ n'est vérifiée que pour une

certaine gamme de valeurs du nombre de Froude F_1 . L'influence du seuil à paroi mince se manifeste à des valeurs du nombre de Froude F_1 supérieures à 7,5.

Cette influence s'accroît au fur et à mesure que F_1 augmente, mais ne semble pas être significative.

La représentation graphique des points expérimentaux des rapports Y_s en fonction de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil a abouti à une courbe unique, comme l'indique la figure 2.8. Celle-ci montre clairement que les points expérimentaux obtenus s'alignent suivant une droite passant par le point (0,1). Suite à un ajustement linéaire Achour et Debabeche (2003) ont déterminé la relation suivante :

$$Y_s = 1 + 0,96. S \quad (2.18)$$

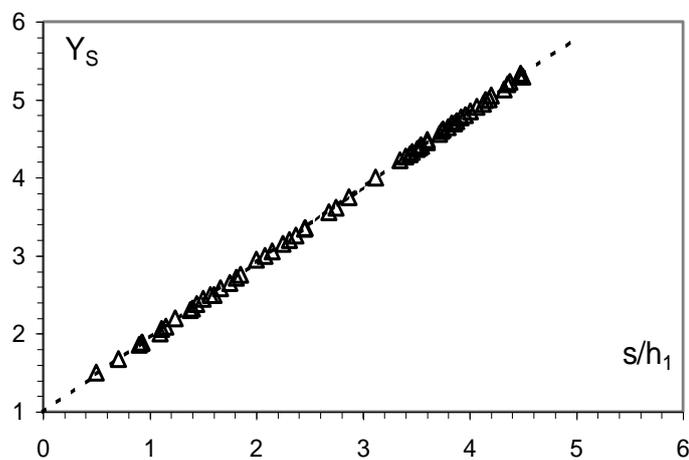


Figure 2.8 : Variation expérimentale de $Y_s = f(S)$ lors du contrôle d'un ressaut triangulaire. (Δ) Points expérimentaux. (---) Courbe tracée selon la relation : $Y_s = 1 + 0,96.S$.

II.2.2.1.2. Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude

Achour et Debabeche (2003) ont montré précédemment que l'influence du seuil sur la hauteur finale du ressaut, et de même pour le rapport Y , n'était pas significative. Ils ont trouvé également qu'une relation unique existe entre la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil et le rapport Y_s des hauteurs conjuguées du ressaut. Ces considérations laissent les auteurs penser qu'une relation unique peut être obtenue entre la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil et le nombre de Froude F_1 .

La figure 2.9 montre en conséquence que les points de mesures expérimentaux obtenus suivent, dans leur totalité, la variation d'une courbe unique de type logarithmique.

L'ajustement des couples de valeurs (F_1 , S), suivant la méthode des moindres carrés non linéaires, à donner la relation :

$$S=s/h_1 = 4,125.Ln [(F_1 + 4)/5] \quad (2.19)$$

« Ln » désigne le logarithme népérien.

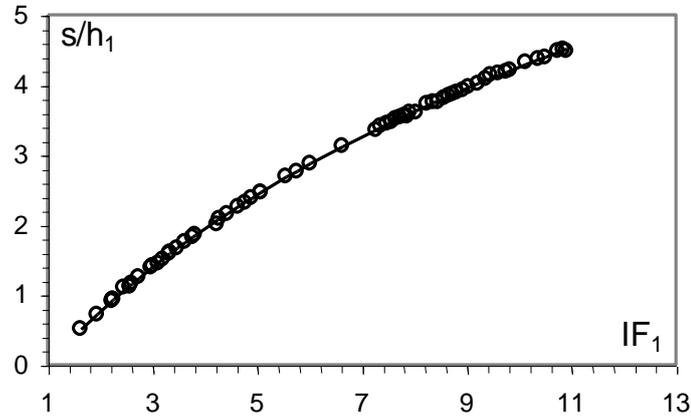


Figure 2.9 : Variation expérimentale de la hauteur relative S du seuil, en fonction du nombre de Froude F_1 . (o) Points expérimentaux

La relation (2.19), ainsi que la tendance des points expérimentaux représentés par la figure 2.9, montrent que pour $F_1 = 1$ la hauteur relative S du seuil est nulle.

Comparée à la courbe expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil mince dans un canal rectangulaire, la figure 2.9 indique que pour le cas du ressaut triangulaire la hauteur relative s/h_1 ne dépend pas de la position X/h_2 du seuil.

En outre, le contrôle du ressaut rectangulaire nécessite des hauteurs relatives s/h_1 beaucoup plus importantes, pour un même nombre de Froude F_1 .

II.2.2.1.3. Relation générale régissant le contrôle du ressaut

Achour et Debabeche (2003) ont montré, d'après l'analyse de leurs mesures expérimentales, qu'une relation générale peut exprimer les paramètres F_1 , s/h_1 et X/h_1 . Cette relation peut s'écrire sous la forme $f(s/h_1, F_1, X/h_1) = 0$.

L'analyse des mesures expérimentales obtenues a montré que la meilleure représentation graphique adimensionnelle de la fonction f est celle indiquée par la figure 2.10. Les points expérimentaux se situent en fait, pour $X/h_1 \geq 4$ (condition largement réalisée dans la pratique), sur une droite d'équation : $(S+F_1^{0,4}) = a.(X/h_1)+b$. Les valeurs des constantes a et b ont été obtenues par un ajustement linéaire.

Ainsi, la relation générale régissant le contrôle du ressaut triangulaire en présence d'un seuil à paroi mince s'écrit :

$$S + F_1^{0,4} = 0,127.(X/h_1) + 1,269 \quad , X/h_1 \geq 4 \quad (2.20)$$

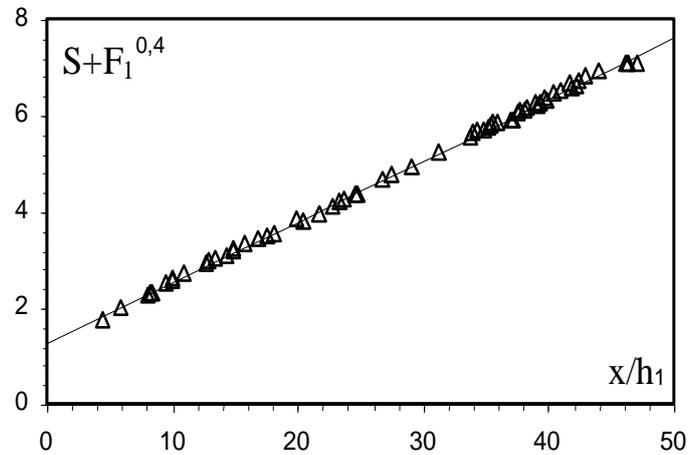


Figure 2.10 : Variation de $(S+F_1^{0,4})$ en fonction de la position relative x/h_1 du seuil (Δ) Points expérimentaux
(—) courbe d'ajustement

II.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINE À PENTE POSITIVE

II.3.1. Etude de Debabeche et al (2009) et Cherhabil (2010)

II.3.1.1. Analyse théorique

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

$$\rho Q v_1 + P_1 + G \sin \alpha = \rho Q v_2 + P_2 \quad (2.21)$$

où ρ est la masse volumique, et Q le débit volume.

La figure 2.11 montre un ressaut hydraulique évoluent dans un canal triangulaire avec une pente positive.

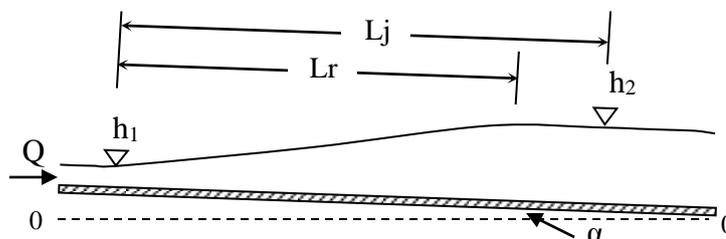


Figure. 2.11 : ressaut hydraulique sur une pente positive

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

$$P_1 = m\varpi \frac{h_1^3 \cos(\alpha)}{3}; \quad P_2 = m\varpi \frac{h_2^3 \cos(\alpha)}{3}; \quad G = \omega V \quad (2.22)$$

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

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

$$V = \frac{1}{3} mkL_j h_1^2 (1 + Y + Y^2) \quad (2.23)$$

En tenant compte des relations (2.22) et (2.23) la relation (2.21) devient:

$$\frac{Q^2}{gmh_1^2} + \frac{mh_1^3 \cos \alpha}{3} + \frac{1}{3} kmL_j h_1^2 (1 + Y + Y^2) \sin \alpha = \frac{Q^2}{gmh_2^2} + \frac{mh_2^3 \cos \alpha}{3} \quad (2.24)$$

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

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{gm^2 h_1^5} \quad (2.25)$$

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

En incluant la relation (2.25) dans la relation (2.24) on obtient:

$$F_1^2 + \frac{2}{3} \cos \alpha + \frac{2}{3} k\lambda (Y^2 + Y + 1) \sin \alpha = \frac{F_1^2}{Y^2} + \frac{2}{3} Y^3 \cos \alpha \quad (2.26)$$

L'équation (2.26) peut être exprimée telle que :

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

La relation (2.27) exprime le nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées, de l'angle d'inclinaison α du canal par rapport à l'horizontale et la longueur relative $\lambda = Lj/h_1$ d'un ressaut hydraulique à pente positive, évoluant dans un canal de section droite triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° .

Le remplacement de $\alpha = 0$ dans la relation (2.27), donne la relation (2.28) de Hager et Wanoscheck (1987) concernant le ressaut hydraulique classique dans le canal triangulaire.

$$F_1^2 = \frac{2}{3} Y^2 \frac{(Y^2 + Y + 1)}{(Y + 1)} \quad (2.28)$$

Pour déterminer le coefficient k de l'équation (2.27), l'approche proposée sera analysée à l'aide des données expérimentales.

La relation (2.28) à permis aussi d'obtenir l'expression de la longueur relative λ du ressaut tel que:

$$\lambda = \frac{(Y^3 - 1)\cos(\alpha) - \frac{3F_1^2(Y^2 - 1)}{2Y^2}}{k(Y^2 + Y + 1)\sin(\alpha)} \quad (2.29)$$

II.3.1.2 Analyse expérimentale

II.3.1.2.1. Détermination du coefficient k

D'après la relation (2.27) l'expression du coefficient k est tel que:

$$k = \frac{(Y^3 - 1)\cos(\alpha) - \frac{3F_1^2(Y^2 - 1)}{2Y^2}}{\lambda(Y^2 + Y + 1)\sin(\alpha)} \quad (2.30)$$

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

II.3.1.2.2. Relation explicite du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal

L'équation (2.27) apparaît sous une forme implicite et son application par conséquent se fait par itération.

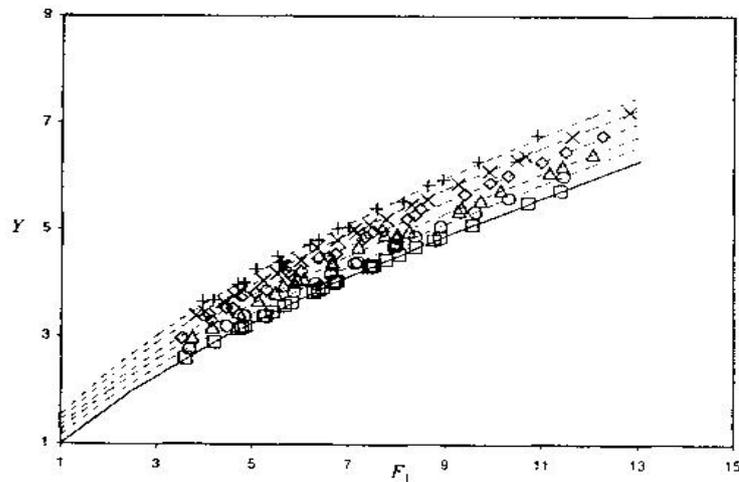


Figure. 2.12 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude semi théorique F_1 selon la relation (3.27), pour six valeurs de la tangente de l'angle d'inclinaison du canal, tels que: $\tan(\alpha) = (\square)0.00$ (selon Debabeche et Achour (2007)), $(\circ) 0.01$, $(\Delta) 0.02$, $(\diamond) 0.03$, $(\times) 0.04$ et $(*) 0.05$. (—) Courbe selon relation (3.28), (---) courbe selon la relation (3.31).

Par ailleurs la figure 2.12 montre que pour F_1 donné la profondeur de l'écoulement h_2 augmente avec l'augmentation de la pente du canal $\tan(\alpha)$. En utilisant les mesures expérimentales, l'analyse de la relation (2.27) mène à la relation suivante (2.31):

$$Y = (9,15 \tan \alpha + 1,07) F_1^{(0,7-1,4 \tan \alpha)} \quad (2.31)$$

$$\text{Pour } 0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$$

$$3 < F_1 < 13$$

L'expression (2.31) est explicite d'où en déduit le rapport Y, sachant F_1 et $\tan(\alpha)$.

II.3.1.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut

II.3.1.2.3.1. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

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

La figure 2.13 montre la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

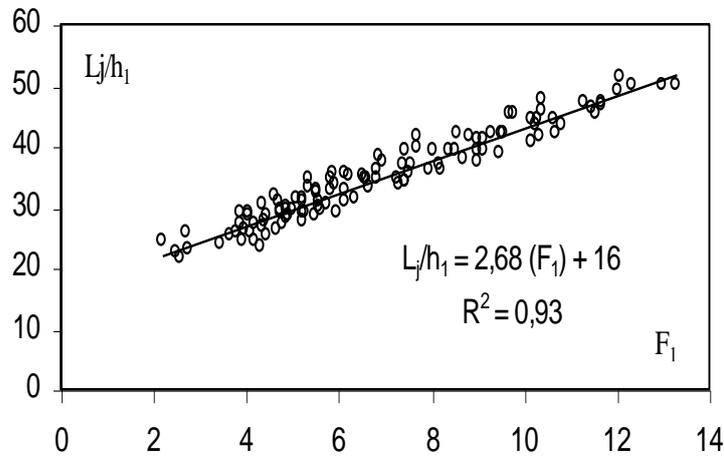


Figure. 2.13 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$.

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

$$L_j/h_1 = 2,68 F_1 + 16 \quad (2.32)$$

$$\text{Pour } 2 < F_1 < 14$$

II.3.1.2.3.2. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F_1

La longueur L_r est considérée comme étant la distance séparant la section initiale et la section finale du rouleau de surface. L'analyse de la relation $L_r/h_1 = f(F_1)$, a permis également aux auteurs de montrer, que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative du rouleau.

La figure (2.14) montre la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

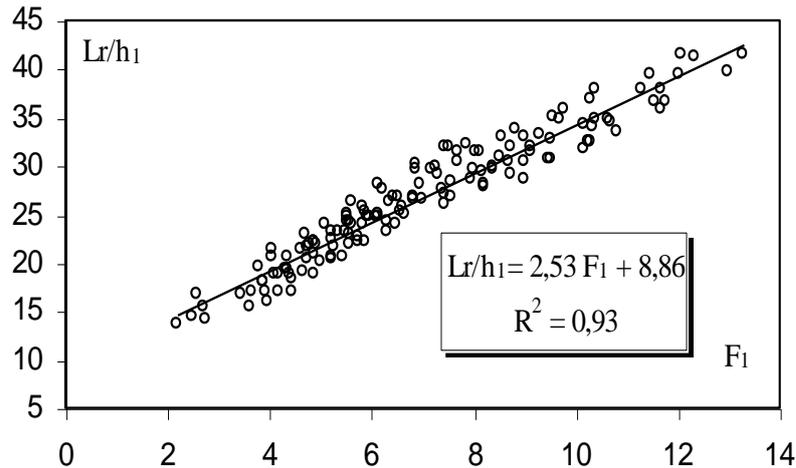


Figure.2.14 : Variation de la longueur relative Lr/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$.

La figure 2.14 montre que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident, engendre celle de la longueur relative du rouleau. Par ailleurs, l'ajustement des points expérimentaux a permis aux auteurs d'aboutir à une relation linéaire d'équation :

$$Lr/h_1 = 2,53 F_1 + 8,86 \quad (2.33)$$

Pour $2 < F_1 < 14$

II.4. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINE À PENTE NÉGATIVE

II.4.1. Etude de Debabeche et de Temim (2008).

II.4.1.1. Analyse théorique

L'équation de la quantité de mouvement appliquée entre les sections 1 et 2 est rédigée comme suit:

$$\rho Q v_1 + P_1 + G \sin \alpha = \rho Q v_2 + P_2 \quad (2.34)$$

où ρ est la masse volumique, et Q le débit volume.

La figure 2.15 montre un ressaut hydraulique évoluent dans un canal triangulaire avec une pente négative.

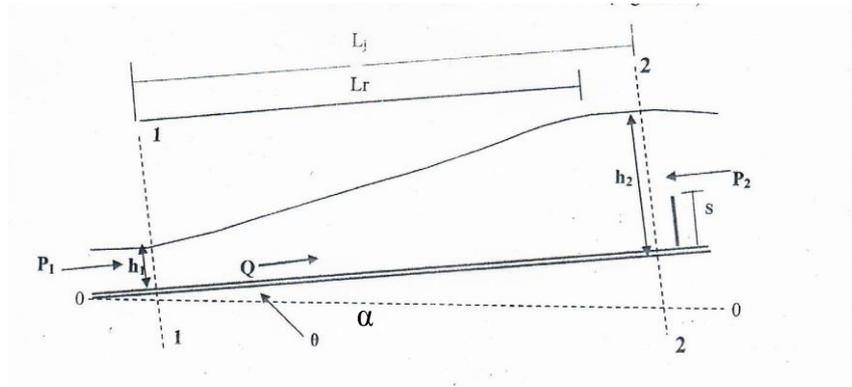


Figure. 2.15 : ressaut hydraulique sur une pente négative.

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

$$P_1 = m\varpi \frac{h_1^3 \cos(\alpha)}{3}; \quad P_2 = m\varpi \frac{h_2^3 \cos(\alpha)}{3}; \quad G = \omega V \quad (2.35)$$

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

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

$$V = \frac{1}{3} m k L_j h_1^2 (1 + Y + Y^2) \quad (2.36)$$

En tenant compte des relations (2.35) et (2.36) la relation (2.34) devient:

$$\frac{Q^2}{g m h_1^2} + \frac{m h_1^3 \cos \alpha}{3} + \frac{1}{3} k m L_j h_1^2 (1 + Y + Y^2) \sin \alpha = \frac{Q^2}{g m h_2^2} + \frac{m h_2^3 \cos \alpha}{3} \quad (2.37)$$

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

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{gm^2h_1^5} \quad (2.38)$$

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

En incluant la relation (2.38) dans la relation (2.37) on obtient:

$$F_1^2 + \frac{2}{3}\cos\alpha + \frac{2}{3}k\lambda(Y^2 + Y + 1)\sin\alpha = \frac{F_1^2}{Y^2} + \frac{2}{3}Y^3\cos\alpha \quad (2.39)$$

L'équation (2.39) peut être exprimée telle que :

$$F_1^2 = \frac{2}{3}Y^2 \frac{(Y^2 + Y + 1)}{(Y + 1)} \left[\cos(\alpha) - \frac{k\lambda \sin(\alpha)}{Y - 1} \right] \quad (2.40)$$

La relation (2.40) exprime le nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées, de l'angle d'inclinaison α du canal par rapport à l'horizontale et la longueur relative $\lambda=Lj/h_1$ d'un ressaut hydraulique à pente positive, évoluant dans un canal de section droite triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° .

Le remplacement de $\alpha =0$ dans la relation (2.40), donne la relation (2.41) de Hager et Wanoscheck (1987) concernant le ressaut hydraulique classique dans le canal triangulaire.

$$F_1^2 = \frac{2}{3}Y^2 \frac{(Y^2 + Y + 1)}{(Y + 1)} \quad (2.41)$$

Pour déterminer le coefficient k de l'équation (2.40), l'approche proposée sera analysée à l'aide des données expérimentales.

La relation (2.41) à permis aussi d'obtenir l'expression de la longueur relative λ du ressaut tel que:

$$\lambda = \frac{(Y^3 - 1)\cos(\alpha) - \frac{3F_1^2(Y^2 - 1)}{2Y^2}}{k(Y^2 + Y + 1)\sin(\alpha)} \quad (2.42)$$

II.4.1.2 Analyse expérimentale

II.4.1.2.1. Détermination du coefficient k

D'après la relation (2.40) l'expression du coefficient k est tel que:

$$k = \frac{(Y^3 - 1)\cos(\alpha) - \frac{3F_1^2(Y^2 - 1)}{2Y^2}}{\lambda(Y^2 + Y + 1)\sin(\alpha)} \quad (2.43)$$

Les données expérimentales ont permis aux auteurs de trouver une valeur constante du coefficient $k = 1.53$, ce dernier ne dépend pas de la pente du canal. Cette observation a été également vérifiée par Mc Corcodale et Mohammed (1994) ainsi par Pagliara et Peruginelli (2000) pour le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en contre pente.

II.4.1.2.2. Relation explicite du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal

L'équation (2.40) apparaît sous une forme implicite et son application par conséquent se fait par itération.

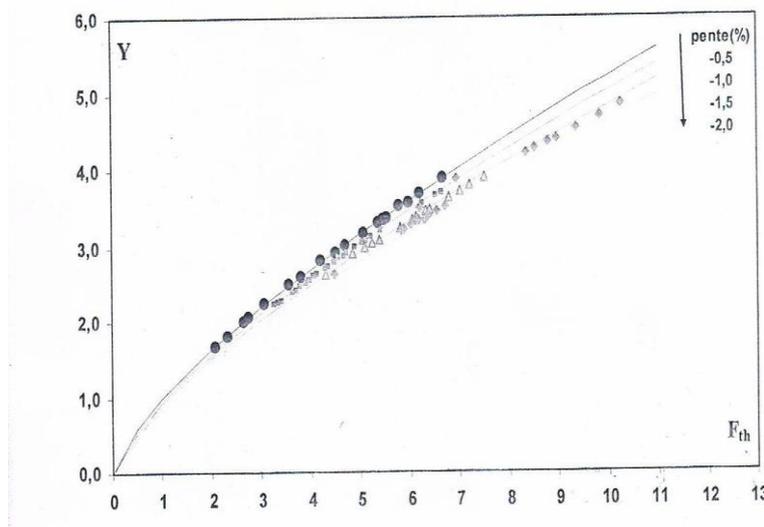


Figure. 2.16 : Variation expérimentale de $Y(F_1)$ pour différentes valeur de $\tan(\alpha)$
(—) Courbe selon relation (3.31)

Par ailleurs la figure 2.16 montre que pour F_1 donné la profondeur de l'écoulement h_2 diminue avec l'augmentation de la pente du canal $\tan(\alpha)$. En utilisant les mesures expérimentales, l'analyse de la relation (2.40) mène à la relation suivante (2.44):

$$Y = (7,24 \tan(\alpha) + 1,03)F_1^{(0,72)} \quad (2.44)$$

$$\text{Pour } -0,005 \leq \tan(\alpha) \leq -0,02$$

$$2 < F_1 < 10$$

II.4.1.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut

II.4.1.2.3.1. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

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

La figure 2.17 montre la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

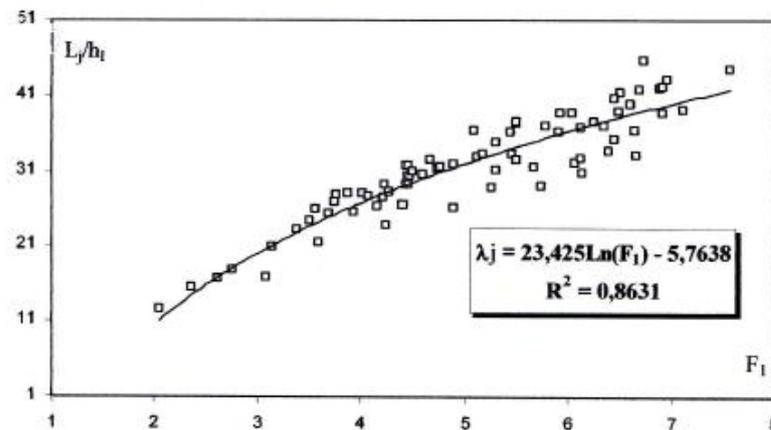


Figure 2.17 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $-0,005 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$.

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

$$L_j/h_1 = 23,43 \ln(F_1) - 5,76 \quad (2.45)$$

Pour $2 < F_1 < 8$ et $-0,005 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$.

II.4.1.2.3.2. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F_1

La longueur L_r est considérée comme étant la distance séparant la section initiale et la section finale du rouleau de surface. L'analyse de la relation $L_r/h_1 = f(F_1)$, a permis également aux auteurs de montrer, que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative du rouleau.

La figure (2.18) montre la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

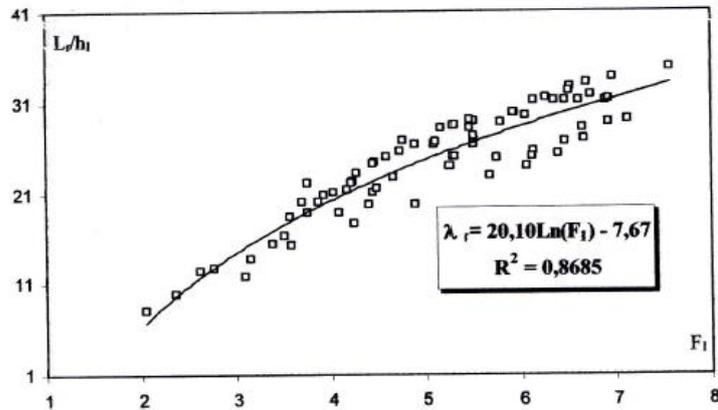


Figure.2.18 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $-0,005 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$.

La figure 2.18 montre que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident, engendre celle de la longueur relative du rouleau. Par ailleurs, l'ajustement des points expérimentaux a permis aux auteurs d'aboutir à une relation logarithmique:

$$L_r/h_1 = 20,10 \ln(F_1) - 7,67 \quad (2.46)$$

Pour $2 < F_1 < 8$ et $-0,005 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$.

II.5. CONCLUSION

A travers ce troisième chapitre, nous avons examiné en premier lieu, les travaux de Hager et Wanoschek (1987); ces études ont concerné le ressaut triangulaire classique évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° .

Nous avons mis l'accent sur la démarche expérimentale assez particulière de Hager et Wanoschek (1987) qui extrapole les résultats issus d'un profil semi triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique. L'étude (1987) montre que les rapports Y expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs à ceux calculés par l'équation de la quantité de mouvement. Cette différence est attribuée à l'effet des frottements sur les parois du canal et l'équation de la quantité de mouvement est alors modifiée en tenant compte de ceux-ci. L'effet des frottements est traduit par le paramètre adimensionnel $\Lambda = [\nu m h_1 / (2Q)]^{1/4}$, où ν est la viscosité cinématique du liquide, m la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontale, h_1 la hauteur initiale du ressaut et Q le débit volume.

Nous avons abordé en second lieu le travail d'Achour et Debabeche (2003) qui a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut, contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince, dans un canal de section droite triangulaire à angle d'ouverture de 90° . Le ressaut est contrôlé de telle sorte que sa longueur L_j soit approximativement égale à la longueur du bassin, délimité à l'amont par le pied du ressaut et à l'aval par le seuil. L'expérimentation a eu pour objectif de corréler les différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. L'étude de Achour et Debabeche (2003) montre que ces paramètres sont en nombre de cinq, et pouvant former trois produits adimensionnels $S=s/h_1$, F_1 et X/h_1 ; S est la hauteur relative du seuil et X/h_1 sa position relative. L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a pu mener à l'établissement de relations simples à l'emploi, liant les trois variables adimensionnelles ci-dessus citées, pour le type de seuil considéré.

Ce chapitre a été consacré lieu à l'étude de Debabeche et al (2009) et Cherhabil (2010), relative à l'analyse de l'influence de la pente positive sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire symétrique. Une relation générale sous une forme implicite est obtenue liant le rapport des profondeurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal α .

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

En dernier, pour le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal triangulaire symétrique à pente négative variable un développement théorique visant à exprimer la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, \lambda_j, \alpha)=0$. En effet, les mesures expérimentales ont permis d'estimer le coefficient de correction K . une valeur moyenne constante $K=1,53$ a été trouvée.

L'étude expérimentale a montré que l'augmentation de la pente négative engendre la diminution du rapport Y des hauteurs conjuguées. En outre il a été montré que l'inclinaison du canal, n'a pas d'influence sur les relations $\lambda_j(F_1)$ et $\lambda_r(F_1)$.

Chapitre III

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOIDAL

III.1. INTRODUCTION

Ce chapitre a été divisé en deux parties.

Le premier partie a été consacré les travaux de Hager et Wanoschek (1989) relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal de pente géométrique horizontale, à parois latérales inclinées d'un angle de 45° .

Le deuxième partie a été consacrée à un développement théorique et expérimental du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique, à fond incliné, formant une pente positive avec l'horizontale, où on va aborder les résultats du mémoire de magister de Riguet (2011).

III.2 Approche de Hager et Wanoschek (1989)

III.2.1. Généralités

La première étude concernant le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal est probablement celle de Posey et Hsing (1938). Ils ont constaté que le rapport des hauteurs conjuguées observées s'ajuste bien avec les prédictions basées sur l'approche dynamique classique. Toutefois, les caractéristiques d'écoulement ont été jugées tout à fait différentes de celles rencontrées dans des canaux rectangulaires. La longueur L_j du ressaut hydraulique dans des canaux trapézoïdaux mesurée le long de l'axe du canal a été jugée moins définie que dans le canal rectangulaire. Sandover et Holmes (1962), ont étudié le ressaut hydraulique dans des canaux trapézoïdaux pour des pentes des parois latérales de 30° , 45° , 60° , ils ont signalé des difficultés dans la corrélation des hauteurs conjuguées prévus par l'approche dynamique avec leurs données, les caractéristiques des longueur ont été impossible à établir. Silvester (1964) s'est référé aux épreuves présentées par Hsing. Ses observations ne couvraient pourtant que les nombres de Froude $F_1 < 4$.

III.2.2. Description des essais

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

III.2.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure 3.1 montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiales et finale 1et 2.

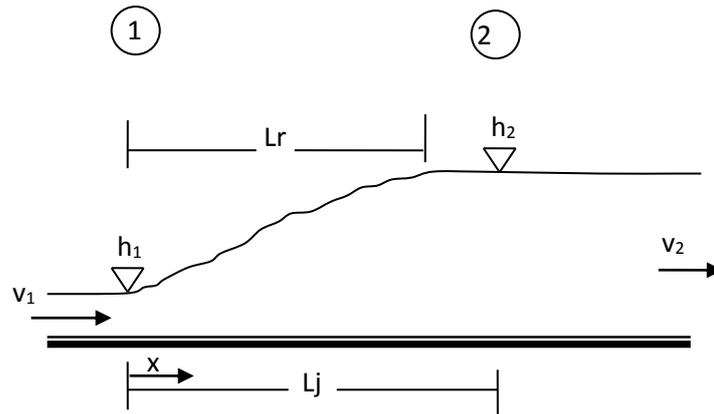


Figure 3.1 : Ressaut hydraulique classique.

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

$$V_1 = Q / A_1 \quad (3.1)$$

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

$$A = bh_1 + mh_1^2 \quad (3.2)$$

tel que:

b : la largeur du canal trapézoïdal.

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

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

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

En outre, en raison du fait que le ressaut évolue dans un canal de pente nulle, la composante tangentielle du poids propre de la masse liquide considérée n'est également nulle. Ainsi, les forces extérieures appliquées à la masse liquide en mouvement se résument aux forces de pressions hydrostatiques P_1 et P_2 s'exerçant sur les sections 1 et 2. Ces forces s'écrivent :

$$P_1 = \varpi \bar{h}_1 A_1 \quad (3.3)$$

$$P_2 = \varpi \bar{h}_2 A_2 \quad (3.4)$$

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

On peut donc écrire que :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6} \cdot \frac{3b + 2mh_1}{A_1} \quad (3.5)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6} \cdot \frac{3b + 2mh_2}{A_2} \quad (3.6)$$

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

$$\frac{b.h_1^2}{2} + \frac{m.h_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(bh_1 + m.h_1^2)} = \frac{b.h_2^2}{2} + \frac{m.h_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b.h_2 + m.h_2^2)} \quad (3.7)$$

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

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b + 2mh_1)}{g(bh_1 + mh_1^2)^3}, \quad Y = \frac{h_2}{h_1}, \quad M = \frac{mh_1}{b} \quad (3.8)$$

L'équation (3.7) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (3.9)$$

La relation (3.9) exprime la variation du nombre de Froude à l'amont du ressaut en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées et du coefficient de forme M . Les équations régissant les ressauts en canal de section rectangulaire constante et en canal triangulaire peuvent être déduites de la relation (3.9).

Sur la Figure 3.2 est représentée graphiquement, dans un système d'axes de coordonnées cartésiennes, la relation (3.9) :

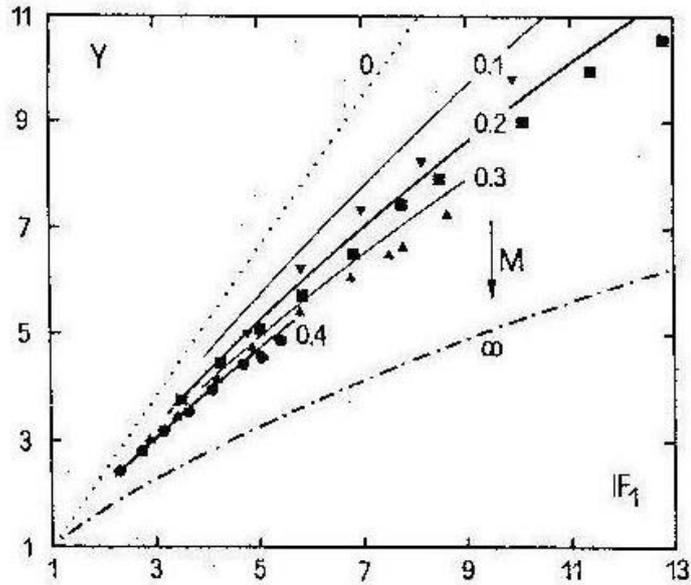


Figure 3.2 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M .

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

$M=0$: profil rectangulaire.

$M \rightarrow \infty$: profil triangulaire.

La Figure 3.2 montre clairement que la plus faible valeur de rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut est obtenue dans le cas du profil triangulaire, pour une même valeur du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

III.2.4. Longueurs caractéristiques du ressaut

III.2.4.1. longueur du rouleau de fond

Une caractéristique particulière de ressaut trapézoïdal pour $F_1 > 4$ est l'apparition d'un rouleau de fond, la figure 3.3 montre un esquisse de définition. Les dimensions du rouleau de fond peut être proposée par L_u (la distance du pied du ressaut au début du rouleau de fond), L_b longueur du rouleau de fond et h_b la hauteur maximal du rouleau de fond.

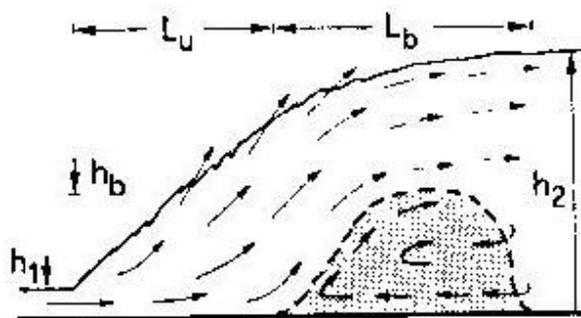


Figure 3.3: schéma de définition

Les figures 3.4.a à c montre les rapports $\lambda_u=L_u/h_2$, $\lambda_b=L_b/h_2$, et h_b/h_2 en fonction du nombre de Froude F_1 pour diverses M. où h_2 correspond à la profondeur de l'écoulement en aval du ressaut.

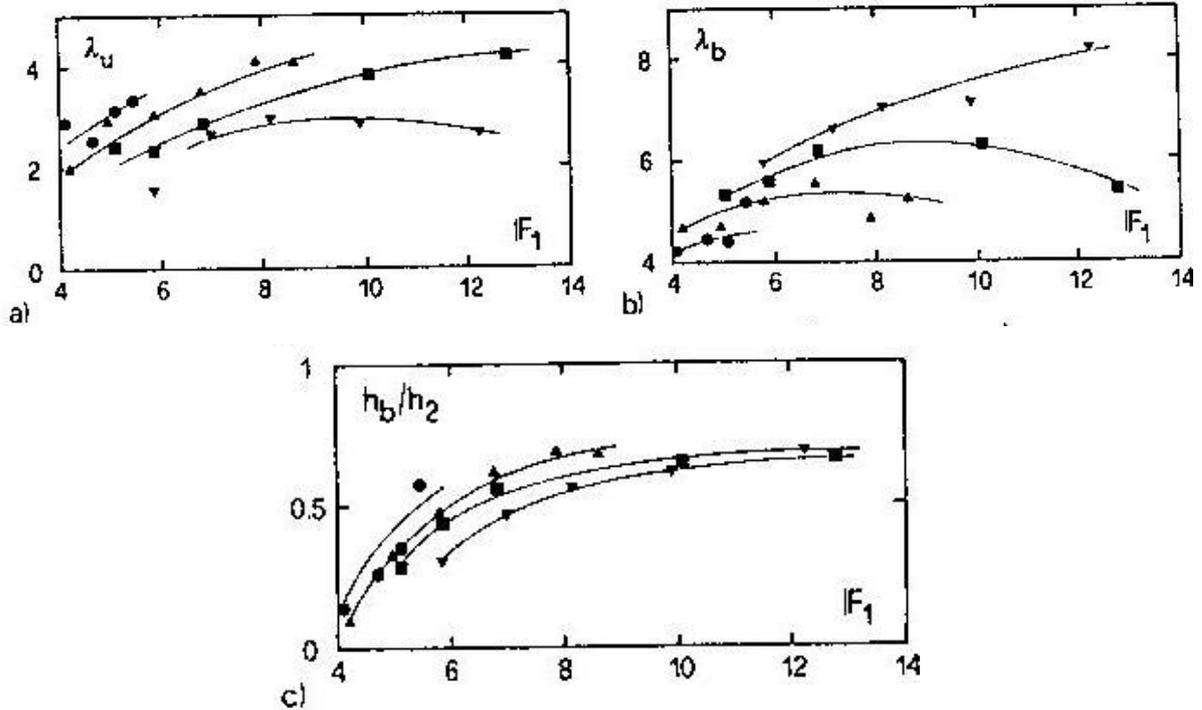


Figure 3.4 : caractéristique principale du rouleau de fond: a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximale.

La figure 3.4 montre que:

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

III.2.4.2. Longueur du ressaut

Une autre longueur importante est la longueur du ressaut L_j , bien que de nombreuses définitions de mesure de cette longueur ont été avancées; Il a été conseillé de laisser la position de la fin du ressaut où l'ébullition de surface disparaît. A ce stade, les poches de bulles d'air remontent à la surface indiquant la fin de la zone de dégazage, de tout évidence, le niveau de turbulence diminue ensuite de manière significative et indique la fin du ressaut.

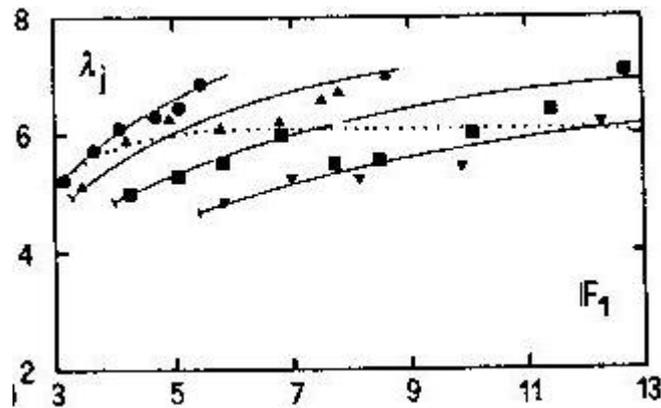


Figure 3.5: longueur relative λ_j du ressaut en fonction de F_1 et de M

La figure 3.5 représente les mesures expérimentales de Hager et Wanoschek (1989) ($m=1$) concernant la longueur relative L_j/h_2 en fonction du nombre de Froude F_1 et de M , il apparaît par conséquent que la longueur relative L_j/h_2 dépend uniquement de M et de F_1 .

III.2.5. Rendement du ressaut

La figure 3.6 montre la ligne de charge totale le long de la longueur L_j sur laquelle s'étend le ressaut classique.

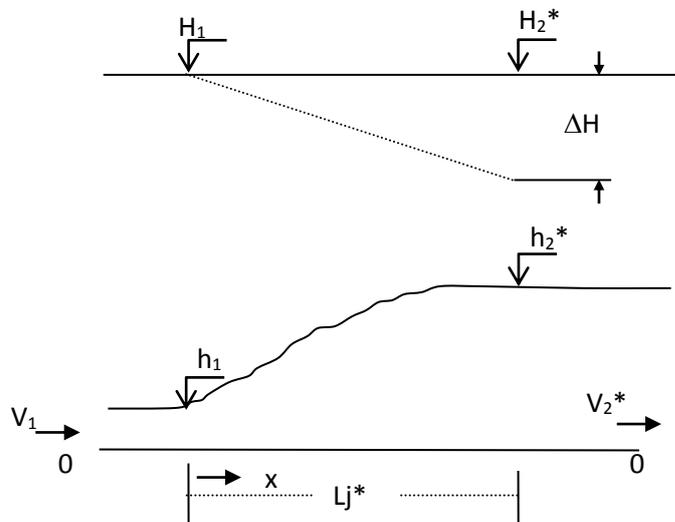


Figure 3.6 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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

$$H_1 = h_1 + \alpha_1 \cdot v_1^2 / (2 \cdot g) \tag{3.10}$$

Tandis que la charge totale dans la section finale est :

$$H_2^* = h_2^* + \alpha_2 \cdot v_2^{*2} / (2 \cdot g) \tag{3.11}$$

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

La perte de charge ΔH^* due au ressaut est la différence des charges totales initiale et finale:

$$\Delta H^* = H_1 - H_2^* \quad (3.12)$$

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

$$Q = v_1.A_1 = v_2^*.A_2 \quad (3.13)$$

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

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

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

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

$$\eta^* = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2(1+M)^3}{2Y^2(1+2M)(1+YM)^2}}{1 + \frac{F_1^2(1+M)}{2(1+2M)}} \quad (3.14)$$

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

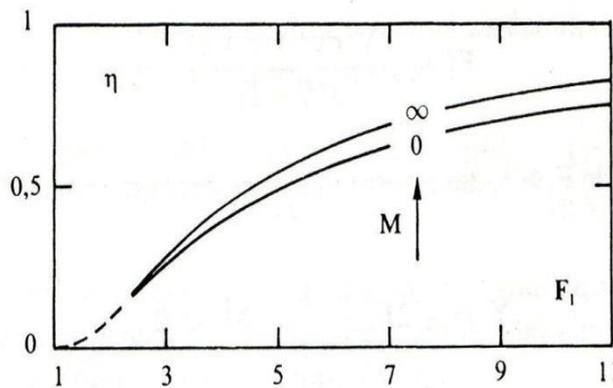


Figure 3.7 : Rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude.
 $M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire.

La figure 3.7 montre que le rendement du ressaut dans les canaux trapézoïdaux est compris entre les courbes de rendement du ressaut dans le canal triangulaire et du canal rectangulaire. Par ailleurs, pour le même nombre de Froude F_1 le rendement η est important pour le canal triangulaire.

III.2.6. Description du ressaut

Selon Hager, par rapport au ressaut hydraulique bien connu dans des canaux rectangulaires, la configuration d'écoulement du ressaut dans les canaux trapézoïdaux est tout à fait différente. Le ressaut classique est caractérisé par un écoulement de fond à grande vitesse et un rouleau de surface qui les recouvre.

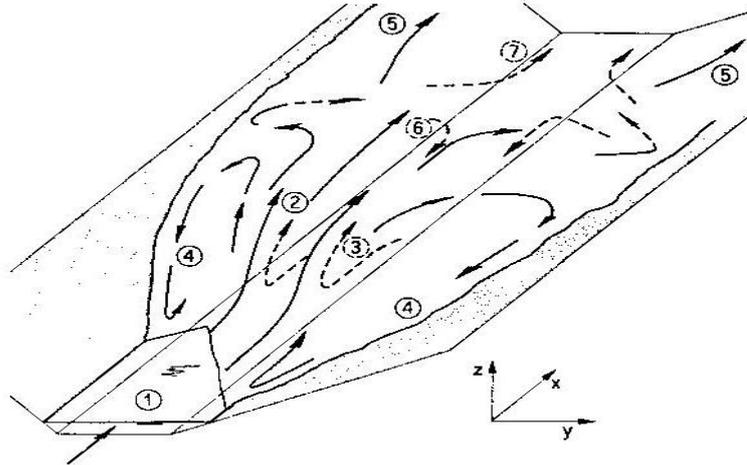


Figure 3.8 : Illustration schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal. (→) courants de surface, (- -→) courant de fond.

La figure 3.8 illustre un tracé schématique des caractéristiques de l'écoulement principal dans un ressaut trapézoïdal. La grande vitesse de l'écoulement (1) est soulevé en l'air et forme une zone éclaboussures (2) en raison de la présence d'une zone de séparation de fond (3), dénommé rouleau de fond. Le courant principal circule donc près de la surface et diverge lentement vers les parois latérales. Cela est dû à la concentration des débits (1) à la partie centrale de la section transversale, et la dépression résultant le long des parois latérales. Une première partie de l'écoulement latéral revient en amont et formes les zones de retour latérales de l'écoulement (4) sur les deux cotes du canal. Une seconde partie reste à la surface et poursuit vers l'aval, (5). Une troisième partie plonge le long des parois latérales en pente et alimente le rouleau de fond, (6). Plus en aval, ce courant n'est plus entraîné par le rouleau de fond, mais continue directement vers l'aval, (7).

Un ressaut hydraulique trapézoïdal est donc régi par des phénomènes d'écoulement très spatial. La présence du rouleau de fond comporte plusieurs différences au ressaut classique:

- Les vitesses sur le fond sont considérablement réduites;
- Le flux principal est remonté à la surface, mais diverge des deux côtés du canal;

- Par conséquent, les vitesses maximales se produisent le long des parois latérales près de la Surface libre.

III. 3 RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL

A PENTE POSITIVE (Riguet, 2012)

III.3.1 ANALYSE THEORIQUE

III.3.1.1 Equation de la quantité de mouvement

L'application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale, incliné d'une pente positive est rédigée comme suit :

$$\rho Q v_1 + P_1 + G \sin \alpha = \rho Q v_2 + P_2 \quad (3.15)$$

Où ρ est la masse volumique, et Q le débit volumique.

La figure 3.9 montre un ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale, incliné d'une pente positive

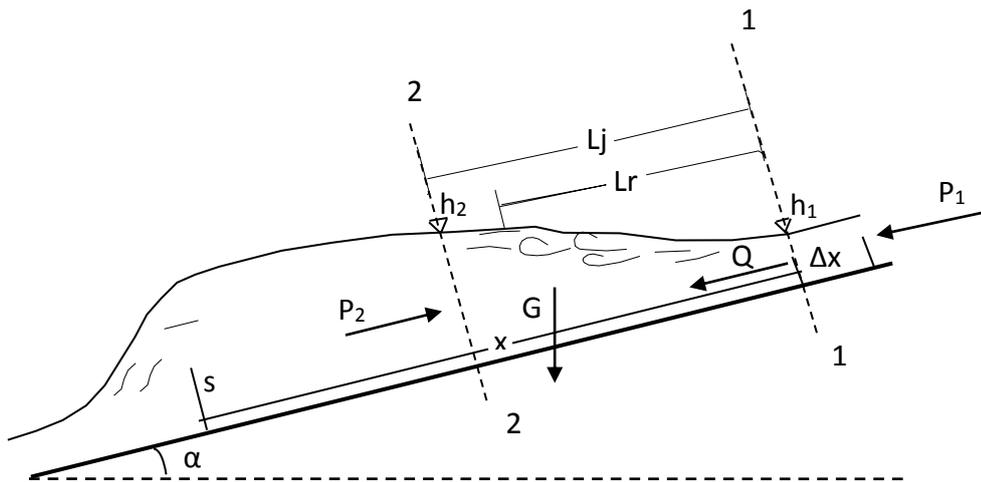


Figure 3.9 : Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal incliné à pente positive

Les forces de pressions P_1 et P_2 ainsi que le poids G de l'eau peuvent être exprimés, en appliquant les lois de l'hydrostatique:

$$P_1 = \omega h c_1 A_1, P_2 = \omega h c_2 A_2, G = \omega V \quad (3.16)$$

Où: $\omega = \rho g$ représente le poids spécifique du liquide en écoulement, $h c_1$ et $h c_2$ représentent respectivement les distances des centres de gravité des sections transversales 1 et 2 à partir de la surface libre de l'écoulement où :

$$hc_1 = \frac{h_1^2}{6} \cdot \frac{3b + 2mh_1}{A_1} \cos \alpha \quad hc_2 = \frac{h_2^2}{6} \cdot \frac{3b + 2mh_2}{A_2} \cos \alpha \quad (3.17)$$

A_1 et A_2 représentent respectivement l'aire de la section mouillée 1 et 2

$$\text{Où: } A_1 = bh_1 + mh_1^2 \quad (3.18)$$

$$A_2 = bh_2 + mh_2^2 \quad (3.19)$$

et V représente le volume d'eau inscrit entre les deux sections 1 et 2.

Le paramètre m est défini comme la cotangente de l'angle θ . Celui-ci est l'angle d'inclinaison des parois du canal trapézoïdale symétrique par rapport à l'horizontal.

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

$$V = kbh_1 \left[\frac{M(Y^2 + 1) + Y + 1}{2} \right] \times L_j \quad (3.20)$$

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

En tenant compte des relations (3.16) à (3.19), (3.20), la relation (3.15) devient

$$\begin{aligned} \frac{Q^2}{g(bh_1 + mh_1^2)} + \frac{h_1^2 \cos \alpha}{6} (3b + 2mh_1) + \frac{1}{3} Kbh_1 L_j [(Y + 1) + M(Y^2 + 1)] \sin \alpha = \\ \frac{Q^2}{g(bh_2 + mh_2^2)} + \frac{h_2^2 \cos \alpha}{6} (3b + 2mh_2) \end{aligned} \quad (3.21)$$

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

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

$$F_1^2 + \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left(1 + \frac{2M}{3}\right) \cos \alpha + \frac{1+2M}{2(1+M)^2} K\lambda \left((Y+1) + M(Y^2+1)\right) \sin \alpha =$$

$$F_1^2 \left(\frac{1+M}{Y(1+MY)}\right) + \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left(Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3}\right)\right) \cos \alpha \quad (3.22)$$

L'équation (3.22) peut être exprimée telle que :

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

$$\frac{1+2M}{2(1+M)^2} \cos \alpha \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3}\right) - \left(1 + \frac{2M}{3}\right) - K\lambda \left((Y+1) + M(Y^2+1)\right) \tan \alpha \right] \quad (3.23)$$

La relation (3.23) exprime le nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées, de l'angle d'inclinaison α du canal par rapport à l'horizontale, le coefficient de forme $M = mh_1/b$ et la longueur relative $\lambda = L_j/h_1$ d'un ressaut hydraulique à pente positive, évoluent dans un canal de section droite trapézoïdale.

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

En remplaçant $\alpha=0$ dans la relation (3.23) on obtient :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)}\right] = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3}\right) - \left(1 + \frac{2M}{3}\right) \right] \quad (3.24)$$

La relation (3.23) mène donc à la relation (3.24) exprimant les caractéristiques du ressaut classique dans un canal trapézoïdale.

Ce résultat nous permet donc de valider notre approche théorique. En outre, afin de déterminer le coefficient de correction k , l'approche proposée sera confrontée par la suite aux résultats expérimentaux.

III.3.1.2 ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'EQUATION SEMI THEORIQUE

III.3.1.2.1. Estimation du coefficient k de correction

la relation (3.23) peut être reformulée comme suit :

$$K = \frac{\frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \cos \alpha - F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right]}{\frac{1+2M}{2(1+M)^2} [(Y+1) + M(Y^2+1)] \lambda \sin \alpha} \quad (3.25)$$

Le nombre de Froude incident est calculé pour $m=0,312$, Les données expérimentales ont permis aux auteurs de trouver une valeur constante du coefficient $k=1.09$.

III.3.1.2.2. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle α d'inclinaison du canal

L'équation liant les hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$ au nombre de Froude théorique F_1 devient:

$$Y = (7,39 \tan(\alpha) + 1,217) F_1 \quad (3.26)$$

$$1.49 \leq F_1 \leq 12.52.$$

$$0 \leq \tan(\alpha) \leq 2.$$

La figure 3.10 montre les courbes d'ajustements issues de la relation (3.26), selon les points expérimentaux.

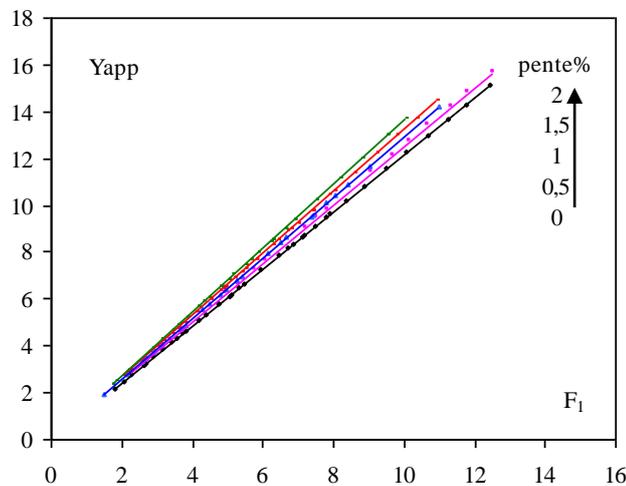


Figure 3.10: Variation expérimentale de $Y(F_1)$ pour différentes valeurs de $\tan(\alpha)$.
(—) courbe tracé selon la relation (3.26).

III.3.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

III.3.2.1 Longueurs caractéristiques du ressaut

III.3.2.1.1 Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

La longueur L_j a été considérée comme étant la distance séparant la section initiale du ressaut et la section finale. L'objectif principal de cette partie de l'étude est de quantifier la longueur relative L_j/h_1 dans la gamme de valeurs testées de la pente du canal.

La figure 3.11 montre la variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

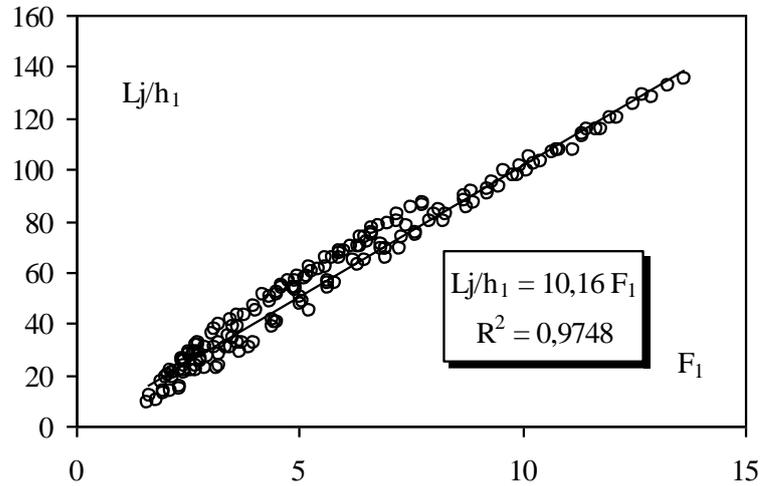


Figure 3.11 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$.

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

$$L_j/h_1 = 10,16 F_1 ; \quad R^2 = 0,9748 \quad (3.27)$$

Pour $1,6 < F_1 < 13,64$

III.3.2.1.2. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F_1

La longueur L_r est considérée comme étant la distance séparant la section initiale et la section finale du rouleau de surface.

La figure 3.12 montre la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

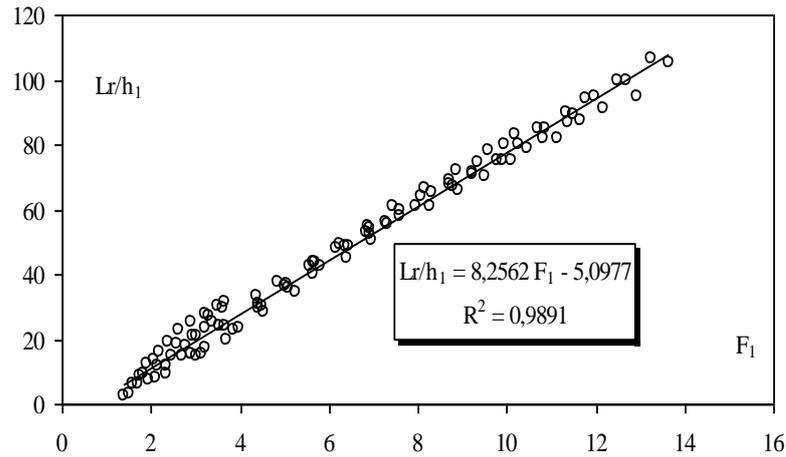


Figure 3.12 : Variation de la longueur relative Lr/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$.

La figure 3.12 montre que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident, engendre celle de la longueur relative du rouleau. Par ailleurs, l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir également à une relation linéaire d'équation :

$$Lr/h_1 = 8,2562F_1 - 5,0977 \quad (3.28)$$

$$\text{Pour } 1,37 < F_1 < 13,64$$

III.4. CONCLUSION

en premier lieu ce chapitre a traité les travaux de Hager et Wanoschec (1989) concernant les caractéristiques du ressaut trapézoïdal. Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de rouleau de fond. Ils ont montré que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale en négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut.

L'étude expérimentale a eu pour objectif d'estimer la variation de la longueur relative L_r/h_2 en fonction du nombre de Froude F_1 . En effet une caractéristique particulière de ressaut trapézoïdal pour $F_1 > 4$ est l'apparition d'un rouleau de fond, et des zones d'écoulement de retour latérale, l'expérimentation montre ainsi qu'aucun rouleau de surface existe dans ce type de ressaut.

Dans le deuxième chapitre, il a été présenté les résultats de mémoire de magister de Riguet (2012), une analyse théorique et une analyse expérimentale de l'équation semi théorique.

Pour l'étude théorique il a été exposé un développement théorique visant à exprimer la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, \lambda, M, \alpha) = 0$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale à pente positive variable.

Pour l'analyse expérimentale les mesures obtenues ont permis d'estimer le coefficient de correction k , donné comme étant le rapport du volume réel et du volume calculé du ressaut. En effet, une valeur moyenne constante $k=1,09$ a été trouvée. En outre on a déterminé l'effet de la pente du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique, à savoir le rapport des hauteurs conjuguées Y , la longueur L_j du ressaut, la longueur L_r du rouleau.

CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

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

Le premier chapitre a eu pour but d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Trois types de ressaut ont été étudiés :

- Le ressaut hydraulique classique, où nous avons mis l'accent sur les travaux de Hager (1990), relatif aux caractéristiques du ressaut classique. Nous avons montré que l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre ses sections initiale et finale, en négligeant les pertes de charge autres que celles dues au ressaut, mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement.

- Le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente positive, où il a été montré que la première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné est celle de Bakhmeteff et Matzké (1938), qui ont évoqué dans leurs études, le profil de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. En outre Kindsvater (1944), a classifié les ressauts inclinés à pente positive en quatre principaux types; type A, type B, type C et type D. En outre il a proposé une approche pour le rapport des hauteurs conjuguées pour le ressaut de type C.

- Le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente négative, où nous avons présenté les travaux de Mc Corcodal et Mohamed (1994), qui ont étudié le cas limite d'existence du ressaut en pente négative, une relation théorique a été proposée pour le type D. Les auteurs confirment que ce type de ressaut est très sensible à la variation des profondeurs conjuguées pour des nombres de Froude $F_1 < 4$. Cependant, pour les nombres de Froude $F_1 < 9$, selon les hauteurs, le ressaut limite en pente négative (type D) est difficile à établir.

Le second chapitre de notre étude bibliographique, a permis de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire. Deux types de ressauts ont été également étudiés :

- Le ressaut hydraulique classique, où nous avons mis l'accent en premier lieu sur la démarche expérimentale assez particulière de Hager et Wanoschek (1987) qui extrapolent les résultats issus d'un profil semi triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° . L'étude montre que les rapports Y expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs à ceux calculés par l'équation de la

quantité de mouvement. Cette différence est attribuée à l'effet des frottements sur les parois du canal et l'équation de la quantité de mouvement est alors modifiée en tenant compte de ceux-ci. L'effet des frottements est traduite par le paramètre adimensionnel $\Lambda = [\nu m h_1 / (2Q)]^{1/4}$, lorsque $\Lambda = 0$. Aucun effet des frottements n'est observé et l'équation de la quantité de mouvement sous sa forme classique est applicable. Hager et Wanoschek (1987) proposent 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 F_1 de l'écoulement incident et de m . Par la suite l'étude aborde le profil de surface généralisé du ressaut. Une équation représentative du profil de surface généralisé le long de l'axe du canal est alors proposée.

En deuxième lieu l'approche de Achour et Debabeche (2003) qui a été consacrée à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° . Le ressaut est contrôlé de telle sorte que sa longueur L_j soit approximativement égale à la longueur du bassin, délimité à l'amont par le pied du ressaut et à l'aval par le seuil. L'expérimentation a eu pour objectif de corrélérer les différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. L'étude de Achour et Debabeche (2003) montre que ces paramètres sont en nombre de cinq, et pouvant former trois produits adimensionnels $S = s/h_1$, F_1 et x/h_1 ; S est la hauteur relative du seuil et x/h_1 sa position relative. L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a pu mener à l'établissement de relations simples à l'emploi, liant les trois variables adimensionnelles ci-dessus citées, pour le type de seuil considéré.

- Le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente positive, où nous avons spécifié en dernier lieu l'étude de Debabeche et al (2009), et celle de Cherhabil (2010), qui ont trait à l'étude, théorique et expérimentale, du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. Une relation générale liant le rapport des profondeurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal α a été trouvée. L'expérimentation a eu pour objectif, en outre d'évaluer les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique à savoir la longueur du ressaut et la longueur du rouleau de surface, où il a été montré que l'inclinaison du canal, n'a pas d'influence sur les relations $\lambda(F_1)$ et $\lambda_r(F_1)$.

Le troisième et dernier chapitre a abordé en premier temps, la classification du ressaut classique proposé par Bradley et Pterka (1957), dans un second temps, il a été cité les travaux de Hager et Wanoschek (1989), relatifs au ressaut hydraulique classique dans un canal trapézoïdal à angle d'ouverture de 45° . L'étude a concerné les caractéristiques du ressaut notamment ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau de

fond. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale.

Par ailleurs, la deuxième partie de notre mémoire, sera consacrée à notre contribution à l'étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal non prismatique, incliné d'une pente négative.

Deuxième partie

**CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU
RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN
CANAL TRAPÉZOÏDAL A PENTE
NÉGATIVE**

INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE

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

➤ Le premier chapitre de cette partie sera consacré à l'étude théorique du ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale non prismatique à pente négative.

➤ Le deuxième chapitre aura pour objectif d'expérimenter les caractéristiques de ce type de ressaut et de trouver des relations adimensionnelles régissant son évolution.

En effet, les relations obtenues faciliteront sans doute le dimensionnement de bassins de dissipation de forme trapézoïdale avec ou sans pente.

Chapitre IV

**ÉTUDE THÉORIQUE DU RESSAUT
HYDRAULIQUE EN CANAL
TRAPÉZOÏDAL À PENTE
NÉGATIVE**

IV.1. INTRODUCTION

Ce présent chapitre de notre étude sera consacré en premier lieu à un développement théorique, permettant de trouver une relation théorique de la forme $F_1=f(Y, \lambda, M, \alpha)$, tels que : F_1 est le nombre de Froude de l'écoulement incident, $Y=h_2/h_1$ est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut (h_1 et h_2 étant les hauteurs conjuguées du niveau d'eau respectivement à l'extrémité amont et aval), $M=mh_1/b_1$ le coefficient de forme du canal (m représente la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois latérale par rapport à l'horizontale, b_1 la largeur de l'amont du base du canal), $\lambda=L_j/h_1$ la longueur relative du ressaut, et α l'angle d'inclinaison du canal par rapport à l'horizontale. En second lieu ce chapitre servira à estimer le coefficient k de correction, afin de corriger la relation issue du développement théorique. k étant le rapport du volume réel et du volume calculé du ressaut.

Les données expérimentales nous permettront en outre, d'analyser expérimentalement la relation obtenue, afin de trouver une formulation explicite de la fonction $f(F_1, Y, \lambda, M, \alpha)=0$.

IV.2. ANALYSE THEORIQUE

IV.2.1. Equation de la quantité de mouvement

Nous avons appliqué l'équation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale non prismatique incliné d'une pente négative par rapport à l'horizontale (Figure 4.1), en tenant compte des hypothèses simplificatrices citées dans la partie bibliographique.

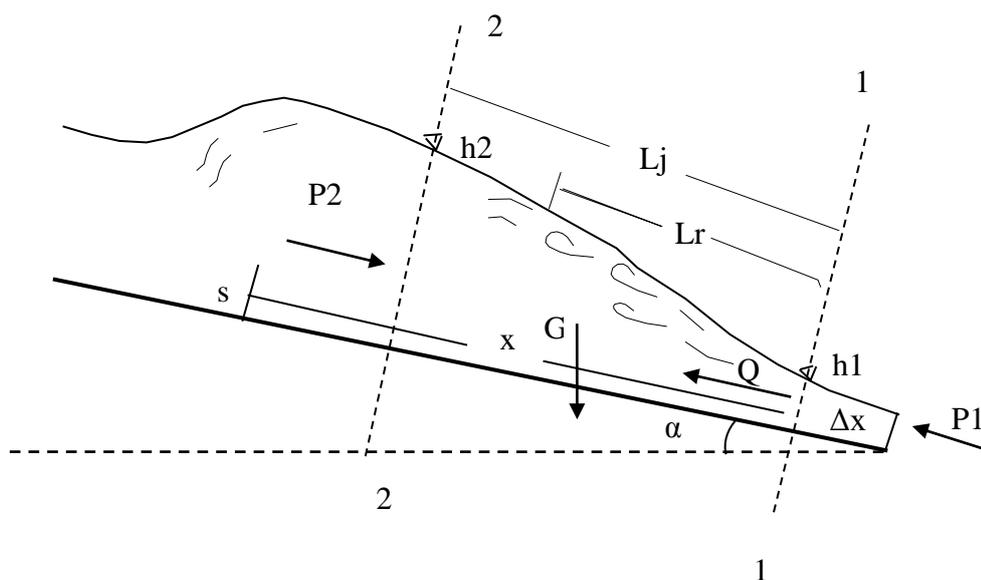


Figure 4.1 : Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal incliné à pente négative

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

$$\rho Q \vec{v}_1 - \rho Q \vec{v}_2 = \sum \vec{F}_{ext} \quad (4.1)$$

Tel que:

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

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

La relation (4.1) s'écrit :

$$\rho Q v_1 + P_1 + G \sin \alpha = \rho Q v_2 + P_2 \quad (4.2)$$

Les forces P_1 et P_2 sont appliquées, selon la figure 4.2, respectivement aux centres de gravité des sections trapézoïdales 1 et 2 ; le poids G est appliqué au centre de gravité du ressaut. Les forces de pressions P_1 et P_2 ainsi que le poids G de l'eau peuvent être exprimés, en appliquant les lois de l'hydrostatiques: $P_1 = \omega h c_1 A_1$, $P_2 = \omega h c_2 A_2$, $G = \omega V$, où: $\omega = \rho g$ représente le poids spécifique du liquide en écoulement, $h c_1$ et $h c_2$ représentent respectivement les distances des centres de gravité des sections transversales 1 et 2 à partir de la surface libre de l'écoulement, A_1 et A_2 représentent respectivement l'aire de la section mouillée 1 et 2 et V représente le volume d'eau inscrit entre les deux sections 1 et 2.

En remplaçant les expressions de P_1 , P_2 et G dans la relation (4.2), on obtient:

$$\rho Q v_1 + \omega h c_1 A_1 + \omega V \sin \alpha = \rho Q v_2 + \omega h c_2 A_2 \quad (4.3)$$

L'équation de continuité indique que la vitesse moyenne de l'écoulement s'écrit, en fonction du débit volume Q et de l'aire de la section mouillée A : $v = Q/A$.

En tenant compte de toutes ces considérations la relation (4.3) peut s'écrire, en divisant tous ses membres par ρg :

$$\frac{Q^2}{g A_1} + h c_1 A_1 + V \sin \alpha = \frac{Q^2}{g A_2} + h c_2 A_2 \quad (4.4)$$

En se basant sur la figure (4.2), on peut facilement déterminer les expressions de A_1 , A_2 , $h c_1$ et $h c_2$.

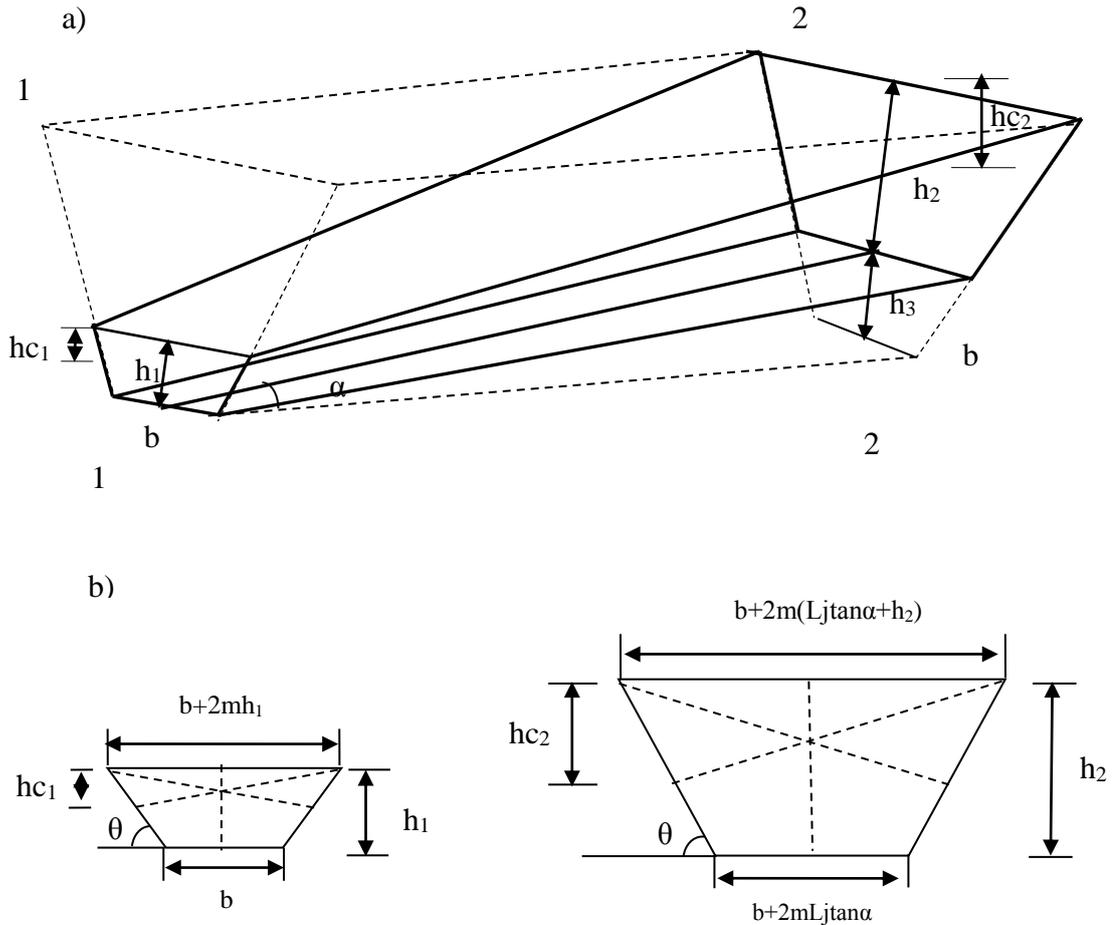


Figure 4.2 : a) Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut.
b) Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut.

La figure 4.2 montre respectivement les sections amont (1-1) et aval (2-2) du ressaut. Le paramètre m est défini comme la cotangente de l'angle θ . Celui-ci est l'angle d'inclinaison des parois du canal trapézoïdale symétrique par rapport à l'horizontal.

On prend en considération que h_1 inférieur à h_3 .

L'aire des sections mouillées A_1, A_2

$$A_1 = bh_1 + mh_1^2 \quad (4.5)$$

$$A_2 = (b + 2mLj \tan \alpha)h_2 + mh_2^2 \quad (4.6)$$

Les hauteurs des centres de gravité hc_1, hc_2 s'écrivent respectivement :

$$hc_1 = \frac{h_1^2}{6} \cdot \frac{3b + 2mh_1}{A_1} \cos \alpha \quad (4.7)$$

$$hc_2 = \frac{h_2^2}{6} \cdot \frac{3(b + 2mLj \tan \alpha) + 2mh_2}{A_2} \cos \alpha \quad (4.8)$$

IV.2.2. Evaluation du volume du ressaut

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

$$V = \left[At - \frac{A_3}{2} - \frac{(At - A_1)}{2} \right] \times Lj \quad (4.9)$$

En tenant compte des relations (4.5) et (4.6) la relation (4.9) devient:

$$V = \left[\frac{(b_1 h_1 + m h_1^2) + (b_1 h_2 + 2m Lj \tan \alpha h_2 + m h_2^2)}{2} \right] \times Lj \quad (4.10)$$

Tels que : $Y = h_2/h_1$ et $M = m h_1/b_1$

$$V = b_1 h_1 \left[\frac{M(2Y \tan \alpha + Y^2 + 1) + Y + 1}{2} \right] \times Lj \quad (4.11)$$

La forme géométrique du volume équivalent V représentative du ressaut hydraulique étudié, n'est pas en réalité prismatique, à cause de la perturbation de la surface libre du ressaut due au rouleau de surface. Pour cela, il est nécessaire de corriger ce volume en le multipliant par un coefficient k .

$$V = k b_1 h_1 \left[\frac{M(2Y \tan \alpha + Y^2 + 1) + Y + 1}{2} \right] \times Lj \quad (4.12)$$

k étant le rapport du volume réel et du volume calculé du ressaut. Ce dernier étant difficile à évaluer théoriquement, nous allons l'estimer par voie expérimentale.

IV.2.3. Nombre de Froude

L'autre caractéristique du ressaut hydraulique qui va nous servir de base à notre étude théorique est le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, calculé à la section initiale 1-1, c'est-à-dire au pied du ressaut. Ce nombre s'exprime en règle générale, pour un canal horizontal, par la relation (4.13) :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{g A_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial h_1} \quad (4.13)$$

La relation (4.13) montre que le nombre de Froude F_1 est une fonction de quatre paramètres tels que :

- Q représente le débit volume de l'écoulement;
- g est l'accélération de la pesanteur;
- A_1 est l'aire de la section transversale mouillée au pied de ressaut;
- $\frac{\partial A_1}{\partial h_1}$ représente la dérivée partielle de l'aire de la section mouillée A_1 au pied du ressaut par apport à la hauteur h_1 . Pour notre cas, il s'agit d'une section trapézoïdale et par conséquent: $\frac{\partial A_1}{\partial h_1} = (b_1 + 2mh_1)$.

Cette considération mène à écrire la relation (4.13) telle que :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b_1 + 2mh_1)}{g(b_1h_1 + mh_1^2)^3} \quad (4.14)$$

En tenant compte des relations (4.5) à (4.8), (4.12), (4.13) et (4.14), la relation (4.4) devient :

$$\frac{Q^2}{g(b_1h_1 + mh_1^2)} + \frac{h_1^2 \cos \alpha}{6} (3b_1 + 2mh_1) + \frac{1}{2} K b_1 h_1 L_j [(Y+1) + M(2Y\lambda \tan \alpha + Y^2 + 1)] \sin \alpha =$$

$$\frac{Q^2}{g(b_1 + 2mL_j \tan \alpha)h_2 + mh_2^2)} + \frac{h_2^2 \cos \alpha}{6} (3(b_1 + 2mL_j \tan \alpha) + 2mh_2) \quad (4.15)$$

En multipliant la relation (4.15) par $\left(\frac{b_1 + 2mh_1}{(b_1h_1 + mh_1^2)^2} \right)$ on obtient :

$$F_1^2 + \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \cos \alpha + \frac{1+2M}{2(1+M)^2} K \frac{L_j}{h_1} ((Y+1) + M(2Y\lambda \tan \alpha + Y^2 + 1)) \sin \alpha =$$

$$F_1^2 \left(\frac{1+M}{Y(1+2M\lambda \tan \alpha + MY)} \right) + \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left(Y^2 \left(1 + 2M\lambda \tan \alpha + \frac{2MY}{3} \right) \right) \cos \alpha \quad (4.16)$$

En remplaçant le rapport $\frac{L_j}{h_1}$ par le coefficient λ , la relation (4.16) devient :

$$F_1^2 + \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \cos \alpha + \frac{1+2M}{2(1+M)^2} K \lambda ((Y+1) + M(2Y\lambda \tan \alpha + Y^2 + 1)) \sin \alpha =$$

$$F_1^2 \left(\frac{1+M}{Y(1+2M\lambda \tan \alpha + MY)} \right) + \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left(Y^2 \left(1 + 2M\lambda \tan \alpha + \frac{2MY}{3} \right) \right) \cos \alpha \quad (4.17)$$

L'application de l'équation de la quantité de mouvement entre deux sections délimitants un ressaut hydraulique à pente négative et évoluent dans un canal de section droite trapézoïdale non prismatique mène à écrire la relation (4.17); cette relation montre que ce type de ressaut est régi par :

- le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident à la section amont du ressaut;
- les hauteurs conjuguées h_1 et h_2 respectivement à l'amont et à l'aval du ressaut;
- la pente du canal par rapport à l'horizontale (l'angle α);
- la longueur L_j du ressaut;
- le coefficient de forme M .

Un arrangement de la relation (4.17) permet d'écrire le nombre de Froude sous la forme suivante :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+2M\lambda \tan \alpha + MY)} \right] = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \cos \alpha \left[Y^2 \left(1 + 2M\lambda \tan \alpha + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) - K\lambda \left((Y+1) + M(2Y\lambda \tan \alpha + Y^2 + 1) \right) \tan \alpha \right] \quad (4.18)$$

La relation (4.18) exprime le nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées, de l'angle d'inclinaison α du canal par rapport à l'horizontale, le coefficient de forme $M = mh_1/b_1$ et la longueur relative $\lambda = L_j/h_1$ d'un ressaut hydraulique à pente négative, évoluent dans un canal de section droite trapézoïdale non prismatique.

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

En remplaçant $\alpha=0$ dans la relation (4.18) on obtient :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (4.19)$$

La relation (4.18) mène donc à la relation (4.19) exprimant les caractéristiques du ressaut classique dans un canal trapézoïdale.

Ce résultat nous permet donc de valider notre approche théorique. En outre, afin de déterminer le coefficient de correction k , l'approche proposée sera confrontée par la suite aux résultats expérimentaux.

IV.3. ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'EQUATION SEMI THEORIQUE**IV.3.1. Estimation du coefficient k de correction**

Pour évaluer expérimentalement le coefficient de correction k, la relation (4.18) peut être reformulée comme suit :

$$K = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + 2M\lambda \tan \alpha + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \cos \alpha - F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+2M\lambda \tan \alpha + MY)} \right] \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left[(Y+1) + M(2Y\lambda \tan \alpha + Y^2 + 1) \right] \lambda \sin \alpha \quad (4.20)$$

Le nombre de Froude incident est calculé pour $m=0,312$, selon la relation 4.14 :
Les valeurs du coefficient k obtenues en introduisant les données expérimentales dans l'équation (4.20), sont présentées dans le tableau 4.1 :

Tableau 4.1 : Valeurs du coefficient k selon la relation 4.20

tang (α) = -0,043			tang (α) = -0,062			tang (α) = -0,08		
F ₁	Y	k	F ₁	Y	K	F1	Y	K
3,44	3,52	1,02	4,88	4,84	1,28	7,95	6,65	2,37
3,55	3,61	1,05	4,94	4,97	1,21	8,25	6,78	2,44
3,74	3,72	1,16	5,27	5,08	1,42	8,44	6,91	2,48
3,88	3,78	1,25	5,36	5,10	1,49	8,64	7,03	2,53
3,97	3,96	1,17	5,46	5,14	1,53	8,83	7,24	2,85
4,10	4,03	1,27	5,52	5,31	1,38	10,16	8,42	2,36
4,20	4,06	1,34	5,70	5,21	1,66	10,39	8,62	2,34
4,28	4,29	1,42	6,86	6,17	1,95	11,14	8,80	2,67
4,55	4,45	1,59	9,03	8,61	1,92	11,78	9,17	2,81
4,74	4,60	1,60				12,10	9,54	2,77
4,98	4,87	1,59				12,56	9,72	2,91
5,12	5,02	1,55						
5,19	5,29	1,37						
5,32	5,38	1,42						
5,56	5,51	1,59						
5,66	5,60	1,79						
5,67	5,64	1,57						
5,78	5,72	1,81						
5,86	5,73	1,72						
5,93	6,16	1,50						
6,16	6,39	1,52						
6,38	6,53	1,62						
6,78	6,72	1,85						
7,02	6,99	1,85						
7,45	7,39	1,92						
7,45	7,47	1,87						
7,73	7,75	1,88						
7,90	7,84	1,99						
8,24	8,69	1,59						
8,73	9,12	1,68						

Le tableau 4.1 montre que le coefficient de correction k est sans aucun doute une valeur constante. En éliminant quelques valeurs extrêmes, la moyenne arithmétique de toutes les valeurs de k donne la constante 1,54. L'équation (4.18) devient alors comme suit :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+2M\lambda \tan \alpha + MY)} \right] = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \cos \alpha \left[Y^2 \left(1 + 2M\lambda \tan \alpha + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) - 1,54\lambda \left((Y+1) + M(2Y\lambda \tan \alpha + Y^2 + 1) \right) \tan \alpha \right] \quad (4.21)$$

Afin de vérifier la validité de l'équation semi théorique (4.21), celle-ci est confrontée au nombre de Froude universelle calculé en application de la relation (4.14).

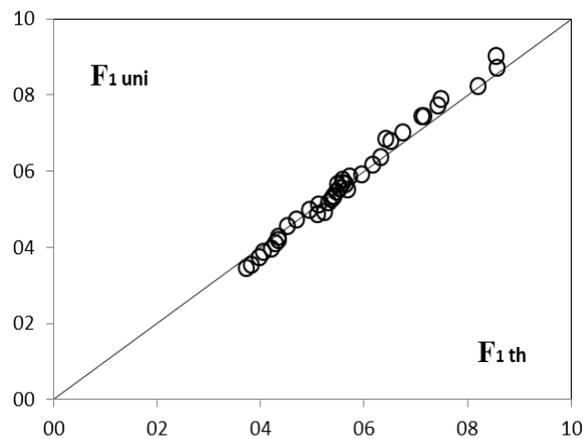


Figure 4.3 : Variation du nombre de Froude F_{1uni} selon la relation universelle en fonction du nombre de Froude théorique F_{1th} calculée selon la relation (4.21).
(—) Première bissectrice.

La figure 4.3 montre que les points obtenus suivent parfaitement la première bissectrice.

Par ailleurs, les écarts relatifs entre les nombres de Froude universel F_{1uni} et les nombres de Froude théorique F_{1th} sont calculés et présentés au tableau 4.2, afin d'examiner la validité de la relation semi théorique (4.21) issue de notre développement théorique. Les valeurs de F_{1uni} sont calculées par la relation (4.14) en se basant sur les données expérimentales du tableau 4.1. Les valeurs de F_{1th} sont calculées par la relation (4.21) en se basant sur ces mêmes données. Le tableau 4.2, montre clairement que les écarts relatifs entre F_{1uni} et F_{1th} sont en leur majorité inférieure à 5%, on peut donc conclure à la fiabilité de la relation proposée (4.21). Cependant, celle-ci étant implicite en Y , nous allons essayer dans ce

qui suit, d'ajuster expérimentalement la relation (4.21), afin de trouver une relation approchée explicite en Y.

Tableau 4.2: Ecart relatifs en (%) entre F_{1uni} universelle et F_{1th} théorique

tang (α) = -0,043			tang (α) = -0,062			tang (α) = -0,080		
F_{1uni}	F_{1th}	$(\Delta F_1/F_1)$ %	F_{1uni}	F_{1th}	$(\Delta F_1/F_1)$ %	F_{1uni}	F_{1th}	$(\Delta F_1/F_1)$ %
3,44	3,73	-8,26	4,88	5,10	-4,47	7,95	6,96	12,43
3,55	3,83	-7,93	4,94	5,23	-5,92	8,25	7,13	13,61
3,74	3,97	-6,22	5,27	5,38	-2,07	8,44	7,25	14,17
3,88	4,06	-4,72	5,36	5,40	-0,90	8,64	7,36	14,85
3,97	4,22	-6,29	5,46	5,47	-0,15	8,83	7,35	16,74
4,10	4,29	-4,51	5,70	5,59	2,05	10,16	8,85	12,86
4,20	4,34	-3,38	5,52	5,68	-2,93	10,39	9,06	12,77
4,28	4,35	-1,60	6,86	6,43	6,32	11,14	9,24	17,00
4,55	4,52	0,66	9,03	8,55	5,39	11,78	9,57	18,75
4,74	4,70	0,89				12,10	9,87	18,41
4,98	4,94	0,69				12,56	10,03	20,17
5,12	5,12	0,10						
5,19	5,32	-2,46						
5,32	5,41	-1,71						
5,66	5,49	3,02						
5,56	5,52	0,69						
5,78	5,59	3,21						
5,67	5,64	0,42						
5,86	5,72	2,38						
5,93	5,96	-0,50						
6,16	6,18	-0,19						
6,38	6,31	1,03						
6,78	6,52	3,79						
7,02	6,75	3,73						
7,45	7,11	4,49						
7,45	7,16	3,92						
7,73	7,42	4,00						
7,90	7,49	5,24						
8,24	8,20	0,55						
8,73	8,58	1,70						

IV.3.2. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle α d'inclinaison du canal

Les figures 4.4 à 4.7 montrent l'ajustement de la relation $Y = a F_1$ pour les quatre inclinaisons du canal.

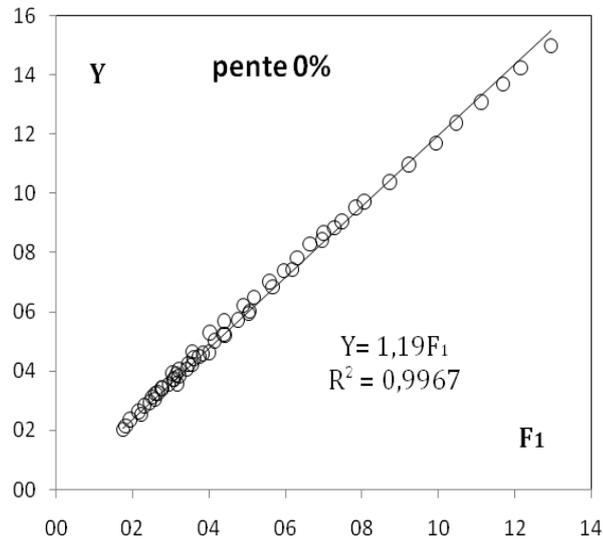


Figure 4.4 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,00$.
(o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.

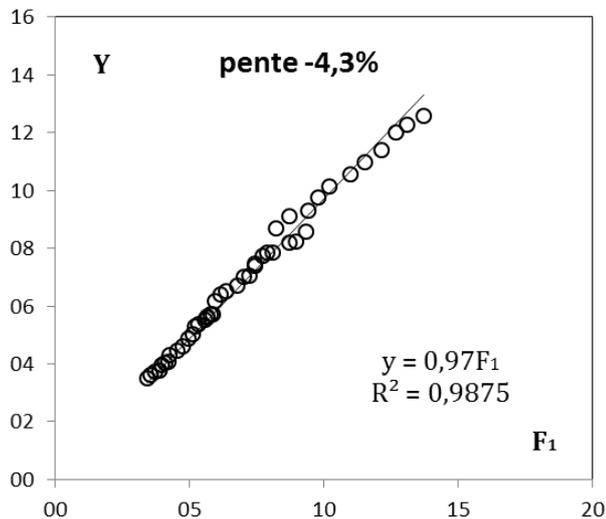


Figure 4.5 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = -0,043$.
(o) points expérimentaux; (—) Courbes d'ajustement.

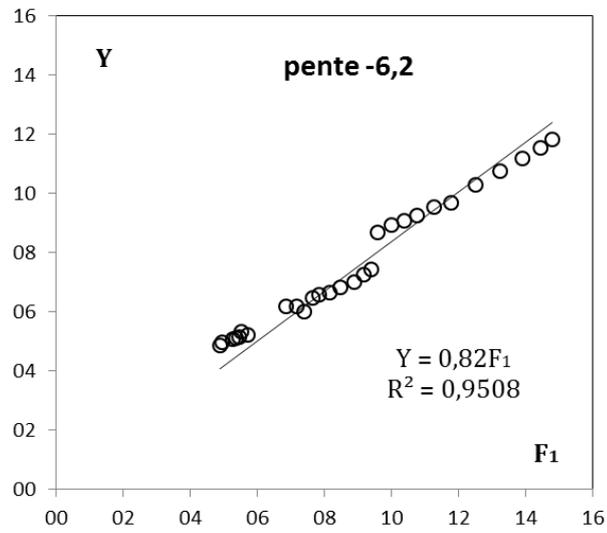


Figure 4.6 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\text{tang}(\alpha) = -0,062$.
(o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.

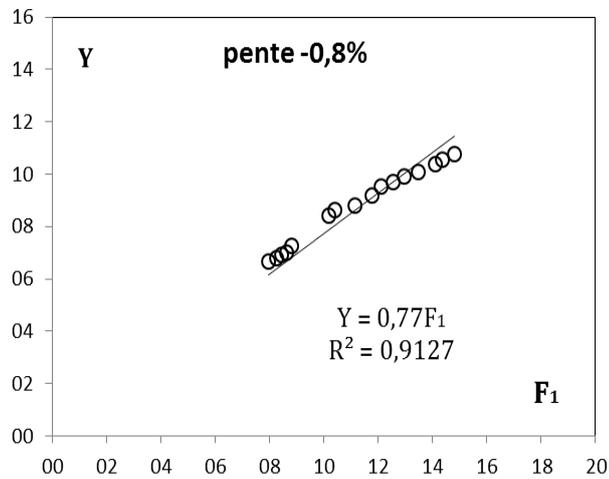


Figure 4.7 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\text{tang}(\alpha) = -0,08$.
(o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.

Les données ayant servi au traçage des figures 4.4 à 4.7 sont groupées au tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1

tang (a) = 0,00		tang (a) = -0,043		tang (a) = -0,062		tang (a) = -0,08	
F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y
1,74	2,03	3,44	3,52	4,88	4,84	7,95	6,65
1,84	2,16	3,55	3,61	4,94	4,97	8,25	6,78
1,95	2,33	3,74	3,72	5,27	5,08	8,44	6,91
2,17	2,62	3,88	3,78	5,36	5,10	8,64	7,03
2,20	2,56	3,97	3,96	5,46	5,14	8,83	7,24
2,30	2,80	4,10	4,03	5,52	5,31	10,16	8,42
2,43	2,92	4,20	4,06	5,70	5,21	10,39	8,62
2,53	3,13	4,28	4,29	6,86	6,17	11,14	8,80
2,56	3,06	4,55	4,45	7,18	6,19	11,78	9,17
2,61	3,25	4,74	4,60	7,39	5,99	12,10	9,54
2,67	3,24	4,98	4,87	7,65	6,45	12,56	9,72
2,74	3,38	5,12	5,02	7,84	6,59	12,95	9,92
2,77	3,40	5,19	5,29	8,18	6,65	13,49	10,07
2,93	3,56	5,32	5,38	8,48	6,82	14,10	10,37
3,05	3,72	5,56	5,51	8,90	6,99	14,38	10,57
3,05	3,90	5,66	5,60	9,18	7,25	14,79	10,77
3,07	3,70	5,67	5,64	9,42	7,44		
3,13	3,86	5,78	5,72	9,59	8,68		
3,15	3,55	5,86	5,73	10,02	8,93		
3,23	4,02	5,93	6,16	10,39	9,08		
3,23	3,85	6,16	6,39	10,76	9,25		
3,41	4,08	6,38	6,53	11,26	9,53		
3,47	4,22	6,78	6,72	11,78	9,68		
3,54	4,23	7,02	6,99	12,50	10,28		
3,55	4,67	7,24	7,04	13,25	10,75		
3,61	4,40	7,45	7,39	13,90	11,18		
3,75	4,50	7,45	7,47	14,45	11,53		
3,83	4,58	7,73	7,75	14,79	11,80		
3,98	4,60	7,90	7,84	15,42	12,08		
4,03	5,27	8,10	7,86	16,57	12,55		
4,14	5,00	8,24	8,69	17,15	12,78		

Tableau 4.3 (suite et fin) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1

tang (a) = 0,00		tang (a) = -0,043		tang (a) = -0,062		tang (a) = -0,08	
F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y
4,39	5,25	8,73	9,12				
4,43	5,20	8,98	8,24				
4,74	5,70	9,34	8,58				
4,87	6,23	9,41	9,29				
5,02	5,95	9,77	9,74				
5,04	6,03	10,20	10,14				
5,15	6,50	11,01	10,57				
5,59	7,00	11,52	10,99				
5,68	6,85	12,16	11,39				
5,94	7,40	12,69	11,99				
6,17	7,45	13,09	12,26				
6,32	7,83	13,71	12,59				
6,65	8,30						
6,94	8,40						
7,02	8,63						
7,28	8,85						
7,48	9,03						
7,85	9,50						
8,07	9,70						
8,73	10,35						
9,23	10,95						
9,93	11,70						
10,46	12,35						
11,13	13,05						
11,67	13,70						
12,17	14,25						
12,93	15,00						

Le tableau 4.4 regroupe les valeurs des paramètres 'a' pour les quatre valeurs de pentes considérées.

Tableau 4.4 : Valeurs des paramètres 'a'

tang (α)	a
0,000	1,19
-0,043	0,97
-0,062	0,82
-0,080	0,77

Le tableau 4.4 montre clairement la diminution progressive des paramètres 'a' avec la pente du canal tang (α).

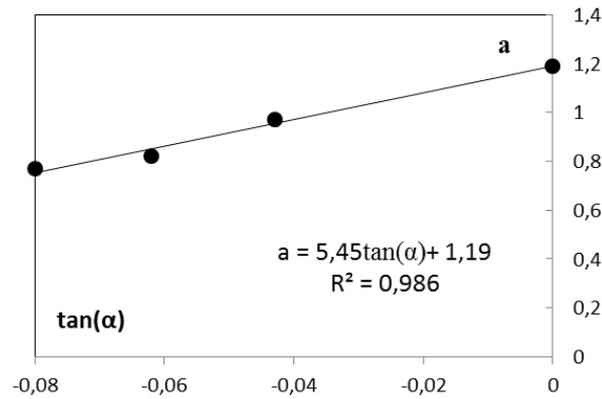


Figure 4.8 : Variation des paramètres 'a' en fonction de $\tan(\alpha)$.

La figure 4.8 montre bien que l'ajustement statistique des couples des valeurs (a , $\tan(\alpha)$) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire selon la relation suivante :

$$a = 5,45 \tan(\alpha) + 1,19 ; \quad R^2 = 0,986 \quad (4.22)$$

En effet, en remplaçant les paramètres 'a' par son expressions dans la relation $Y = a F_1$, l'équation liant les hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ au nombre de Froude théorique F_1 devient:

$$Y = (5,45 \tan(\alpha) + 1,19) F_1 \quad (4.23)$$

La figure 4.9 montre que les points obtenus suivent parfaitement la première bissectrice.

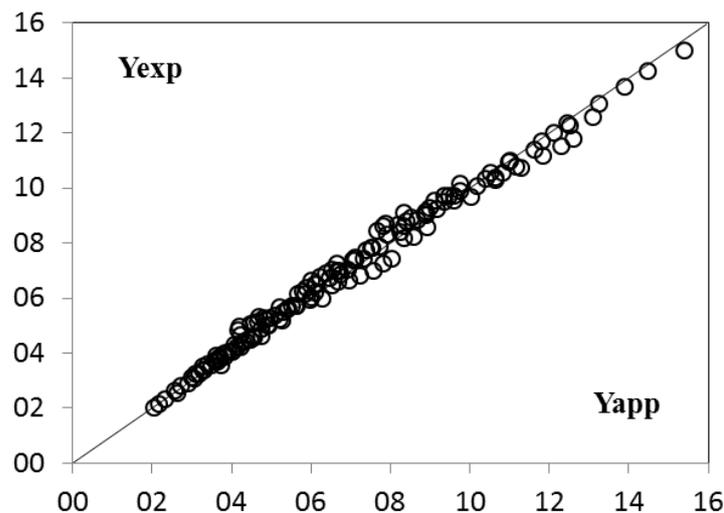


Figure 4.9 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction
Du rapport des hauteurs conjuguées théorique Y_{th} calculée selon la relation (4.23).
(—) Première bissectrice.

La relation approchée (4.23) étant explicite en Y_{th} , nous fournit un moyen simple et pratique pour la détermination du rapport Y_{th} des hauteurs conjuguées, connaissant le nombre de Froude incident F_1 et l'angle d'inclinaison α du canal. Cette relation s'applique pour des nombres de Froude F_1 variant entre 1,74 et 14,79.

La figure 4.10 montre les courbes d'ajustements issues de la relation (4.23), selon les points expérimentaux.

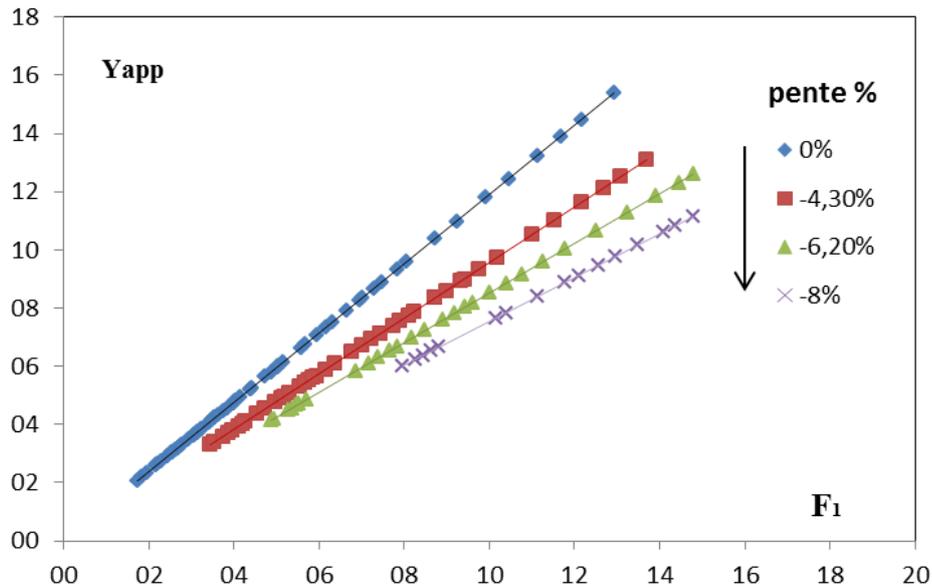


Figure 4.10: Variation théorique de $Y(F_1)$ pour différentes valeurs de $\tan(\alpha)$.
(—) courbe tracé selon la relation (4.23).

La relation approchée (4.23) est donc proposée en remplacement de la relation théorique implicite (4.21). Concernant la précision des calculs, la relation (4.23) occasionne des écarts relatifs inférieurs à 5 % dans leur majorité, par rapport à la relation implicite (4.21). Le tableau 4.5 illustre parfaitement ces constatations. En effet, pour obtenir le rapport des hauteurs conjuguées Y_{ap} issu de la relation approchée 4.23, on a utilisé les couples de valeurs (F_1 , Y) du tableau 4.3.

Tableau 4.5 : Ecarts relatifs entre Y_{th} déterminés par la relation théorique (4.21)
et Y_{ap} calculés par la relation approchée (4.23)

<i>Pente 0%</i>			<i>Pente -4,3%</i>			<i>Pente e- 6,2%</i>			<i>Pente -8%</i>		
Y	Y_{app}	$\Delta Y/Y$ %	Y	Y_{app}	$\Delta Y/Y$ %	Y	Y_{app}	$\Delta Y/Y$ %	Y	Y_{app}	$\Delta Y/Y$ %
2,03	2,07	-1,57	3,52	3,29	6,39	4,84	4,16	14,06	6,65	5,99	9,80
2,16	2,19	-1,26	3,61	3,39	5,94	4,97	4,21	15,24	6,78	6,22	8,30
2,33	2,32	0,67	3,72	3,58	3,78	5,08	4,49	11,60	6,91	6,37	7,90
2,56	2,62	-2,34	3,78	3,71	1,87	5,10	4,56	10,57	7,03	6,52	7,28
2,62	2,58	1,49	3,96	3,79	4,12	5,14	4,66	9,42	7,24	6,66	8,11
2,80	2,73	2,40	4,03	3,92	2,68	5,21	4,86	6,82	8,42	7,66	9,01
2,92	2,90	0,78	4,06	4,01	1,21	5,31	4,70	11,53	8,62	7,83	9,18
3,06	3,05	0,25	4,29	4,09	4,74	5,99	6,30	-5,21	8,80	8,40	4,60
3,13	3,02	3,74	4,45	4,35	2,13	6,17	5,84	5,24	9,17	8,88	3,18
3,24	3,17	2,01	4,60	4,53	1,43	6,19	6,11	1,19	9,54	9,12	4,42
3,25	3,10	4,47	4,87	4,76	2,33	6,45	6,52	-1,02	9,72	9,47	2,58
3,38	3,26	3,54	5,02	4,89	2,50	6,59	6,68	-1,38	9,92	9,77	1,52
3,40	3,30	3,02	5,29	4,96	6,07	6,65	6,97	-4,70	10,07	10,17	-1,04
3,55	3,75	-5,59	5,38	5,08	5,61	6,82	7,23	-5,96	10,37	10,63	-2,57
3,56	3,48	2,11	5,51	5,32	3,47	6,99	7,58	-8,52	10,57	10,84	-2,59
3,70	3,66	1,17	5,60	5,41	3,41	7,25	7,82	-7,85	10,77	11,15	-3,60
3,72	3,63	2,50	5,64	5,42	4,05	7,44	8,02	-7,91			
3,85	3,84	0,24	5,72	5,52	3,47	8,68	8,17	5,86			
3,86	3,72	3,59	5,73	5,60	2,29	8,93	8,54	4,44			
3,90	3,63	6,91	6,16	5,67	7,99	9,08	8,85	2,56			
4,02	3,84	4,46	6,39	5,89	7,82	9,25	9,17	0,91			
4,08	4,06	0,38	6,53	6,10	6,60	9,53	9,60	-0,69			
4,22	4,13	2,10	6,72	6,48	3,58	9,68	10,03	-3,64			
4,23	4,22	0,22	6,99	6,70	4,13	10,28	10,66	-3,65			
4,40	4,30	2,25	7,04	6,92	1,66	10,75	11,29	-4,97			
4,50	4,46	0,85	7,39	7,12	3,67	11,18	11,84	-5,94			
4,58	4,55	0,46	7,47	7,12	4,62	11,53	12,31	-6,78			
4,60	4,74	-3,05	7,75	7,39	4,67	11,80	12,60	-6,80			
4,67	4,22	9,51	7,84	7,55	3,72						
5,00	4,92	1,56	7,86	7,74	1,50						
5,20	5,27	-1,33	8,18	8,33	-1,92						
5,25	5,22	0,56	8,24	8,59	-4,16						
5,27	4,80	8,90	8,58	8,92	-4,06						
5,67	5,22	7,90	8,69	7,88	9,38						

Tableau 4.5(suite et fin) : Ecart relatifs entre Y_{th} déterminés par la relation théorique (4.21) et Y_{ap} calculés par la relation approchée (4.23)

<i>Pente 0%</i>			<i>Pente -4,3%</i>			<i>Pente -6,2%</i>			<i>Pente -8%</i>		
Y	Y_{app}	$\Delta Y/Y$ %	Y	Y_{app}	$\Delta Y/Y$ %	Y	Y_{app}	$\Delta Y/Y$ %	Y	Y_{app}	$\Delta Y/Y$ %
5,70	5,63	1,14	9,12	8,34	8,51						
5,95	5,97	-0,33	9,29	9,00	3,19						
6,03	6,00	0,37	9,74	9,34	4,11						
6,23	5,80	6,94	10,14	9,75	3,86						
6,50	6,13	5,65	10,57	10,52	0,41						
6,85	6,76	1,36	10,99	11,01	-0,16						
7,00	6,65	5,04	11,39	11,62	-2,07						
7,40	7,06	4,53	11,99	12,13	-1,15						
7,45	7,34	1,50	12,26	12,51	-1,99						
7,83	7,52	3,98	12,59	13,10	-4,06						
8,30	7,92	4,60									
8,40	8,26	1,62									
8,63	8,35	3,28									
8,85	8,67	2,07									
9,03	8,90	1,44									
9,50	9,34	1,66									
9,70	9,60	1,04									
10,35	10,39	-0,41									
10,95	10,99	-0,34									
11,70	11,81	-0,97									
12,35	12,44	-0,75									
13,05	13,25	-1,52									
13,70	13,89	-1,39									
14,25	14,48	-1,60									
15,00	15,38	-2,56									

IV.4. CONCLUSION

Nous avons abordé dans ce chapitre une analyse théorique et une analyse expérimentale de l'équation semi théorique.

Pour l'étude théorique nous avons exposé un développement théorique visant à exprimer la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, \lambda, M, \alpha) = 0$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale non prismatique à pente négative variable.

Permettant à établir une relation semi théorique. Ceci a été rendu possible par application de l'équation de quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut hydraulique. Pour $\alpha=0$, la relation théorique (4.18) obtenue conduit à la relation (4.19) du ressaut

hydraulique classique évoluant dans un canal trapézoïdale. Cette dernière considération confirme en quelque sorte la validité du développement théorique entreprise.

Pour l'analyse expérimentale les mesures obtenues ont permis d'estimer le coefficient de correction k , donné comme étant le rapport du volume réel et du volume calculé du ressaut. En effet, une valeur moyenne constante $k=1,54$ a été trouvée, pour les quatre (04) pentes étudiées. Les écarts relatifs entre le nombre de Froude théorique et son homologue expérimental étant en leurs majorités inférieures à 5%, permettent de conclure à la fiabilité de la relation (4.21). En outre, la relation générale (4.21) se présente sous une forme implicite vis à vis du rapport Y des hauteurs conjuguées et son application nécessite par conséquent l'utilisation d'un procédé itératif. Cette considération nous a conduit à proposer de remplacer la relation (4.21) par une relation approchée explicite (4.23), permettant la détermination aisée du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal. La relation approchée (4.23) a été comparée également avec la relation théorique (4.21). Il ressort que la relation (4.23) occasionne des écarts relatifs inférieurs à 5 % dans leur majorité, par rapport à la relation implicite (4.21).

Chapitre V

**ÉTUDE EXPERIMENTALE DU
RESSAUT HYDRAULIQUE EN
CANAL TRAPÉZOÏDAL À PENTE
NÉGATIVE**

V.1 INTRODUCTION

Dans ce présent chapitre nous allons aborder la description des essais effectués. Nous décrirons en premier lieu le protocole expérimental, constitué du canal trapézoïdal, des appareils et instruments utilisés pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique. En second lieu, nous passerons à la procédure expérimentale suivie durant les essais. Nous exposerons en fin les résultats obtenus.

V.2. DESCRIPTION DU MODELE

V.2.1. Description du canal

Le canal de mesures (figures 5.1 et photo 5.1) qui a servi de banc d'essai est de section trapézoïdale, il est constitué essentiellement par une structure métallique rigide, sur laquelle est fixé latéralement, des deux cotés une série de 6 panneaux transparents en plexiglas permettant les prises de vues et observations. Ces panneaux sont reliés entre eux par collage au silicone. L'étanchéité est assurée par des joints en caoutchouc et par le silicone. Une série de contre pentes en plexiglas est utilisé pour permettre la variation de la pente.

Le banc d'essais est constitué d'un grand canal rectangulaire dans lequel est inséré un canal de mesure de section trapézoïdale, caractérisé par une largeur de base 20cm, une longueur 6m et un angle d'inclinaison des parois latérales de $72,68^\circ$; Celui-ci est relié à un bassin d'accumulation par le moyen d'une conduite circulaire de 115 mm de diamètre. Il est relié à une boîte métallique fermée (photo 5.2), sur laquelle est insérée une ouverture en tôle de section trapézoïdale (photo 5.3) débouchant dans le canal. Le rôle de ce dernier est de générer un écoulement incident à grande vitesse. La section de sortie de celle-ci est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale h_1 du ressaut. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée deux pompes axiales reliées en parallèles (photo 5.5) débitant jusqu'à 40 l/s chacune.

Le réglage des débits volumes s'effectue par manipulation de la vanne et sont mesurés à l'aide d'un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale (photo 5.6), situé dans la partie aval du canal de mesure, dans un second canal de section droite rectangulaire.

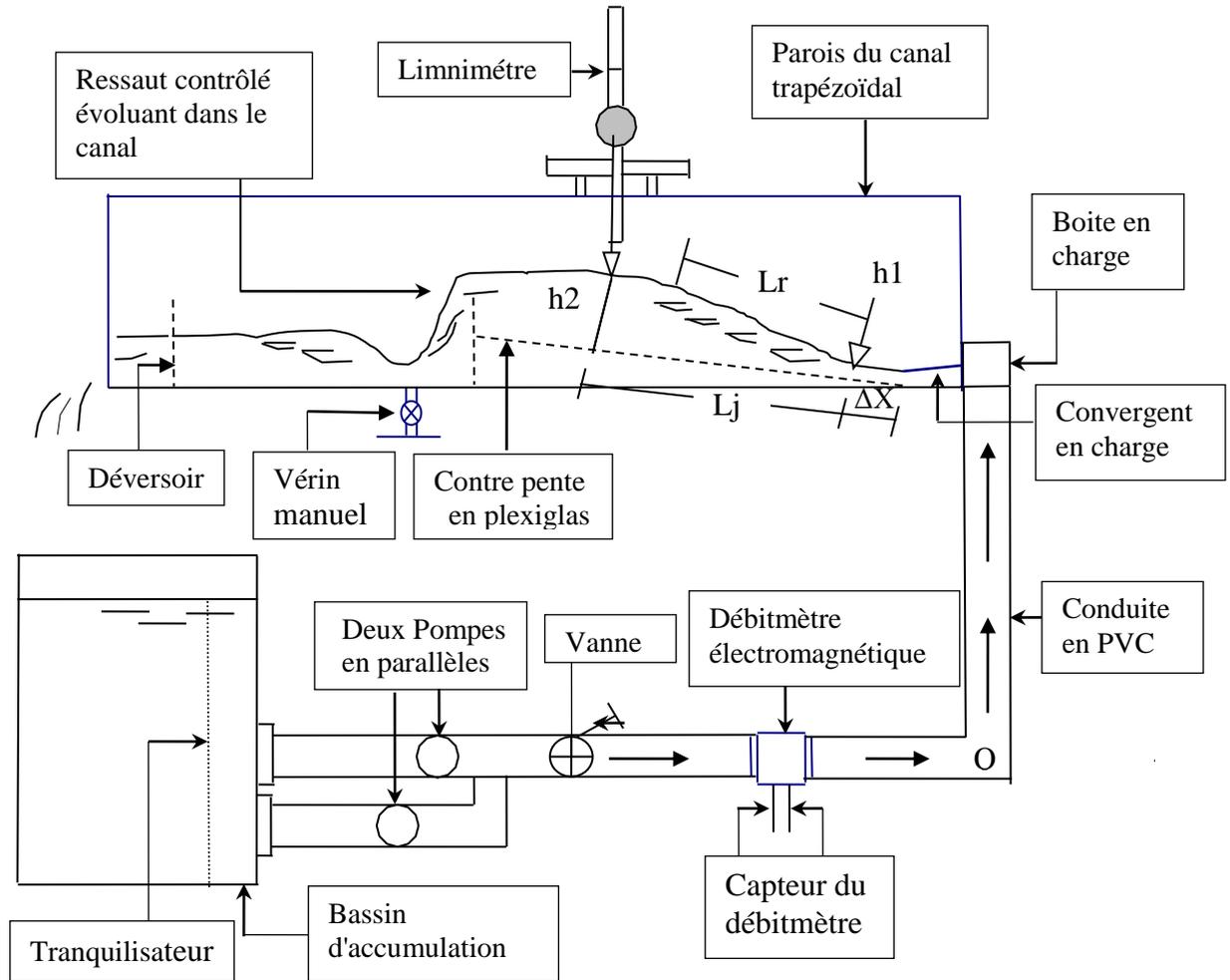


Figure 5.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section trapézoïdale, ayant servi à l'expérimentation.



Photo 5.1 : Photographie du canal de mesure utilisé.



Photo 5.2 : Photographie de la boîte en charge.



Photo 5.3 : Photographie d'une série de convergent



a



b



c



d

Photo 5.4: (a,b,c,d) Photographies des contres pontes.



Photo 5.5 : Photographie des Pompes centrifuges (en disposées parallèles).



Photo 5.6: Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure directe du débit.



Photo 5.7 : Photographie de la série de seuil.

V.2.2. Appareillages de mesure**V.2.2.1. Mesure de débit**

Comme il a été cité précédemment, le canal de mesure de section trapézoïdale non prismatique a contre pente est relié dans sa partie avale à un seconde canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale réalisé et testé par Hachemi Rachdi(2005), permettant la mesure directe du débit.

En effet, lors du passage d'un écoulement à débit Q à travers les deux parois du débitmètre, la hauteur h de la lame d'eau traversant le déversoir rectangulaire est obtenue par la lecture sur un limnimétrie placé au-dessus de l'ouverture du déversoir. Ainsi, le débit volume est obtenu en insérant la hauteur h dans l'équation (5.1) du déversoir.

$$Q=0,3794B\sqrt{2g} \beta(1+0,16496 \beta^{2,0712})^{(3/2)} h^{(3/2)} \quad (5.1)$$

Avec : $\beta = b/B$

Q : Le débit en (m^3/s)

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

g : L'accélération de la pesanteur (m^3/s) ;

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

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

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

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

d'où l'expression du débit volume :

$$Q=0.3745h^{3/2} \quad (5.2)$$

V.2.2.2. limnimétre

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à la hauteur due à la section de la sorte du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été évaluées par un limnimétre (figure 5.2).

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

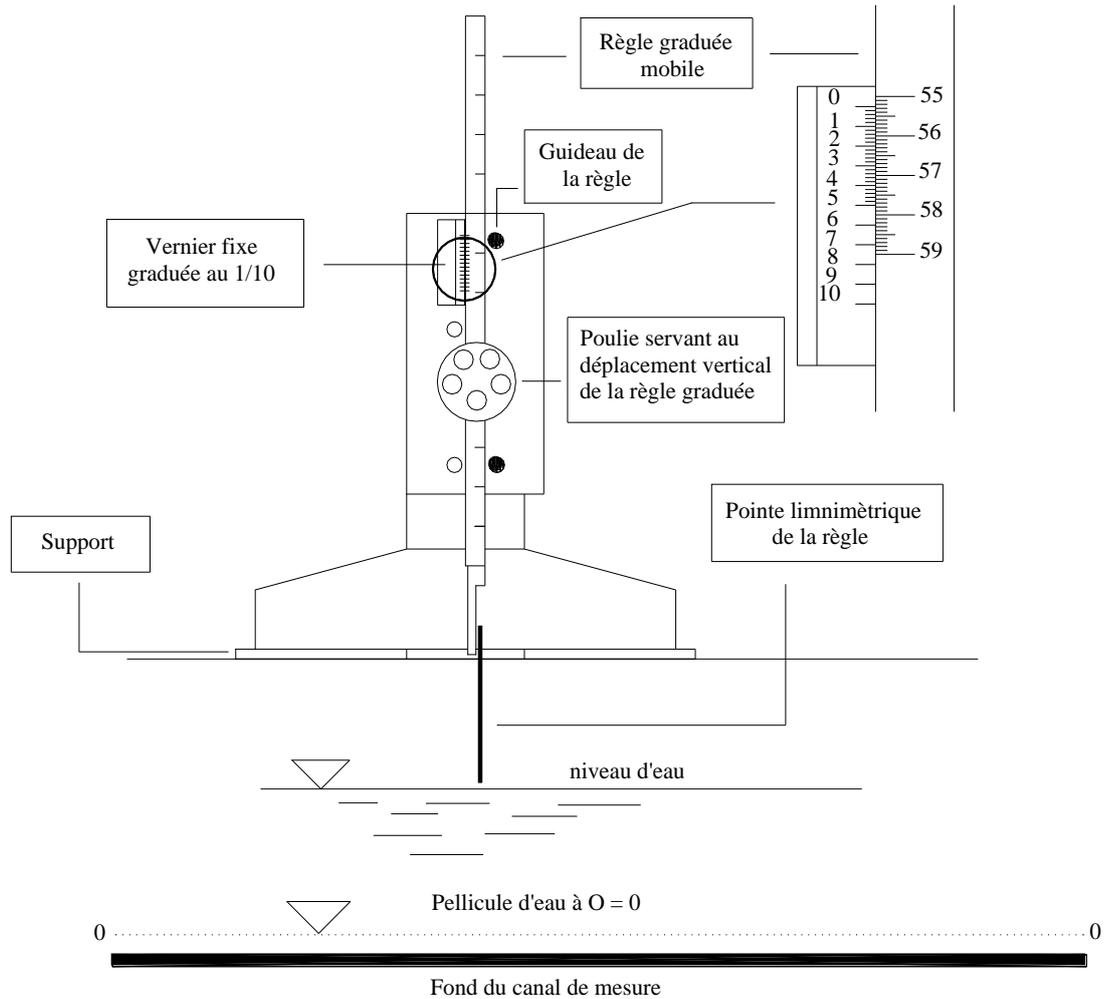


Figure 5.2 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.

V.3. DESCRIPTION DES ESSAIS

V.3.1. Procédure expérimentale

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal non prismatique à pente négative. Les caractéristiques étudiées sont: le débit volume Q , la hauteur initiale h_1 , mesurée au pied de ressaut, la hauteur finale h_2 , mesurée au droit de la longueur du rouleau, la hauteur s du seuil, l'angle d'inclinaison α du contre pente par rapport à l'horizontale, la longueur L_r du rouleau, mesurée à la fin de la formation du ressaut et la longueur L_j du ressaut, mesurée dans le même endroit de la hauteur finale h_2 .

Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut, la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil, la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut, et le coefficient de forme du canal $M = mh_1/b_1$.

L'expérimentation a été menée sous quatre hauteurs initiales : h_1 (mm) = 20 ; 30 ; 40 et 50 mm.

Pour chaque hauteur h_1 choisie, on superpose des contres pentes (photo 5.4) avec les angles d'inclinaisons correspondant chacune a une valeur bien déterminée de la pente négative, de sorte que la tangente de l'angle d'inclinaison α par rapport à l'horizontale, prend les valeurs suivantes (en %) : 0 ; -4,3 ; -6,4 et -8. Une gamme assez pratique de nombres de Froude incident a été ainsi obtenue:

$$3 < F_1 < 17.$$

Des seuils de différentes hauteurs 's'ont été testés (photo 5.7), afin d'observer leur influence sur le contrôle du ressaut ; dix-neuf seuils ont ainsi été confectionnés, dont la hauteur s varie entre 01cm et 18 cm.

Pour une hauteur h_1 et pour une hauteur s et une position x du seuil de l'écoulement incident, l'augmentation du débit volume Q , provoque l'apparition d'un ressaut.

L'accroissement de F_1 entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval ainsi l'augmentation de sa longueur du rouleau L_r et du ressaut L_j . La distance Δx sur laquelle le ressaut s'étend augmente également et pour ramener le pied de celui-ci dans sa position initiale, c'est à dire à environ 5 cm de la sortie du convergent, la hauteur s du seuil situé à l'extrémité aval du canal doit être augmenté. Ainsi à chaque valeur du nombre de Froude F_1 correspondent une valeur de la longueur L_j du ressaut et une valeur de la hauteur s du seuil.

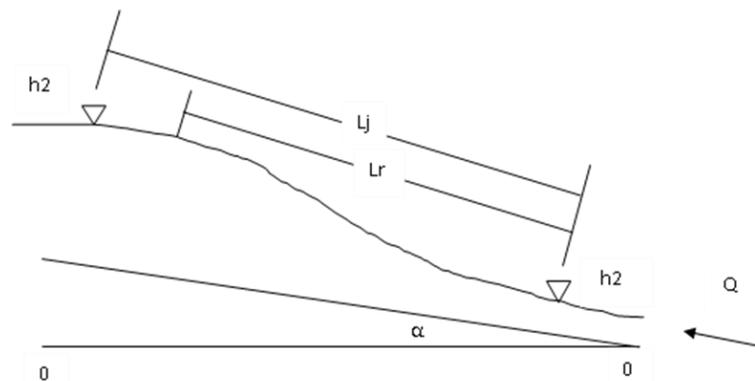


Figure 5.3 : Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal à pente négative.

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

1. Mesure de l'angle d'inclinaison α par rapport à l'horizontal ;
2. Mesure de la longueur L_r du rouleau ;
3. Mesure de la longueur L_j du ressaut ;

4. Mesure de la hauteur géométrique s du seuil ;
5. Mesure de la hauteur conjuguée aval h_2 du ressaut ;
6. Mesure du débit volume ;
7. Calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par application de la

$$\text{relation : } F_1 = \sqrt{\frac{Q^2 [b(1+2M)]}{g [bh_1(1+M)]^3}};$$

V.4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

V.4.1. Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

Les figures (5.4) à (5.13) montrent la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 , pour quatre angles d'inclinaison α distincts, tels que :
 $\tan(\alpha) = 0,00$; $-0,043$; $-0,062$; $-0,08$.

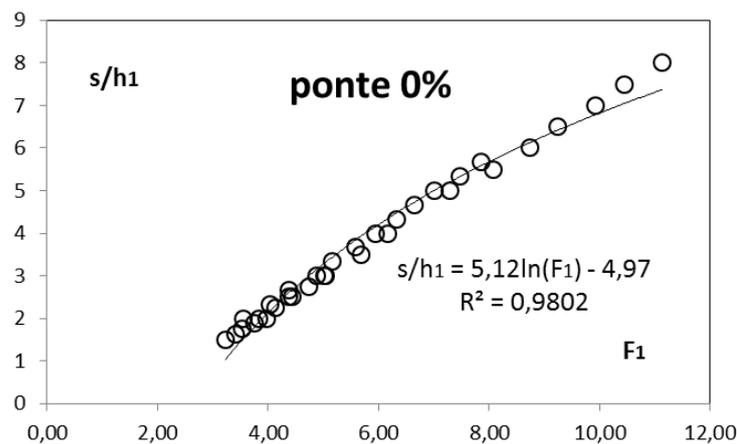


Figure 5. 4 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour $0,031 \leq M \leq 0,078$, pour $\tan(\alpha) = 0,00$. (○) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.

selon la figure (5.4) , l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type logarithmique de la forme $S = a \ln(F_1) + b$.

$$S = 5,12 \ln(F_1) - 4,97 \quad R^2 = 0,98 \quad (5.3)$$

$$\text{Avec } 3,23 < F_1 < 11,13 \quad ; \quad 0,031 < M < 0,078$$

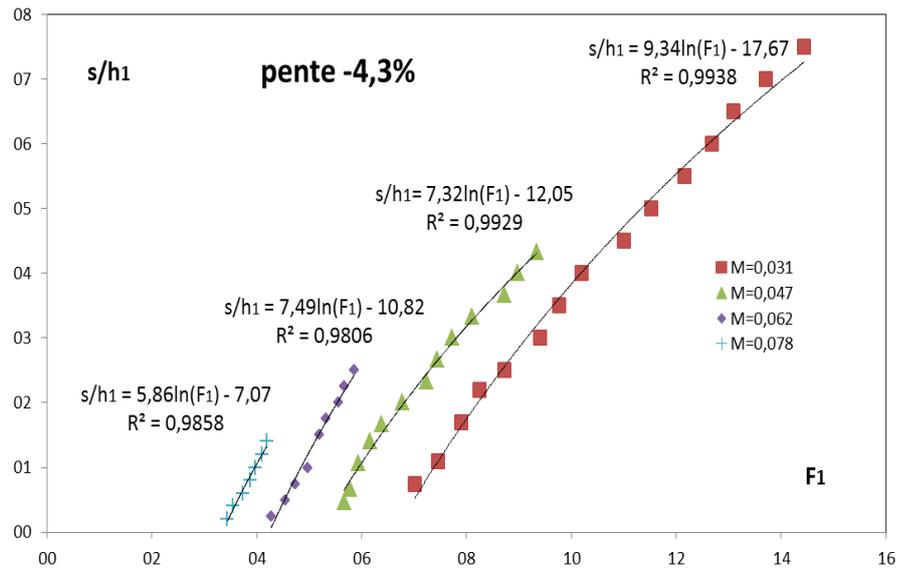


Figure 5.5 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour $\tan(\alpha) = -0,043$. (■; ▲; ◆; +) points expérimentaux ; (—) Courbes d’ajustement.

selon la figure (5.5), l’ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l’écoulement incident suit une loi de type logarithmique de la forme $S=a \ln(F_1)+b$.

Le tableau 5.1 représente les paramètres a et b pour la pente -0,043.

Tableau (5.1) : Valeurs des paramètres a et b

M	a	b
0,031	9,34	-17,67
0,047	7,32	-12,05
0,062	7,49	-10,82
0,078	5,86	-7,07

Les figures (5.6) et (5.7) montre que les paramètres a et b sont fonction de M et suivent les relations suivantes :

$$a = -66,15M + 11,11 \tag{5.4}$$

$$b = 212,27M - 23,47 \tag{5.5}$$

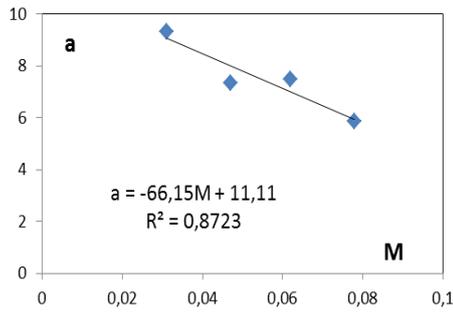


Figure (5.6) : Variation du paramètre *a* en fonction de *M*

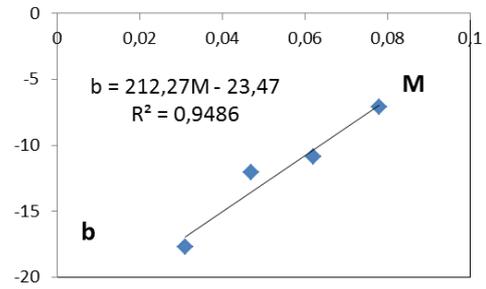


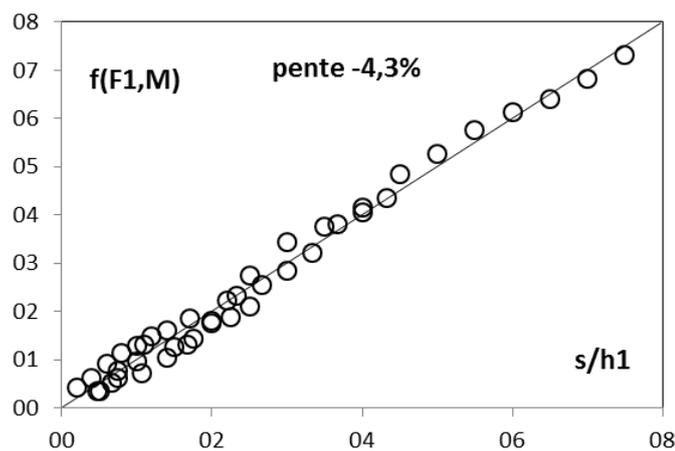
Figure (5.7) : Variation du paramètre *b* en fonction de *M*

En remplaçant les paramètres *a* et *b* par leurs expressions respectives on obtient la relation suivant :

$$S = [-66,15M + 11,11] \ln(F_1) + [212,27M - 23,45] \quad (5.6)$$

$$\text{Avec } 3,44 < F_1 < 14,45 ; \quad 0,031 < M < 0,078$$

La figure (5.8) confirme que la relation (5.6) ajuste bien les points de mesures issues de la variation de la hauteur relative *S* du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 et de *M*.



Fig(5.8) : Variation de la relation $f(F_1, M)$ en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil pour la pente -4,3%. (o) points expérimentaux. (-) première bissectrice d'équation : $f(F_1, M) = s/h_1$

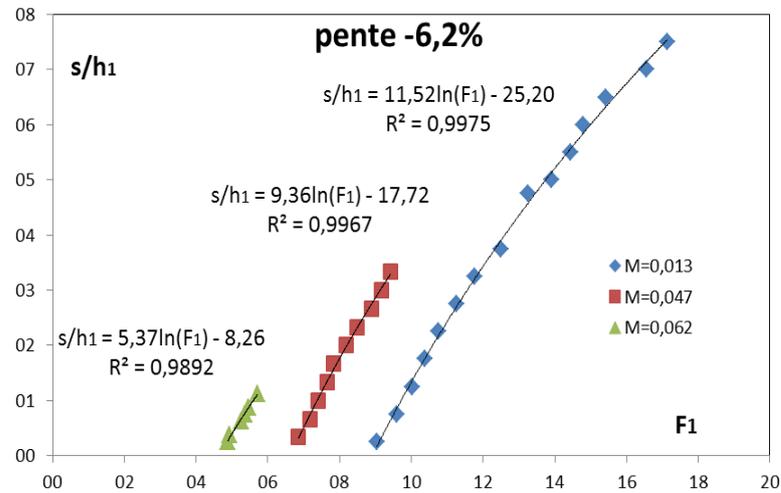


Figure 5. 9 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour $\tan(\alpha) = -0,062$. (\blacktriangle ; \blacksquare ; \blacklozenge) points expérimentaux ; (—) Courbes d’ajustement.

selon la figure (5.9), l’ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l’écoulement incident suit une loi de type logarithmique de la forme $S=a \ln(F_1)+b$.

Le tableau 5.2 représente les paramètres a et b pour la pente $-0,062$.

Tableau (5.2) : Valeurs des paramètres a et b

M	a	b
0,031	11,52	-25,20
0,047	9,36	-17,72
0,062	5,37	-8,26

Les figures (5.10) et (5.11) montrent que les paramètres a et b sont fonction de M et suivent les relations suivantes :

$$a = -197,52M + 17,97 \quad (5.7)$$

$$b = 545,49M - 42,51 \quad (5.8)$$

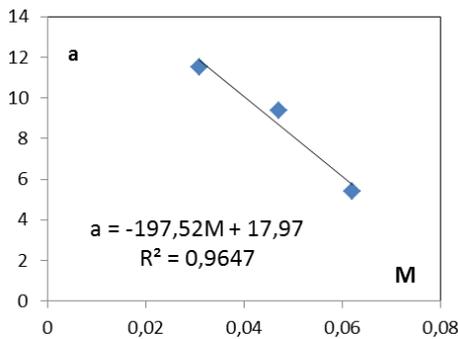


Figure (5.10) : variation du paramètre a en fonction de M

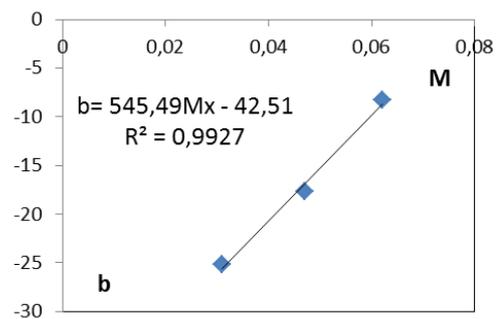


Figure (5.11) : variation du paramètre b en fonction de M

En remplaçant les paramètres a et b par leurs expressions respectives on obtient la relation suivant :

$$S = [-197,52M + 17,97] \text{Ln}(F_1) + [545,49M - 42,51] \tag{5.9}$$

Avec $4,88 < F_1 < 17,15$; $0,031 < M < 0,062$

La figure (5.12) confirme que la relation (5.9) ajuste les points de mesures issues de la variation de la hauteur relative S du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 et de M.

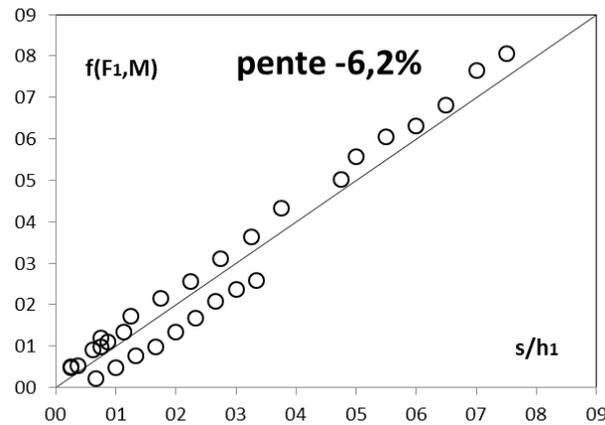


Figure 5.12 : Variation de la relation $f(F_1, M)$ en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil pour la pente -6,2%. (o) points expérimentaux. (-) première bissectrice d'équation : $f(F_1, M) = s/h_1$

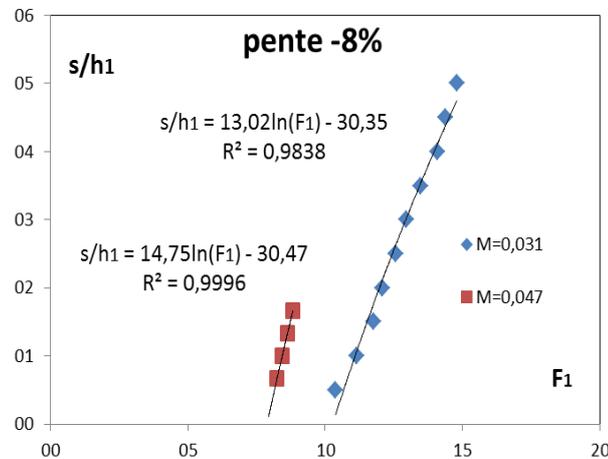


Figure 5. 13: Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour $\text{tang}(\alpha) = -0,08$. (■; ◆) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.

Selon la figure (5.13), l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type logarithmique de la forme $S = a \text{Ln}(F_1) + b$.

Le tableau 5.3 représente les paramètres a et b pour la pente -0,08.

Tableau (5.3) : Valeurs des paramètres a et b

M	A	b
0,031	13,02	-30,35
0,047	14,75	-30,47

Les figures (5.14) (5.15) montrent que les paramètres a et b sont fonction de M et suivent les relations suivantes :

$$a=108,18M+9,67 \quad (5.10)$$

$$b=-7,5M-30,12 \quad (5.11)$$

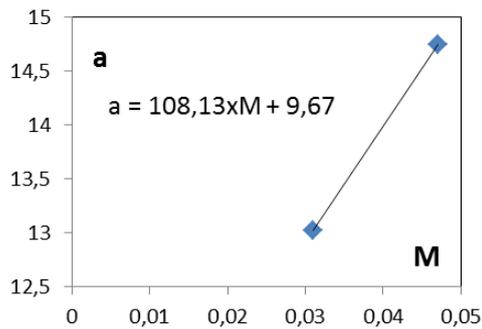


Figure (5.14) : Variation du paramètre a en fonction de M

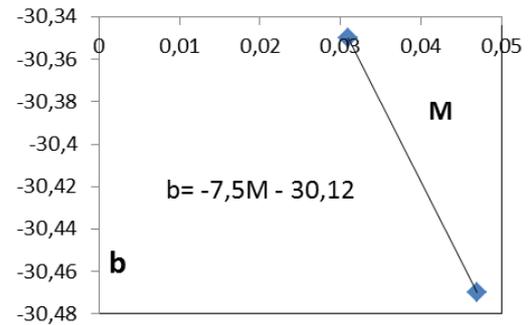


Figure (5.15) : Variation du paramètre b en fonction de M

En remplaçant les paramètres a et b par leurs expressions respectives on obtient la relation suivant :

$$s/h_1=[108,13M+9,67]Ln(F_1)+[-7,5M-30,12] \quad (5.12)$$

Avec $7,95 < F_1 < 14,79$; $0,031 < M < 0,047$

Tableau 5.4: Mesures expérimentales ayant servi au traçage des figures

<i>Tang(α)=0,00</i>		<i>Tang(α)=-0,043</i>				<i>Tang(α)=-0,062</i>				<i>Tang(α)=-0,080</i>			
<i>F1</i>	<i>s/h1</i>	<i>F1</i>	<i>s/h1</i>	<i>f(F1,M)</i>	<i>M</i>	<i>F1</i>	<i>s/h1</i>	<i>f(F1,M)</i>	<i>M</i>	<i>F1</i>	<i>s/h1</i>	<i>f(F1,M)</i>	<i>M</i>
3,23	1,50	7,02	0,75	0,77	0,013	9,03	0,25	0,49	0,013	10,16	10,16	10,16	0,013
3,41	1,63	7,45	1,10	1,32	0,013	9,59	0,75	1,20	0,013	10,39	10,39	10,39	0,013
3,54	1,75	7,90	1,70	1,84	0,013	10,02	1,25	1,72	0,013	11,14	11,14	11,14	0,013
3,55	2,00	8,24	2,20	2,23	0,013	10,39	1,75	2,14	0,013	11,78	11,78	11,78	0,013
3,75	1,88	8,73	2,50	2,74	0,013	10,76	2,25	2,56	0,013	12,10	12,10	12,10	0,013
3,83	2,00	9,41	3,00	3,43	0,013	11,26	2,75	3,10	0,013	12,56	12,56	12,56	0,013
3,98	2,00	9,77	3,50	3,77	0,013	11,78	3,25	3,63	0,013	12,95	12,95	12,95	0,013
4,03	2,33	10,20	4,00	4,16	0,013	12,50	3,75	4,34	0,013	13,49	13,49	13,49	0,013
4,14	2,25	11,01	4,50	4,85	0,013	13,25	4,75	5,02	0,013	14,10	14,10	14,10	0,013
4,39	2,67	11,52	5,00	5,25	0,013	13,90	5,00	5,58	0,013	14,38	14,38	14,38	0,013
4,39	2,50	12,16	5,50	5,75	0,013	14,45	5,50	6,04	0,013	14,79	14,79	14,79	0,013
4,43	2,50	12,69	6,00	6,13	0,013	14,79	6,00	6,32	0,013				
4,74	2,75	13,09	6,50	6,41	0,013	15,42	6,50	6,81	0,013	7,95	7,95	7,95	0,047
4,87	3,00	13,71	7,00	6,83	0,013	16,57	7,00	7,66	0,013	8,25	8,25	8,25	0,047
5,02	3,00	14,45	7,50	7,30	0,013	17,15	7,50	8,07	0,013	8,44	8,44	8,44	0,047
5,04	3,00									8,64	8,64	8,64	0,047
5,15	3,33	5,66	0,47	0,35	0,047	7,18	0,67	0,21	0,047	8,83	8,83	8,83	0,047
5,59	3,67	5,78	0,67	0,51	0,047	7,39	1,00	0,47	0,047				
5,68	3,50	5,93	1,07	0,72	0,047	7,65	1,33	0,77	0,047				
5,94	4,00	6,16	1,40	1,03	0,047	7,84	1,67	0,98	0,047				
6,17	4,00	6,38	1,67	1,31	0,047	8,18	2,00	1,35	0,047				
6,32	4,33	6,78	2,00	1,80	0,047	8,48	2,33	1,67	0,047				
6,65	4,67	7,24	2,33	2,32	0,047	8,90	2,67	2,09	0,047				
7,02	5,00	7,45	2,67	2,55	0,047	9,18	3,00	2,36	0,047				
7,28	5,00	7,73	3,00	2,85	0,047	9,42	3,33	2,58	0,047				
7,48	5,33	8,10	3,33	3,22	0,047								
7,85	5,67	8,72	3,67	3,81	0,047	4,88	0,25	0,47	0,062				
8,07	5,50	8,98	4,00	4,05	0,047	4,94	0,38	0,53	0,062				
8,73	6,00	9,34	4,33	4,36	0,047	5,27	0,63	0,90	0,062				
9,23	6,50					5,36	0,75	0,99	0,062				
9,93	7,00	4,55	0,50	0,35	0,062	5,46	0,88	1,10	0,062				
10,46	7,50	4,74	0,75	0,63	0,062	5,70	1,13	1,34	0,062				
11,13	8,00	4,98	1,00	0,97	0,062								
		5,19	1,50	1,27	0,062								
		5,32	1,75	1,43	0,062								
		5,56	2,00	1,75	0,062								
		5,67	2,25	1,88	0,062								
		5,86	2,50	2,11	0,062								
		3,44	0,20	0,43	0,078								
		3,55	0,40	0,61	0,078								
		3,74	0,60	0,93	0,078								
		3,88	0,80	1,14	0,078								
		3,97	1,00	1,28	0,078								
		4,10	1,20	1,48	0,078								
		4,20	1,40	1,61	0,078								

V.4.2. Longueurs caractéristiques du ressaut

V.4.2.1. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

La longueur L_j a été considérée comme étant la distance séparant la section initiale du ressaut et la section finale (où s'effectue la mesure de h_2). L'objectif principal de cette partie de l'étude est de quantifier la longueur relative L_j/h_1 dans la gamme de valeurs testées de la pente du canal.

La figure (5.16) montre la variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

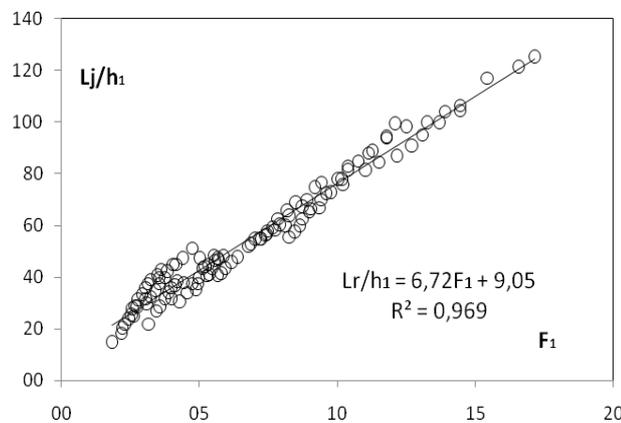


Figure 5.16 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,08$.

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

$$\begin{aligned} L_j/h_1 &= 6,72 F_1 + 9,05 ; & R^2 &= 0,969 & (5.13) \\ \text{Pour } 2,17 < F_1 < 17,5 & & 0,013 &\leq M \leq 0,078 \end{aligned}$$

Tableau 5.5 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure 5.16

<i>Tang(α)=0,00</i>		<i>Tang(α)=-0,043</i>		<i>Tang(α)=-0,062</i>		<i>Tang(α)=-0,080</i>	
<i>F₁</i>	<i>L_j/h₁</i>	<i>F₁</i>	<i>L_j/h₁</i>	<i>F₁</i>	<i>L_j/h₁</i>	<i>F₁</i>	<i>L_j/h₁</i>
1,84	15,00	3,44	27,00	4,88	35,50	8,25	55,67
2,17	18,50	3,55	28,80	4,94	37,50	8,44	57,67
2,20	20,60	3,74	32,00	5,27	40,75	8,64	60,00
2,30	22,00	3,88	34,20	5,36	41,25	10,16	78,00
2,43	24,00	3,97	36,00	5,46	43,50	10,39	83,00
2,53	25,67	4,10	37,00	5,70	47,00	11,14	88,00
2,56	28,00	4,20	38,60	5,52	48,50	11,78	94,50
2,61	25,00	4,28	30,75	6,86	53,00	12,10	99,50
2,67	29,00	4,55	34,00	7,18	55,00	12,56	105,00
2,74	28,83	4,74	37,50	7,39	56,33	12, 95	108,50
2,77	31,60	4,98	40,00	7,65	59,33		
2,93	33,40	5,12	43,75	7,84	62,67		
3,05	36,00	5,19	44,25	8,18	66,00		
3,05	31,67	5,32	45,00	8,48	69,00		
3,07	30,00	5,56	46,50	8,90	70,00		
3,13	37,60	5,66	41, 00	9,03	66,50		
3,15	22,00	5,67	47,50	9,18	75,00		
3,23	39,20	5,78	41,67	9,42	76,67		
3,23	32,50	5,86	48,25	9,59	72,50		
3,41	35,00	5,93	43,67	10,02	78,00		
3,47	41,00	6,16	46,00	10,39	81,50		
3,54	37,50	6,38	48,00	10,76	85,00		
3,55	40,00	6,78	52,00	11,26	89,00		
3,61	43,00	7,02	55,00	11,78	94,00		
3,75	40,00	7,24	55,00	12,50	98,50		
3,83	42,50	7,45	56,67	13,25	100,00		
3,98	32,00	7,45	58,00	13,90	104,00		
4,03	45,00	7,73	58,33	14,45	106,50		
4,14	45,00	7,90	60,50	15,42	117,00		
4,39	47,50	8,10	60,00	16,57	121,50		
4,43	38,00	8,24	64,00	17,15	125,50		
4,74	51,25	8,72	62,67				
5,02	47,50	8,73	67,50				
		8,98	65,33				
		9,34	67,00				
		9,41	70,00				
		9,77	73,00				
		10,20	76,00				
		11,01	81,50				
		11,52	84,50				
		12,16	87,00				
		12,69	91,00				
		13,09	95,00				
		13,71	100,0				
		14,45	104,50				

V.4.2.2. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F_1

La longueur L_r est considérée comme étant la distance séparant la section initiale et la section finale du rouleau de surface.

La figure (5.17) montre la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

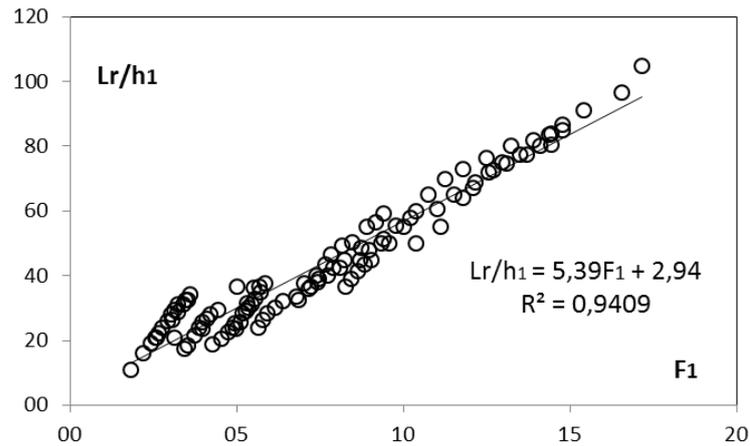


Figure 5. 17 : Variation du longueur relative L_r/h_1 de rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 , De l'écoulement incident, pour $0 \leq \text{tang}(\alpha) \leq -0,08$

La figure (5.17) montre que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident, engendre celle de la longueur relative du rouleau, l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir également à une relation linéaire d'équation :

$$L_r/h_1 = 5,39F_1 + 2,94 \quad R^2 = 0,94 \quad (5.14)$$

$$\text{Pour } 1,84 \leq F_1 \leq 17,15 \quad 0,013 \leq M \leq 0,078$$

Tableau 5.6 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure 5.17

<i>Tang(α)=0,00</i>		<i>Tang(α)=-0,043</i>		<i>Tang(α)=-0,062</i>		<i>Tang(α)=-0,080</i>	
<i>F₁</i>	<i>Lr/h₁</i>	<i>F₁</i>	<i>Lr/h₁</i>	<i>F₁</i>	<i>Lr/h₁</i>	<i>F₁</i>	<i>Lr/h₁</i>
1,84	11,00	3,44	17,40	4,88	24,00	8,25	36,67
2,20	16,00	3,55	18,40	4,94	25,25	8,44	39,00
2,43	19,00	3,74	21,40	5,27	29,00	8,64	41,33
2,56	21,00	3,88	23,80	5,36	30,00	8,83	43,33
2,61	20,75	3,97	25,60	5,46	31,25	10,39	50,00
2,67	22,40	4,10	26,60	5,52	36,25	11,14	55,00
2,77	24,00	4,20	28,20	5,70	34,75	11,78	64,00
2,93	26,00	4,28	18,75	6,86	32,67	12,10	67,00
3,05	28,00	4,55	20,50	7,18	36,00	12,56	72,00
3,07	26,25	4,74	22,50	7,39	40,00	12,95	75,00
3,13	29,40	4,98	23,75	7,65	43,33	13,49	77,50
3,15	21,00	5,12	25,75	7,84	46,67	14,10	80,00
3,23	31,00	5,19	28,25	8,18	49,33	14,38	83,50
3,23	28,75	5,32	31,50	8,48	50,33	14,79	85,00
3,41	31,25	5,56	32,75	8,90	55,00		
3,47	32,40	5,66	24,00	9,03	45,00		
3,54	32,50	5,67	36,50	9,18	56,67		
3,61	34,40	5,78	26,33	9,42	59,33		
3,98	23,50	5,86	37,50	9,59	50,00		
4,43	29,50	5,93	28,33	10,02	55,00		
5,02	36,50	6,16	30,00	10,39	60,00		
		6,38	32,33	10,76	65,00		
		6,78	33,67	11,26	70,00		
		7,02	37,50	11,78	73,00		
		7,24	36,67	12,50	76,50		
		7,45	38,00	13,25	80,00		
		7,45	39,00	13,90	82,00		
		7,73	40,00	14,45	84,00		
		7,90	42,50	14,79	86,50		
		8,10	42,33	15,42	91,00		
		8,24	45,00	16,57	96,50		
		8,72	45,00	17,15	105,00		
		8,73	48,50				
		8,98	48,00				
		9,34	50,00				
		9,41	51,50				
		9,77	55,50				
		10,20	58,00				
		11,01	60,50				
		11,52	65,00				
		12,16	69,00				
		12,69	72,50				
		13,09	74,50				
		13,71	77,50				
		14,45	80,50				

4.3. Rendement du ressaut hydraulique

Le rendement η du ressaut est défini par le rapport de la perte de charge ΔH qu'il occasionne à la charge totale dans sa section initiale :

$$\eta = \Delta H / H_1 \quad (5.15)$$

avec : $\Delta H = H_1 - H_2$

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

$$H_1 = h_1 \cos \alpha + \frac{V_1^2}{2g} \quad (5.16)$$

$$H_2 = h_2 \cos \alpha + \frac{V_2^2}{2g} \quad (5.17)$$

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

$$H_1 = h_1 \cos \alpha + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \quad (5.18)$$

$$H_2 = h_2 \cos \alpha + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad (5.19)$$

Avec $A_1 = b_1 h_1 + m h_1^2$ et $A_2 = (b_1 + 2mLj \sin \alpha) h_2 + m h_2^2$

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2 (1 + 2M)}{g b^2 h_1^3 (1 + M)^3} \quad (5.20)$$

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

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2 (1 + M)^3}{2 Y^2 (1 + 2M) (1 + 2M \lambda \tan \alpha + YM)^2 \cos \alpha}}{1 + \frac{F_1^2 (1 + M)}{2(1 + 2M) \cos \alpha}} \quad (5.21)$$

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

$\lambda = Lj/h_1$ la longueur relative du ressaut.

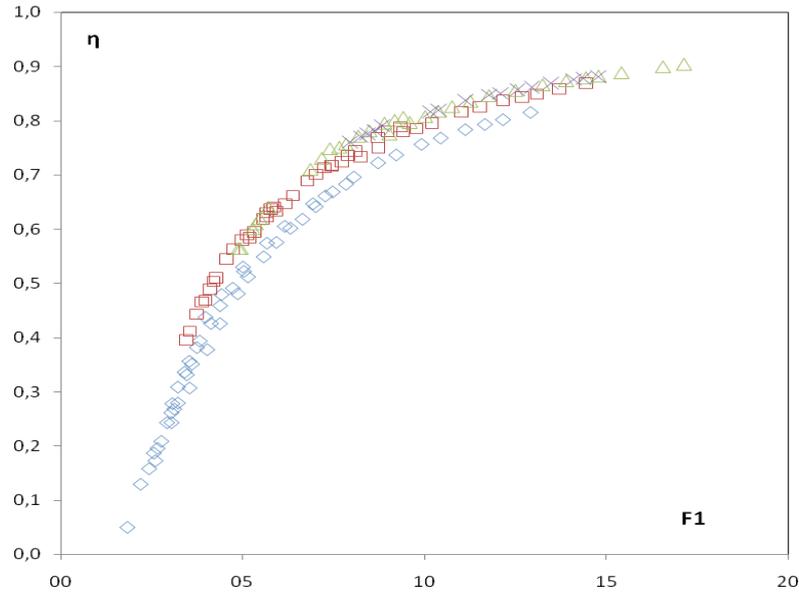


Figure 5.18 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 .
(\diamond) $\tan \alpha = 0,00$; (\square) $\tan \alpha = -0,043$; (\triangle) $\tan \alpha = -0,062$; (\times) $\tan \alpha = -0,08$.

La figure 5.18 montre la variation du rendement en fonction du nombre de Froude, pour différentes inclinaisons du canal.

On remarque que pour le même nombre de Froude F_1 , le rendement η augmente lorsque la contre pente augmente.

On peut donc conclure que l’inclinaison négative du canal avantage la dissipation d’énergie.

Tableau 5.7 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure 5.18.

tang (α) = 0,00		tang (α) = -0,043		tang (α) = -0,062		tang (α) = -0,08	
F_1	η	F_1	η	F_1	η	F_1	η
1,84	0,05	3,44	0,40	4,88	0,56	7,95	0,76
2,20	0,13	3,55	0,41	4,94	0,56	8,25	0,77
2,43	0,16	3,74	0,44	5,27	0,60	8,44	0,78
2,56	0,19	3,88	0,47	5,36	0,61	8,64	0,78
2,61	0,17	3,97	0,47	5,46	0,62	8,83	0,79
2,67	0,20	4,10	0,49	5,70	0,64	10,16	0,82
2,77	0,21	4,20	0,50	6,86	0,71	10,39	0,82
2,93	0,24	4,28	0,51	7,18	0,73	11,14	0,84
3,05	0,26	4,55	0,55	7,39	0,75	11,78	0,85
3,05	0,24	4,74	0,56	7,65	0,75	12,10	0,85
3,07	0,28	4,98	0,58	7,84	0,76	12,56	0,86
3,13	0,27	5,12	0,59	8,18	0,77	12,95	0,86
3,23	0,28	5,19	0,58	8,48	0,78	13,49	0,87
3,23	0,31	5,32	0,59	8,90	0,79	14,10	0,88
3,41	0,34	5,56	0,62	9,03	0,77	14,38	0,88
3,47	0,33	5,66	0,63	9,18	0,80	14,79	0,88
3,54	0,36	5,67	0,62	9,42	0,81		

Tableau 5.7 (suite et fin) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure 5.18.

tang (α) = 0,00		tang (α) = -0,043		tang (α) = -0,062		tang (α) = -0,08	
F ₁	η	F ₁	η	F ₁	η	F ₁	η
3,55	0,31	5,78	0,64	9,59	0,80		
3,61	0,35	5,86	0,64	10,02	0,81		
3,75	0,38	5,93	0,63	10,39	0,82		
3,83	0,39	6,16	0,65	10,76	0,83		
3,98	0,44	6,38	0,66	11,26	0,84		
4,03	0,38	6,78	0,69	11,78	0,85		
4,14	0,43	7,02	0,70	12,50	0,86		
4,39	0,43	7,24	0,71	13,25	0,87		
4,39	0,46	7,45	0,72	13,90	0,87		
4,43	0,48	7,45	0,72	14,45	0,88		
4,74	0,49	7,73	0,72	14,79	0,88		
4,87	0,48	7,90	0,74	15,42	0,89		
5,02	0,53	8,10	0,74	16,57	0,90		
5,04	0,52	8,24	0,73	17,15	0,90		
5,15	0,51	8,72	0,77	9,59	0,80		
5,59	0,55	8,73	0,75	10,02	0,81		
5,68	0,57	8,98	0,78	10,39	0,82		
5,94	0,58	9,34	0,79	10,76	0,83		
6,17	0,61	9,41	0,78	11,26	0,84		
6,32	0,60	9,77	0,79	11,78	0,85		
6,65	0,62	10,20	0,80	12,50	0,86		
6,94	0,65	11,01	0,82	13,25	0,87		
7,02	0,64	11,52	0,83	13,90	0,87		
7,28	0,66	12,16	0,84	14,45	0,88		
7,48	0,67	12,69	0,84	14,79	0,88		
7,85	0,68	13,09	0,85	15,42	0,89		
8,07	0,70	13,71	0,86	16,57	0,90		
8,73	0,72	14,45	0,87	17,15	0,90		
9,23	0,74						
9,93	0,76						
10,46	0,77						
11,13	0,78						
11,67	0,79						
12,17	0,80						
12,93	0,82						

V.5. CONCLUSION

Ce présent chapitre a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal de section droite trapézoïdal non prismatique à pente négative.

Nous avons décrit dans un premier temps, le modèle physique qui nous a servi de banc d'essai, ainsi que les instruments et l'appareillage utilisé pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique, moyennant quelques schémas et des photographies.

Dans un second temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie pendant les essais.

Passant en troisième temps aux résultats expérimentaux, quatre (04) hauteurs initiales h_1 ont été testées vingt (20) seuils s de hauteurs différentes et trois (03) inclinaisons du canal par rapport à l'horizontale. Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue.

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

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

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

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Cette partie a été divisée en deux chapitres. A travers ces deux chapitres nous avons traités le ressaut hydraulique d'un point de vue théorique et expérimental.

Le premier chapitre a été consacré à un développement théorique visant à exprimer la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, M, \lambda, \alpha) = 0$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal de section droite trapézoïdal non prismatique à pente négative variable. Cette approche a mené à l'établissement d'une relation semi théorique. Ceci a été rendu possible par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections aval et amont du ressaut hydraulique. Il a été montré que pour $\alpha=0$, la relation théorique obtenue conduit à la forme du ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal trapézoïdal horizontal.

L'analyse expérimentale de la relation semi théorique obtenue a permis d'estimer le coefficient de correction k . Une valeur moyenne constante $k=1,54$ a été trouvée, pour les trois (03) contre pentes étudiées. Les écarts relatifs entre le nombre de Froude théorique et son homologue expérimental étant en leurs majorités inférieures à 5%, permettant de conclure à la fiabilité de la relation théorique obtenue. En outre, la relation obtenue se présente sous une forme implicite vis à vis du rapport Y des hauteurs conjuguées et son application nécessite par conséquent l'utilisation d'un procédé itératif. Une relation approchée explicite en Y a été proposée, permettant la détermination du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal.

Pour le deuxième et dernier chapitre de notre contribution nous avons effectué en premier lieu la description du modèle expérimental, qui a servi de base à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique. Nous avons abordé en deuxième lieu la procédure expérimentale suivie afin d'aboutir à des résultats significatifs. Nous avons décrit ensuite, l'appareillage utilisé pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique, moyennant des schémas et des photographies.

En outre on a déterminé expérimentalement l'effet de la contre pente du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique, à savoir la hauteur s du seuil, la longueur L_j du ressaut, la longueur L_r du rouleau. En effet, l'étude expérimentale a montré que la variation du rapport S en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type logarithmique de la forme $s/h_1 = a \ln(F_1) + b$, tels que : les coefficients a et b sont en fonction de l'angle α de l'inclinaison du canal. Dans un second temps l'expérimentation a eu

pour objectif d'évaluer les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique. Il a été montré que l'inclinaison du canal, n'a pas d'influence sur les relations $\lambda(F_1)$ et $\lambda_r(F_1)$. En outre, l'analyse statistique des mesures expérimentales a montré que les deux relations suivent une loi de type linéaire. Aussi, l'étude expérimentale s'est intéressée à la dissipation d'énergie cinétique. En effet, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que la contre pente du canal favorise la dissipation de l'énergie.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Notre étude a été dédiée à l'analyse théorique et expérimentale du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal non prismatique à pente négative avec l'horizontale. Deux grandes parties ont été nécessaires : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine, et une deuxième partie qui a concerné notre propre contribution.

La première partie a été divisée en trois chapitres :

✓ Le premier chapitre de cette partie bibliographique, a permis d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire horizontal et incliné.

✓ Le second chapitre de la partie bibliographique, s'est intéressé au ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire horizontale et incliné.

✓ le dernier chapitre a été consacré à l'approche de Hager et Wanoschek (1989), relative au ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal de pente nulle.

Et le ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal, à pente négative (les résultats de mémoire de magister de riguet (2012)).

Pour le premier chapitre de la partie bibliographique nous avons abordé pour le cas du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire : la pente nulle, la pente positive et la pente négative.

Pour le ressaut hydraulique classique, nous avons mis l'accent sur les travaux de Hager (1990), relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. Nous avons montré que l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre ses sections initiale et finale, en négligeant les pertes de charge autres que celle due au ressaut, mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. Pour le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente positive, nous avons montré que la première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné était celle de Bakhmeteff et Matzké (1938), qui ont évoqué dans leurs études, le profile de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. En outre Kindsvater (1944), a classifié les ressauts inclinés à pente positive en quatre principaux types; type A, type B, type C et type D. En outre il a proposé une approche pour le rapport des hauteurs conjuguées pour le ressaut de type C. Par ailleurs, la littérature montre que le ressaut en contre pente est classé en quatre configurations principales : type F, type FI, type FII et type F-S. Il a été montré également que

plusieurs auteurs ont abordé la question du ressaut en contre pente, mais uniquement pour le canal rectangulaire, nous avons présenté les travaux de Mc Corcodal et Mohamed (1994), qui ont étudié le cas limite d'existence des ressauts en contre pente, une relation théorique a été proposée pour le type D. Les auteurs confirment que ce type de ressaut est très sensible à la variation des profondeurs conjuguées pour des nombres de Froude $F_1 < 4$. Cependant, pour les nombres de Froude $F_1 < 9$, le ressaut limite en contre pente (type D) est difficile à établir.

Le deuxième chapitre a traité trois types de ressauts hydrauliques : le ressaut évoluant dans un canal triangulaire à pente nulle et son homologue à pente positive et à pente négative. Pour le ressaut hydraulique classique, nous avons exposé en premier lieu la démarche expérimentale de Hager et Wanoschek (1987) qui extrapolent les résultats issus d'un profil semi triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° . L'étude montre que les rapports Y expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs à ceux calculés par l'équation de la quantité de mouvement. Cette différence est attribuer, selon les auteurs à l'effet des frottements sur les parois du canal, et l'équation de la quantité de mouvement est alors modifiée en conséquence. Hager et Wanoschek (1987) proposent 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 la cotangente m . Une équation représentative du profil de surface généralisé le long de l'axe du canal est aussi proposée. Toujours pour cette configuration de ressaut, l'approche de Achour et Debabeche (2003) a été consacrée à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° . Le ressaut est contrôlé de telle sorte que sa longueur L_j soit approximativement égale à la longueur du bassin, délimité à l'amont par le pied du ressaut et à l'aval par le seuil. L'expérimentation a eu pour objectif de corréler les différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a pu mener à l'établissement de relations simples à l'emploi, liant les variables adimensionnelles $S=s/h_1$, F_1 et x/h_1 , pour le type de seuil considéré. Par ailleurs, l'étude bibliographique a abordé le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente positive, où il a été exposé les études de Debabeche et al (2009), et de Cherhabil (2010), qui ont eu trait à l'analyse, théorique et expérimentale, du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. Une relation générale liant le rapport des profondeurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal α a été trouvée. L'expérimentation a eu pour objectif, en outre d'évaluer les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique à savoir la longueur du ressaut et la

longueur du rouleau de surface, où il a été montré que l'inclinaison du canal, n'a pas d'influence sur les relations $\lambda(F_1)$ et $\lambda_r(F_1)$.

le dernier chapitre nous avons abordé en premier temps la classification proposée par Bradley et Peterka (1957), concernant la forme du ressaut. Dans un second temps nous avons passé en revue l'étude de Hager (1989) relative aux caractéristiques du ressaut classique. Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau de fond. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. L'étude expérimentale a eu pour objectif d'évaluer la variation de la longueur relative L_r/h_2 en fonction de F_1 . En effet, une caractéristique particulière de ressaut trapézoïdal pour $F_1 > 4$ est l'apparition d'un rouleau de fond, et des zones d'écoulement de retour latérale. L'expérimentation montre aussi qu'aucun rouleau de surface n'existe dans ce type de ressaut.

La deuxième partie de notre travail a concerné notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale non prismatique à pente négative.

Cette partie a été divisée en deux chapitres :

- ✓ le premier chapitre a concerné à un développement théorique du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal non prismatique à pente négative.
- ✓ le deuxième chapitre a traité expérimentalement le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal non prismatique à pente négative.

Comme il a été cité précédemment, ce chapitre a été consacré en premier lieu à un développement théorique qui nous a mené à exprimer la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, \lambda, M, \alpha) = 0$. Cette approche a mené à l'établissement d'une relation semi-théorique. Ceci a été rendu possible par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections aval et amont du ressaut hydraulique. En second lieu une analyse expérimentale de la relation semi-théorique a été établie. En effet, les mesures expérimentales ont permis d'estimer le coefficient de correction k . Une valeur moyenne constante $k=1,54$ a été trouvée, pour les trois contre pentes étudiées. Les écarts relatifs entre le nombre de Froude théorique et son homologue expérimental étant en leurs majorités inférieures à 5%, permettant de conclure à la fiabilité de la relation théorique obtenue. Une relation approchée explicite en Y a été proposée, permettant la détermination du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal.

Pour le deuxième et dernier chapitre de notre contribution, il a été montré l'effet de la contre pente du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique, à savoir la hauteur s du seuil, la longueur L_j du ressaut, la longueur L_r du rouleau. En effet, l'étude expérimentale a montré que la variation du rapport S en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type logarithmique. Dans un second temps l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique. Il a été montré que l'inclinaison du canal, n'a pas d'influence sur les relations $\lambda(F_1)$ et $\lambda_r(F_1)$. En outre, l'analyse statistique des mesures expérimentales a montré que les deux relations suivent une loi de type linéaire. Aussi, l'étude expérimentale s'est intéressée à la dissipation d'énergie cinétique. En effet, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que la pente négative du canal favorise la dissipation de l'énergie.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Première partie

Chapitre I

Figure 1.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). a) pré-ressaut, b) ressaut de transition, c) ressaut stable, d) ressaut agité.....	5
Figure 1.2 : Aspect du ressaut classique. a) rouleau développé. b) rouleau non développé..	7
Figure 1.3: Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbe tracée selon la relation (2.9). (---) Courbe tracée selon la relation (2.10).....	8
Figure 1.4 : Classification des ressauts inclinés selon Kindsvater (1944).....	9
Figure 1.5 : Notation du ressaut incliné.....	11
Figure 1.6 : Classification du ressaut à pente négative.....	12
Figure 1.7 : Schéma de définition et volume de contrôle pour le ressaut à pente négative...	13
Figure 1.8 : Rapport des hauteurs conjuguées expérimentales et théoriques pour des cas limites et des cas stabilisés de ressaut en pente négative, provenant de l'étude de Mc Corcodal et Mohamed (1994), ainsi que celle de Okada et Aki (1959). $\text{tg}\theta = (+) 0,0$; (\square) $-0,1$; (\blacktriangle) $-1/6$; (∇) $-1/5$; (\blacksquare) $-1/4$; (—) Equation théorique.....	14
Figure 1.9 : Longueurs du rouleau mesurées dans les cas limites et les cas stabilisés de ressaut en pente négative. Provenant de l'étude de Mc Corcodal et Mohamed (1994) et de celle de Okada et Aki (1959). $\text{tg}\theta = (+) 0,0$; (\square) $-0,1$; (\blacktriangle) $1/6$; (∇) $-1/5$; (\blacksquare) $-1/4$; (—) Equation théorique.....	15

Chapitre II

Figure 2.1 : Ressaut en canal semi triangulaire selon Hager et Wanoscsek (1987). (a) vue en plan, (b) coupe transversale. 1. vue en plan du ressaut. 2. paroi en PVC inclinée de 45° . h_1 et h_2 : hauteurs conjuguées du ressaut	18
Figure 2.2 : Variation des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut triangulaire ($m=1$) en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoscsek (1987). (—) courbe tracée selon la relation (3.2). $\Lambda=0$. (---) courbe tracée selon la relation (3.13). $\Lambda>0$	21
Figure 2.3 : Longueur relative L_j/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoscsek (1987) ($m=1$). (∇): $m=0,44$ selon Argyropoulos (1962).....	22
Figure 2.4 : 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).....	23

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)	24
Figure 2.6 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.....	25
Figure 2.7 : Variation du rapport $Y_S = f(F_1)$ dans un canal triangulaire. (---) Ressaut classique. (o) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.....	25
Figure 2.8 : Variation expérimentale de $Y_S = f(S)$ lors du contrôle d'un ressaut triangulaire.(Δ) Points expérimentaux. (---) Courbe tracée selon la relation : $Y_S = 1 + 0,96.S$	26
Figure 2.9 : Variation expérimentale de la hauteur relative S du seuil, en fonction du nombre de Froude F_1 . (o) Points expérimentaux.....	27
Figure 2.10 : Variation de $(S+F_1^{0,4})$ en fonction de la position relative x/h_1 du seuil (Δ) Points expérimentaux (—) courbe d'ajustement.....	28
Figure 2.11 : ressaut hydraulique sur une pente positive.....	28
Figure 2.12 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude semi théorique F_1 selon la relation (3.27), pour six valeurs de la tangente de l'angle d'inclinaison du canal, tels que : $\text{tang}(\alpha) = (\square)0.00$ (selon Debabeche et Achour 2007) ,(o) 0.01, (Δ) 0.02,(\diamond) 0.03,(x) 0.04 et ($*$) 0.05. (—) Courbe selon relation (3.28), (---) courbe selon la relation (3.31).....	31
Figure 2.13 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \text{tang}(\alpha) \leq 0,05$	32
Figure 2.14 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \text{tang}(\alpha) \leq 0,05$	34
Figure 2.15 : ressaut hydraulique sur une pente positive.....	32
Figure 2.16 : Variation expérimentale de $Y(F_1)$ pour différents valeur de $\text{tang}(\alpha)$ (-) Courbe selon la relation (3.31).....	36
Figure 2.17 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $-0.005 \leq \text{tang}(\alpha) \leq 0.02$	37
Figure 2.18 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $-0.005 \leq \text{tang}(\alpha) \leq 0.02$	38

Chapitre III

Figure 3.1 : Ressaut hydraulique classique.....	41
Figure 3.2 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M . $0 < M < \infty$: profil trapézoïdaux. $M=0$: profil rectangulaire. $M=\infty$: profil triangulaire.....	43
Figure 3.3 : schéma de définition.....	43
Figure 3.4 : caractéristique principale du rouleau de fond: a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximale.....	44
Figure 3.5 : longueur relative λ_j du ressaut en fonction de F_1 et de M	45
Figure 3.6 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique.....	45
Figure 3.7 : Rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude. $M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire.....	46

Figure 3.8 : Illustration schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal. (→) courants de surface, (- →) courant de fond.....	47
Figure 3.9 : Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal incliné à pente positive.....	48
Figure 3.10: Variation expérimentale de $Y(F_1)$ pour différentes valeur de $\text{tang}(\alpha)$ (-) Courbe selon la relation (3.26).....	51
Figure 3.11 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \text{tang}(\alpha) \leq 0.02$	52
Figure 3.12 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \text{tang}(\alpha) \leq 0.02$	53

DEUXIEME PARIE

Chapitre IV

Figure 4.1 : Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal à pente négative.....	59
Figure 4.2 : a) Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut. b) Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut.....	61
Figure 4.3 : Variation du nombre de Froude universel F_{1uni} en fonction du nombre de Froude théorique F_{1th} calculée selon la relation (1.21). (—) Première bissectrice.....	66
Figure 4.4 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\text{tang}(\alpha) = 0,00$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.....	68
Figure 4.5 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\text{tang}(\alpha) = -0,043$. (o) points expérimentaux; (—) Courbes d'ajustement.....	68
Figure 4.6 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\text{tang}(\alpha) = -0,062$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.....	69
Figure 4.7 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\text{tang}(\alpha) = -0,08$ (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.....	69
Figure 4.8 : Variation des paramètres 'a' en fonction de $\text{tang}(\alpha)$	72
Figure 4.9 : Variation de rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction Rapport des hauteurs conjuguées théorique Y_{th} calculée selon la relation (4.23). (—) Première bissectrice	72
Figure 4.10: Variation expérimentale de $Y(F_1)$ pour différentes valeurs de $\text{tang}(\alpha)$. (—) courbe tracé selon la relation (4.23).....	73

CHAPITRE V

Figure 5.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section trapézoïdale, ayant servi à l'expérimentation.....	78
Photo 5.1 : Photographie du canal de mesure utilisé.....	78
Photo 5.2 : Photographie de la boîte en charge.....	79

Photo 5.3 : Photographie d'une série de convergent.....	79
Photo 5.4: (a,b,c,d) Photographies des contres pontes.....	80
Photo 5.5 : Photographie des Pompes centrifuges (en disposées parallèles).....	81
Photo 5.6: Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure directe du débit.....	81
Photo 5.7 : Photographie de la série de seuil.....	81
Figure 5.2 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.....	83
Figure 5.3 : Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal à pente positive.....	84
Figure 5. 4 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour $0,031 \leq M \leq 0,078$, pour $\tan(\alpha) = 0$. (\circ) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.....	85
Figure 5. 5 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour $\tan(\alpha) = -0,043$. (\blacksquare ; \blacktriangle ; \blacklozenge ; $+$) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.....	86
Figure 5.6 : Variation du paramètre a en fonction de M	87
Figure 5.7 : Variation du paramètre b en fonction de M	87
Figure 5.8 : Variation de la relation $f(F_1, M)$ en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil pour la ponte -4,3%. (\circ) points expérimentaux. (-) première bissectrice d'équation : $f(F_1, M) = s/h_1$	87
Figure 5. 9: Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour $\tan(\alpha) = -0,062$. (\blacktriangle ; \blacksquare ; \blacklozenge) points expérimentaux; (—) Courbes d'ajustement.....	88
Figure 5.10 : variation du paramètre a en fonction de M	88
Figure 5.11 : variation du paramètre b en fonction de M	88
Figure 5.12 : Variation de la relation $f(F_1, M)$ en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil pour la ponte -6,2%. (\circ) points expérimentaux. (-) première bissectrice d'équation : $f(F_1, M) = s/h_1$	89
Figure 5. 13 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour $\tan(\alpha) = -0,08$. (\blacksquare ; \blacklozenge) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.....	89
Figure 5.14 : Variation du paramètre a en fonction de M	90
Figure 5.15 : Variation du paramètre b en fonction de M	90
Figure 5.16 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq -0,08$	92
Figure 5. 17 : Variation du longueur relative L_r/h_1 de rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 , De l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq -0,08$	94
Figure 5.18 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . (\diamond) $\tan \alpha = 0,00$; (\square) $\tan \alpha = -0,043$; (Δ) $\tan \alpha = -0,062$; (\times) $\tan \alpha = -0,08$	95

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE IV

Tableau 4.1 : Valeurs du coefficient k selon la relation 4.20.....	65
Tableau 4.2 : Ecart relatif en (%) entre F_{1uni} universelle et F_{1th} théorique.....	67
Tableau 4.3 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1	70
Tableau 4.4 : Valeurs des paramètres ' a '.....	71
Tableau 4.5 : Ecart relatif entre Y_{th} déterminés par la relation théorique (4.21) et Y_{ap} calculés par la relation approchée (4.23)	74

CHAPITRE V

Tableau 5.1 : Tableau (5.1) : Valeurs des paramètres a et b	86
Tableau 5.2 : Valeurs des paramètres a et b	88
Tableau 5.3 : Valeurs des paramètres a et b	90
Tableau 5.4: Mesures expérimentales ayant servi au traçage des figures.....	91
Tableau 5.5 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure 5.20.....	93
Tableau 5.6 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure 5.21.....	95
Tableau 5.7 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure 5.15.....	97

PRINCIPALES NOTATIONS

PRINCIPALES NOTATIONS

A_1	L'aire de la section mouillée initiale	[m ²]
A_2	L'aire de la section mouillée finale	[m ²]
$A(x)$	L'aire de la section mouillée correspondant à x	[m ²]
b_1	Base du canal trapézoïdal en amont	[m]
F_1, IF_1	Nombre de Froude incident	[-]
P_1	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	[N]
P_2	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	[N]
g	Accélération de la pesanteur	[m.s ⁻²]
h_1	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h_2	Hauteur finale du ressaut	[m]
h_2^*	Hauteur finale du ressaut classique rectangulaire	[m]
$h(x)$	Profondeur de l'eau à la distance x du pied du ressaut	[m]
\bar{h}, h_c	Profondeur du centre de gravité de la section mouillée par rapport à la surface libre de l'écoulement	[m]
h_b	hauteur maximal du rouleau de fond	[m]
k	coefficient de correction du volume du ressaut	[-]
L_r	Longueur du rouleau	[m]
L_j	Longueur du ressaut	[m]
L_r^*	Longueur du rouleau classique rectangulaire	[m]
L_j^*	Longueur du ressaut classique rectangulaire	[m]
L_u	la distance du pied du ressaut au début du rouleau de fond	[m]
L_b	longueur du rouleau de fond	[m]
m	cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale	[-]
M_1	coefficient de forme	[-]
Q	Débit volume	[m ³ .s ⁻¹]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
R_h	Rayon hydraulique correspondant au profil triangulaire	[-]
s	Hauteur du seuil	[m]
S	Hauteur relative du seuil	[-]
S_f	Gradient de perte de charge	[-]
W_x	Force de frottement agissant sur le volume de liquide	[N]
V	Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiale et finale	[m ³]
v_1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m.s ⁻¹]
v_2	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	[m.s ⁻¹]
x	Position de seuil	[m]
X	Position relative de seuil	[-]
Y^*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
Y_s	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil	[-]
ν	Viscosité cinématique	[m ² .s ⁻¹]

λ_j	longueur relative du ressaut	[-]
λ_r	longueur relative du rouleau	[-]
λ_b	longueur relative du rouleau de fond	[-]
λ_u	longueur relative du distance d'approche	[-]
$\bar{\omega}$	Poids spécifique du liquide	[N.m ⁻³]
ρ	Masse volumique du liquide	[kg.m ⁻³]
η	Rendement du ressaut	[-]
α	Angle d'inclinaison du fond du canal par rapport à l'horizontal	[rd]
θ	Angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal	[rd]

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achour, B., Debabeche, M., (2003), Control of Hydraulic jump by sill in a triangular channel, J. Hydraulic Research, Vol. 41, No. 3, pp. 97-103
- Anderson, V., M. (1978). Undular hydraulic jump, Proc., ASCE, J. Hydraulic Division, Vol. 104(HY8), pp. 1185-1188, discussion 1979, 105 (HY9), 1208-1211, 1980,106(HY7), 1252-1254.
- Argyropoulos, P., A., (1962), General solution of the hydraulic jump in sloping channels, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, Vol. 88, HY4, pp. 61-75.
- Beiram, M., K., Chamani, M., R., (2006), Hydraulic Jumps in Sloping Channels: Sequent Depth Ratio, J. Hydraulic Engrg., vol 32(10), pp. 1061-1068.
- Bradley, J.N., Peterka, A.J., (1957), The hydraulic design of stilling basins: Hydraulic jumps on a horizontal apron, paper 1401, proc. Amer. Soc. Civ. Engrs., J. Hydraulic. Division, Vol.83, HY5.
- Cherhabil, S., (2010), Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à pente variable, Doctorat en sciences, Département de Génie Civil et Hydraulique, Université de Biskra.
- Chow, V. T., (1958), Open channel hydraulics, McGraw-Hill, New York.
- Chow, V.T., (1959), Open channel Hydraulics, McGraw Hill, New York, NY.
- Debabeche, M., (2003), Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques, Doctorat d'état, Département d'Hydraulique, Université de Biskra.
- Debabeche, M., (2008), Les écoulements brusquement variés, cours de 1ère année magister, photocopié, Université de Biskra.
- Debabeche, M., Achour, B., (2007), Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel, J. Hydraulic Research Vol. 45, No. 1, pp. 135–139.
- Debabeche, M., Cherhabil, S., Hafnaoui, A. et Achour, B. (2009), Hydraulic jump in a sloped triangular channel, Can. J. Civ; Eng. 36: 655-658 (2009).
- Hager, W.H., Wanoschek, R (1989), Hydraulic jump in trapezoidal channel, J. hydraulic research, Vol. 27, 1989, N.3.
- Hager, W.H., (1989), Hydraulic jump in U-shaped channel, Proc.ASCE, J. Hydraulic Engineering, 115, 667-675.
- Hager, W.H., Bretz, N.V., (1988), Sill-controlled stiling basin, the international symposium on hydraulics for higt dams, 273-280.
- Hager, W.H., Sinniger, R., (1985,1986), Flow Characteristics of the hydraulic Jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise, J. Hydraulic Research, Vol. 23, pp. 101-113, 1985, Vol. 24, pp. 207-215, 1986.
- Hager, W.H., Sinniger, R., (1987), Construction hydraulique, Ecoulement stationnaire, Edition suisse romande.

Hager, W.H., Wanoschek, R., (1987), Hydraulic Jump in Triangular Channel, J. Hydraulic Research, Vol. 25, Nr. 5, pp. 549-564.

Hachemi Rachedi, L., (2005), Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, Mémoire de magister en hydraulique, Département d'hydraulique, Université de Biskra.

Mc Corcodal, 1994, Journal of Hydraulic Research, VOL. 32, 1994, NO.1; 119-130.

Ohashi et al. (1973): Design of Combined Hydraulic Jump and Ski-Jump Energy Dissipator of Flood Spillway. XIII ICOLD Congress Madrid Q.41, R.19: 311-333.

Okada, A., et Aki, S. (1955). Experimental study of hydraulic jump on reversed slope apron. J. Tech. Lab., 5(6), Tokyo (in Japanese).

Pagliara, S. et peruginelli, A. 2000, Journal of Hydraulic Engineering/ November 2000/ 847-850.

Rajartnam, N. (1963): Discussion to "General Solution of the Hydraulic Jump in sloping Channels" by P.A. Argyropoulos. Proc. ASCE, J. Hydraulics Division 89(HY1) : 258-261.

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

Rajaratnam, N., (1966), Hydraulic jump in sloping channel, J. irrigation and Power (India), 23(Apr): pp.137-149, Discussion, 1967, 24(Jump): pp.285-293.

Rajaratnam, N., (1967), Hydraulic jumps, Advances in Hydro science, Vol. 4, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York.

Rajaratnam, N., Murahari, V., (1971), A contribution to forced hydraulic jumps, J. Hydraulic Research, vol. 9, 217-239.

Rajaratnam, N., Subramania, K., (1967), Flow equation for the sluice gate, Proc. ASCE, J. Irrigation and Drainage Division, Vol. 93, IR3, 167-186.

Rajaratnam, N., Subramania, K., (1968, 1969, 1970), Profil of the hydraulic jump, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, vol. 94, 1968, HY3 663-673; vol. 95, 1969, HY1 546-557, HY2 725-727; vol. 96, 1970, HY2 579-581.

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

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

Rand, W., (1965), Flow over a vertical sill in an open channel, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, vol. 91, HY4 97-122.