

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf -M'sila

Faculté de technologie

Département d'Hydraulique



PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master 02 en : Hydraulique

Spécialité : Ouvrage Hydraulique

**L'étude expérimentale de l'effet de la pente sur
Les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal
rectangulaire**

Réalise par :

- BOULAARES YAMINE

-MECHTER MOHAMED

Encadré par :

Dr. NEBBAR Mohamed Lakhdar

Promotion : 2020/2021

remerciement

Je tiens à remercier tout d'abord mon Dieu qui m'a donné le courage et la force pour mener à bien ce modeste travail

A l'issue de ce modeste travail, Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à :

Mon encadreur " Mr. NEBBAR Mohamed lakhdar" qui m'a encadré pour l'accomplissement de ce travail.

Tous les enseignants du département d'Hydraulique qui ont participé à ma formation.

Pour mes parents et toute ma famille.

J'exprime toute ma gratitude et mon respect aux membres de jury qui ont accepté de juger mon travail.

Tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Aux plus chers des chers,

Aux plus beaux de ce qu'a eu la terre, A mon père et ma mère.

Aux meilleurs des frères

Aux meilleurs des amis Salim , Walid ,Aymen et Oussama

A toute ma grande famille, A mes cousins et cousines. A tous mes amis (es).

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicace

RESUME

Sommaire

Introduction Generale.....1

PARTIE 1

Étude Bibliographique

Chpitre 1: Généralité

1.1. Introduction.....	4
1.2. Définition De L'écoulement A Surface Libre.....	4
1.3. Les Canaux.....	4
1.3.1. Définition.....	4
1.3.2. Type Des Canaux.....	4
1.4. Les Types D'écoulements Dans Les Canaux.....	5
1.5. Régimes D'écoulement.....	6
1.6. Conclusion.....	7

Chapitre 2

Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

2.1. Introduction.....	10
-------------------------------	-----------

2.2. Ressaut Hydraulique Classique.....	10
2.2.1. Forme Du Ressaut Classique.....	11
2.2.2. Rapport Des Hauteurs Conjuguées Du Ressaut	12
2.2.3. Longueurs Caractéristiques Du Ressaut.....	12
2.2.3.1. Longueur Du Ressaut.....	13
2.2.3.2. Longueur Du Rouleau.....	14
2.2.3.3. Rendement Du Ressaut.....	15
2.3. Ressaut Hydraulique Dans Un Canal Incline À Pente Positive.....	15
2.3.1. Classification Des Ressauts Inclinés.....	16
2.3.2. Ressaut Hydraulique De Type C Et De Type D.....	17
2.4. Ressaut Hydraulique Dans Un Canal Incline A Pente Négative.....	18
2.4.1. Classification Du Ressaut A Pente Négative.....	18
2.4.2. Etude De Mc Corcodal Et Mohamed (1994).....	19
2.5. Conclusion.....	22

Chapitre 3

Ressaut Hydraulique Dans Un Canal Triangulaire

3.1. Introduction.....	25
3.2. Ressaut Hydraulique Classique.....	25
3.2.1. Approche De Hager Et Wanoschek (1987).....	25
3.2.1.1. Rapport Des Hauteurs Conjuguées.....	26
3.2.1.2. Longueur Caractéristique Du Ressaut.....	28
3.2.1.3. Profil De Surface Généralisé Du Ressaut.....	30
3.3. Ressaut Hydraulique Contrôlé Par Seuil.....	31
3.3.1. Approche De Debabeche Et Achour (2007).....	31
3.3.1.1. Position Du Problème.....	31
3.3.1.2. Influence Du Seuil Sur Le Rapport Des Hauteurs Conjuguées Du Ressaut.....	32
3.3.1.3. Influence Du Seuil Sur La Longueur Relative Du Bassin.....	35
3.4. Conclusion	36

Chapitre 4

Ressaut Hydraulique Dans Un Canal Trapézoïdale

4.1. Introduction.....	39
4.2. Approche De Hager Et Wanoschek (1989).....	39
4.2.1. Généralités.....	39
4.2.2. Description Des Essais.....	39
4.2.3. Rapport Des Hauteurs Conjuguées Du Ressaut.....	40
4.2.4. Longueurs Caractéristiques Du Ressaut.....	42
4.2.4.1. Longueur Du Rouleau De Fond.....	42
4.2.4.2. Longueur Du Ressaut.....	43
4.2.4.3. Rendement Du Ressaut.....	44
4.2.4.4. Description Du Ressaut.....	46
4.3. Ressaut Hydraulique Dans Un Canal Trapézoïdal A Pente Positive (Rignet, 2012).....	47

4.3.1. Analyse Théorique.....	47
4.3.1.1. Equation De La Quantité De Mouvement.....	47
4.3.2. Analyse Expérimentale De L'équation Semi Théorique.....	50
4.3.2.1. Estimation Du Coefficient K De Correction.....	50
4.3.2.2. Variation Du Rapport Y Des Hauteurs Conjuguées Du Ressaut En Fonction Du Nombre De Froude F_1 Et De L'angle A D'inclinaison Du Canal.....	50
4.3.3. Résultats Expérimentaux.....	51
4.3.3.1. Longueurs Caractéristiques Du Ressaut.....	51
4.3.3.2. Variation De La Longueur Relative L_j/H_1 Du Ressaut En Fonction Du Nombre De Froude F_1	51
4.3.3.3. Variation De La Longueur Relative L_r/H_1 Du Rouleau De Surface En Fonction Du Nombre De Froude F_1	52
4.4. Conclusion.....	53

PARTIE II

RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL DANS UN CANAL RECTANGULAIRE PENTE VARIABLE

CHAPITRE 1

Présentation du matérielle

Introduction de la deuxième partie	55
--	----

Chapitre 1

1.1. Introduction	57
1.2. Description du modèle.....	57
1.2.1. Description du canal.....	57
1.2.2. Caractéristiques géométriques du canal.....	58
1.3. Appareillage de mesure.....	58
1.3.1. Mesure de débit.....	58
1.3.2. Mesure de la pente.....	58
1.3.3. Limnimétrie.....	59
1.4. Résultats expérimentaux.....	60
1.4.1. Procédure expérimentale.....	60

Chapitre 2

2. Analyse des résultats expérimentaux.....	62
2.1. Les valeurs de mesures.....	62
2.1.1. Canal à pente nulle.....	62
2.1.2. Canal à pente $I = 1\%$	63
2.1.3. Canal à contre pente.....	64
2.2. Variation de hauteur de seuil par rapport hauteur h_1 en fonction de nombre de Froude pour la pente nulle.....	65
2.3. Hauteur relative y en fonction de nombre de Froude Fr	66

2.4. Variation de Longueur de ressaut par rapport hauteur h_1 en fonction de position de seuil rapporter à la hauteur conjugué h_1	68
2.5. La variation de la perte de charge en fonction de la pente du canal.....	70
2.6. Conclusion	73
Conclusion générale.....	75
Résumé	

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 Matzke (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 Sandoz 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.

Chapitre 1

Généralité

1.1. Introduction

L'hydraulique est un élément indispensable à la vie. Les observations effectuées sur les écoulements ont produit une somme considérable d'appréciations qualitatives et quantitatives que les progrès de l'informatique ont pu, ces dernières décennies, mettre sous forme numérique.

L'hydraulique traite, entre autre, des écoulements dans les canaux artificiels et naturels ayant une surface libre soumise à la pression atmosphérique.

Dans ce chapitre, nous essayons de donner une vue générale sur les différents types de canaux, les caractéristiques et la classification des écoulements à surface libre. Nous abordons notamment quelques notions fondamentales nécessaires à l'étude des écoulements à surface libre, puis nous soulignerons plus spécifiquement les divers types des écoulements.

1.2. Définition de l'écoulement à surface libre

L'écoulement à surface libre fait partie de l'écoulement gazeux-liquides ou liquide-liquide. La modélisation de ce type d'écoulement nécessite un découpage du domaine global de calcul en deux sous domaines non miscibles séparés par une interface bien définie qui présente la surface libre

Le premier est constitué d'un volume d'eau et le deuxième, situé dans la partie supérieure du domaine d'étude, est rempli d'air.

1.3. Les canaux

1.3.1. Définition

On appelle canal un système de transport dans lequel l'eau s'écoule et dont la surface libre est soumise à la pression atmosphérique.

On distingue cependant les canaux prismatiques des canaux non prismatiques. En effet lorsque la section, la pente de fond, et la rugosité d'un canal sont constantes, le canal est dit prismatique, sinon il est non prismatique.

1.3.2. Type des canaux

On distingue deux catégories de canaux suivant les propriétés géométrique et hydraulique :

a. Les canaux naturels

Les canaux naturels sont les cours d'eau qui existent naturellement sur terre, tels que les ruisselets, rivières, fleuves et estuaires. Les propriétés géométriques et hydrauliques des canaux naturels sont généralement assez irrégulières. L'application de la théorie hydraulique ne donne que des résultats approximatifs obtenus moyennant certaines hypothèses (Figure I.1).

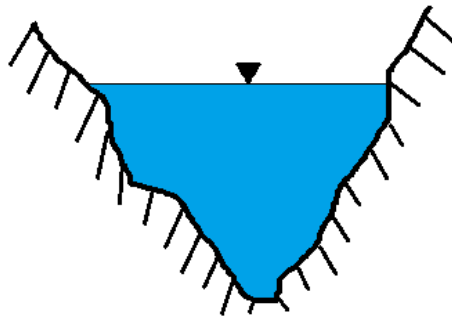


Figure 1.1 : Section transversal d'un canal Naturel

b. Les canaux artificiels

Ce sont des cours d'eau réalisés par l'homme tel que les canaux découverts construits ou ras de sol, les galeries, les tuyaux de drainages, ...etc. Autrement dit, la plupart des ouvrages de ce type utilisés dans la pratique hydrotechnique et d'aménagement des eaux. Les propriétés géométriques et hydrauliques des canaux artificiels sont généralement assez régulières. L'application de la théorie hydraulique donne souvent des résultats satisfaisants (Figure 1.2).

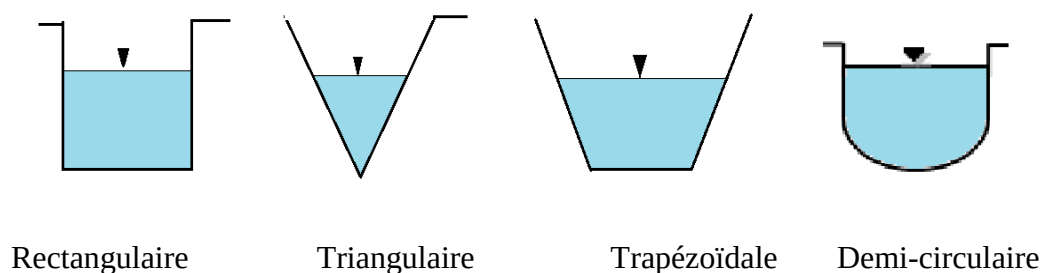


Figure 1.2 : Canaux artificiels

1.4. Les types d'écoulements dans les canaux

L'écoulement de l'eau dans un lit ouvert est appelé à surface libre, il a lieu sous l'action des

forces de gravité et est caractérisé par une présence obligatoire d'une surface libre du courant.

Il faut souligner que l'écoulement de l'eau libre est un phénomène beaucoup plus complexe que l'écoulement en charge parce qu'une telle surface entraîne des variations des sections liquides suivant la longueur du courant même en présence d'obstacles insignifiants. Les écoulements peuvent être répartis suivant plusieurs paramètres comme le temps, l'espace, la viscosité,...etc. Cette répartition donne les différents types suivants (CHOW, V.T. (1972):

- Permanent ou non permanent si le paramètre est le temps.
- Uniforme ou non uniforme si le paramètre est l'espace.
- Torrentiel ou fluvial selon Froude.
- Laminaire ou turbulent selon Reynolds.

On s'intéressera aux paramètres temps et espace dans la suite de notre étude.

1.5.Régimes d'écoulement

L'écoulement d'un fluide réel dans un canal à surface libre engendre les forces suivantes:

Forces d'inertie.

Forces de gravité.

Forces de frottement (viscosité et rugosité).

Les équations réduites du mouvement font intervenir les coefficients où nombres adimensionnels suivants:

Le nombre de Froude, qui est le rapport entre les forces d'inertie et celles de gravité ou (GRAF, W. H. et ALTINAKAR, M. S. (2000)) :

$$Fr = \frac{Vc}{\sqrt{gLc}}$$

Le rôle de nombre de Froude est de permettre le classement des écoulements comme suit :

- Ecoulement fluvial $Fr < 1$,
- Ecoulement torrentiel $Fr > 1$,
- Ecoulement critique $Fr \equiv Frc = 1$.

Dans la pratique, on peut rencontrer ces trois types d'écoulement.

Le nombre de Reynolds, qui est le rapport entre les forces d'inertie et celles viscosité où :

$$Fr = (Vc.Lc)/V$$

Le rôle de nombre de Reynolds est de permettre le classement des écoulements comme suit:

-Ecoulement laminaire $Re < 500$.

-Ecoulement turbulent $Re > 2000$

-Transition $500 < Re < 2000$.

Les expériences avec différents canaux artificiels montrent que l'écoulement est turbulent dès que le nombre de Reynolds, Re , atteint des valeurs de deux milles (2000).

Dans la pratique, on ne rencontre en général que des écoulements turbulents, souvent rugueux.

Par conséquent, les effets du nombre de Reynolds, Re , et de nombre de Froude, Fr donnent quatre régimes d'écoulements :

-Fluvial - laminaire $Fr < 1, Re < 500$

-Fluvial- turbulent $Fr < 1, Re > 2000$

-Torrentiel - laminaire $Fr > 1, Re < 500$

-Torrentiel-turbulent $Fr > 1, Re > 2000$

1.6.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques notions sur les caractéristiques et la classification des écoulements à surface libre pour différents types des canaux

Des ouvrage de dissipation l'énergie

Un bassin de dissipation, fosse de dissipation ou bassin d'amortissement est un ouvrage ou parfois une configuration naturelle où plonge une chute d'eau après un déversoir, un seuil, ou une chute à l'intérieur d'une canalisation (ressaut hydraulique). On parle également de bassin de tranquillisation. Un seuil et sa fosse de dissipation Il est construit en vue de dissiper l'énergie de l'eau et d'éviter l'usure, l'érosion ou la destruction qu'elle pourrait provoquer à l'ouvrage ou à son environnement

Ressaut hydraulique

Le ressaut hydraulique est un phénomène couramment observé lors d'écoulements hydrauliques à surface libre tels des rivières ou des déversoirs. Lorsque le fluide subit une perte importante de vitesse, la surface de l'écoulement s'élève brusquement. L'énergie cinétique est transformée en énergie potentielle et en turbulence, qui se traduit par des pertes irréversibles de charge. Le flot, qui était rapide, ralentit et s'empile sur lui-même à la manière d'une onde de choc supersonique.

Chapitre 2

Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

2.1.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.

2.2. 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.

2.2.1. 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 2.1, 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 2.1, a) : 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 2.1, 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 2.1, 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.

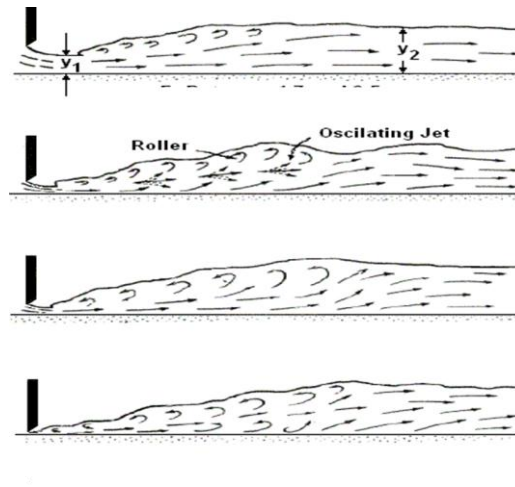


Figure 2.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). a) Pré-ressaut, b) Ressaut de transition, c) Ressaut stable, d) Ressaut agité.

2.2.2. 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 $M = 0$.

$$F^2 = \frac{Q^2}{(gb^2h^3)} \quad (1.1)$$

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

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 $F_1 > 2$:

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

2.2.3. 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.

2.2.3.1. 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:

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

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 $4 < F_1 < 12$.

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

2.2.3.2. 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.

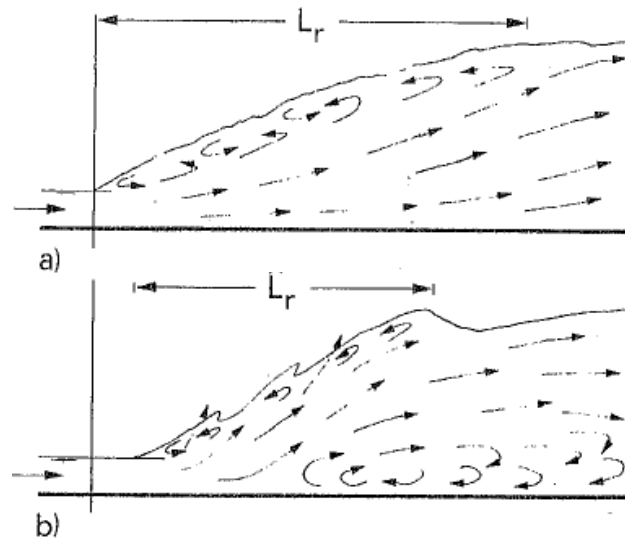


Figure 2.2 : Aspect du ressaut classique.

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 :

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

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

« 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 :

$$\lambda r^* = Lr^* / h1 = 8. (F1-1,5) ; 2,5 < F1 < 8 \quad (1.8)$$

2.2.4. Rendement du ressaut

Pour le cas du canal rectangulaire:

$$\eta = 1 + \frac{V \frac{F}{2Y}}{1 + \frac{F^2}{2}} \quad (1.9)$$

Bien que la relation (1.9) permet le calcul explicite du rendement η^* , Hager et Sinniger (1986) proposent une expression approchée, applicable pour $F1 > 2$:

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

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

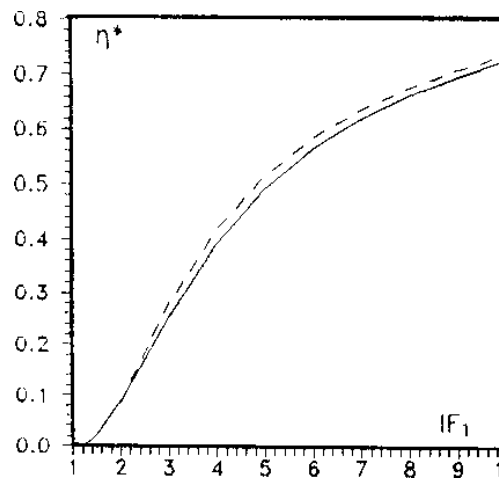


Figure 2. 3 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude $F1$. (—) Courbe tracée selon la relation (2.9). (---) Courbe tracée selon la relation (2.10)

La figure 1.3 montre d'une part que le rendement η^* du ressaut classique est supérieur à 50% pour $F1 \geq 5,1$ 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%.

2.3. 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 $\alpha > 0$. 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.

2.3.1. 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) classifie 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.

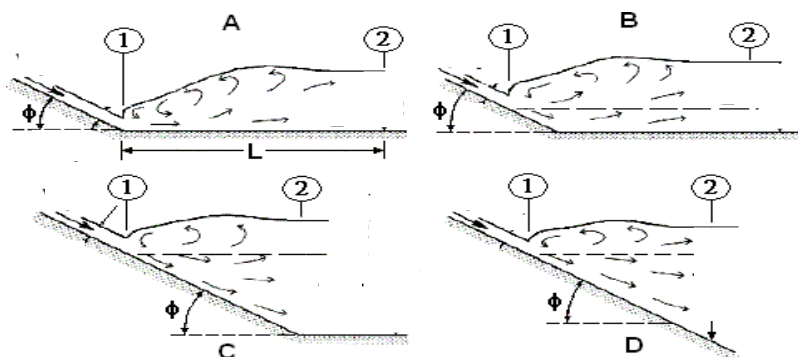


Figure 2.4 : Classification des ressauts inclinés selon Kindsvater (1944).

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.

1.3.2. 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:

$$Y = \frac{h}{h_1} = \frac{1}{2} [1 + 8F^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

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 ($F_1 = v_1 / g N_1^{1/2}$). Pour le canal horizontal ($\theta = 0$) F_{1S} tend vers F_1 .

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

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 :

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

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

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

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 : $\tan(\theta)=0,3(\theta < 17^\circ)$.

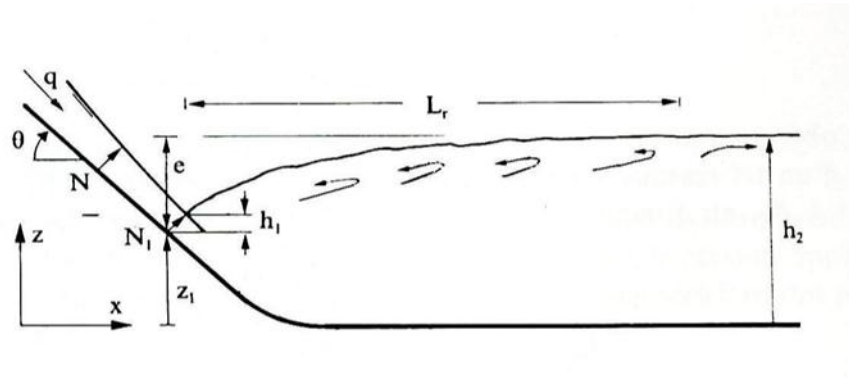


Figure 2.5 : Notation du ressaut incliné

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.

2.4. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINÉ À PENTE NÉGATIVE

2.4.1. Classification du ressaut à pente négative

Stevens (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:

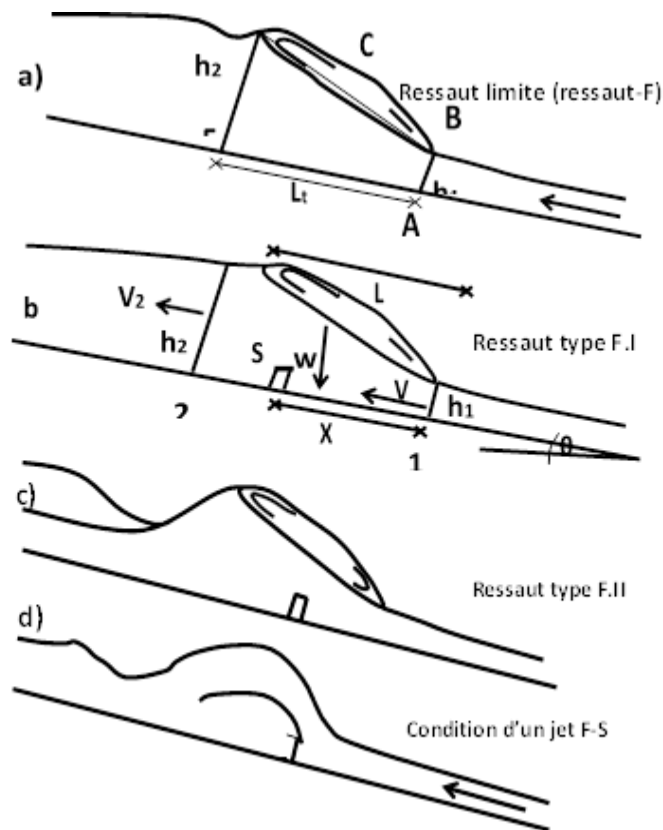


Figure 2.6 : Classification du ressaut à pente négative.

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.

2.4.2. 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.

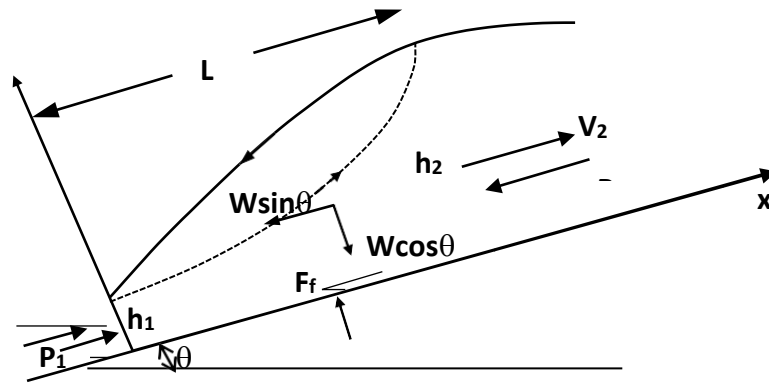


Figure 2.7 : Schéma de définition et volume de contrôle pour le ressaut à pente négative

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

$$\beta \frac{Q^2}{h_2} - \beta \frac{Q^2}{h_1} = P_1 - P_2 + W \sin \theta - F_f \quad (1.16)$$

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 :

$$W = \phi_s \gamma L r (h_1 + h_2) / 2 \quad (1.17)$$

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 :

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

Avec:

$$G^2 = (\beta F^2) / \left(1 - \frac{\phi_s L_j T_g \theta}{h_2 - h_1} - \frac{2F}{\gamma (h_2^2 - h_1^2) \cos \theta} \right) \quad (1.19)$$

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 pentes négatives ont été testées : $\tan \theta = -0,1, -0,167, -0,20$.

La figure 2.8 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.

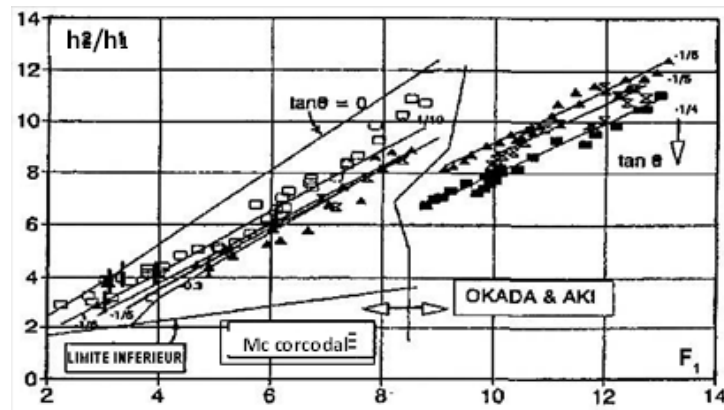


Figure 2.8 : Rapport des hauteurs conjuguées expérimentales et théoriques pour des cas

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). $\tan \theta = (+) 0,0$; ($\square$) $-0,1$; ($\blacktriangle$) $-1/6$; ($\blacktriangledown$) $-1/5$; ($\blacksquare$) $-1/4$; (—) 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 $\phi_s = 1,08 \pm 0,3$ pour les trois contre pentes étudiées. Ces valeurs sont différentes de celle de Okada et Aki (1959), qui a trouvé $\phi_s = 1,39 \pm 0,1$. 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 2.9 montre la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour les trois pentes négative.

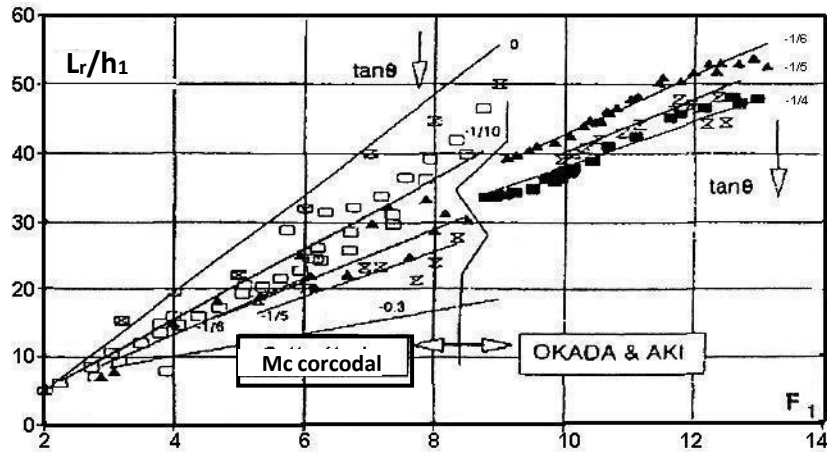


Figure 2.9 : Longueurs du rouleau mesurées dans les cas limites et les cas stabilisés de ressaut en pente négative. Provenant de l'étude de Mc Corcodal et Mohamed (1994) et de celle de Okada et Aki (1959). $\text{tg}\theta = (+)$ 0,0 ; $(\square)$ - 0,1 ; $(\triangle)$ -1/6 ; (∇) -1/5 ; $(\blacksquare)$ -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 :

- Ressaut limite selon Mc Corcodal et Mohamed ($F_1 < 9$) :
- $C_0 = 7,27$; $C_1 = 20,8$; $C_2 = 5$; $D_1 = 5$; $D_2 = 50$.
- Ressaut Stabilisé selon Okada et Aki ($9 < F_1 < 13$) :
- $C_0 = 7,2$; $C_1 = 21$; $C_2 = 19$; $D_1 = 7,7$; $D_2 = 175$.

2.5. 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 3

Ressaut hydraulique en canal triangulaire

3.1.Introduction

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

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

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

- Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° . Nous allons examiner l'étude de Debabeche et Achour (2006), qui a été consacrée à l'étude expérimentale de l'influence du seuil sur le ressaut hydraulique.

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

3.2.Ressaut hydraulique classique

3.2.1.Approche de Hager et Wanoschek (1987)

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

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

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

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

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

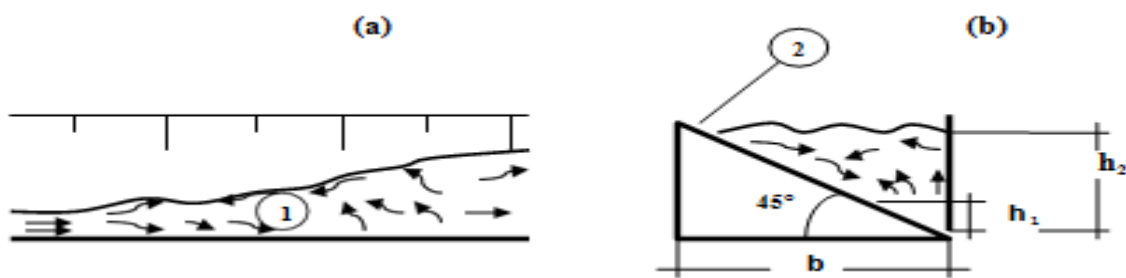


Figure 3.1 : Ressaut en canal semi-triangulaire selon Hager et Wanoschek (1987), (a) vue en plan, (b) coupe transversale. 1) Vue en plan du ressaut. 2) Paroi en PVC inclinée de 45°

3.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées

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

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

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

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

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

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

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

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

La relation (2.2) est représentée sur la figure (3.2), dans un système d'axes de coordonnées cartésiennes.

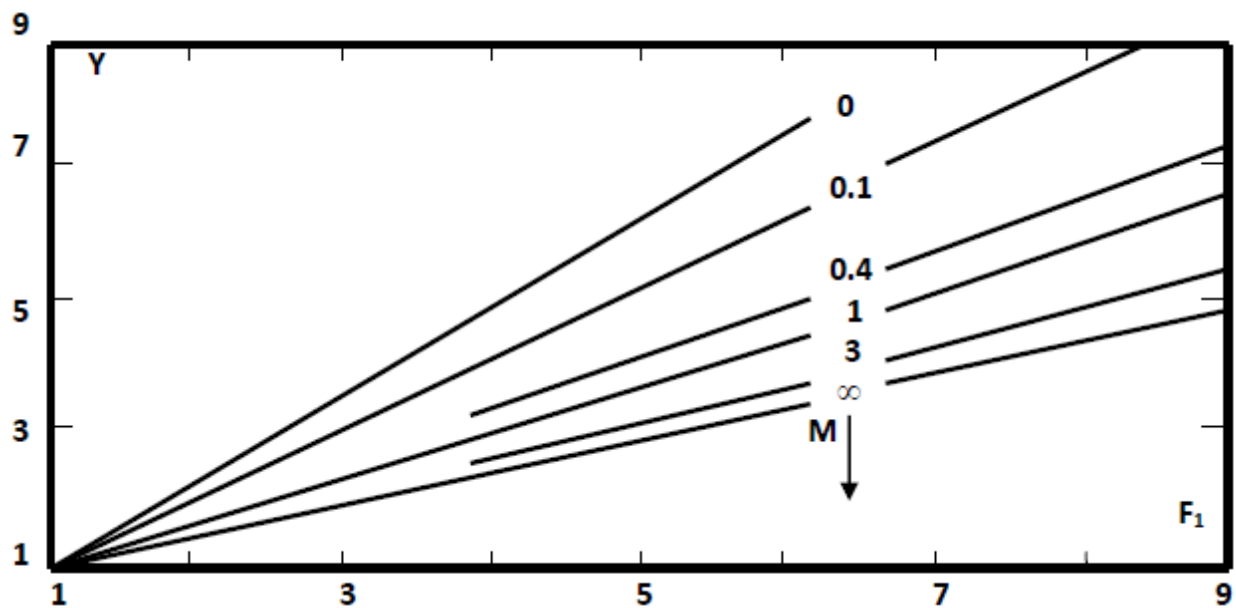


Figure 3.2 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et de la hauteur relative M . $M = 0$: Profil rectangulaire. $0 < M < \infty$: Profil trapézoïdaux.

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

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

$$F_1^2 = (2Y_T^2(Y_T^2 + Y_T + 1)) / 3(Y_T + 1) \quad (2.4)$$

L'indice " T " indique le profil triangulaire.

L'équation (2.4) montre que Y_T s'exprime de manière fortement implicite en fonction de $F_1 T$;

Hager et Wanoschek (1987) proposent alors la relation approchée :

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

La relation approchée (2.5) montre ainsi que $Y_T \sim F_1^{2/3}$

3.2.1.2. Longueur caractéristique du ressaut

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

Sur la figure (3.3) sont représentées les mesures expérimentales de Rajaratnam (1964) ($m = 0,58$) et celles de Hager et Wanoschek (1987) ($m = 1$), qui concernent la longueur relative L_r / h_2 en fonction de nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. Il apparaît ainsi que la longueur relative L_r / h_2 dépend exclusivement de m et de F_1 . La figure (3.3) montre également que la longueur relative L_r / h_2 croît au fur et à mesure que F_1 augmente et qu'elle décroît avec l'augmentation de m .

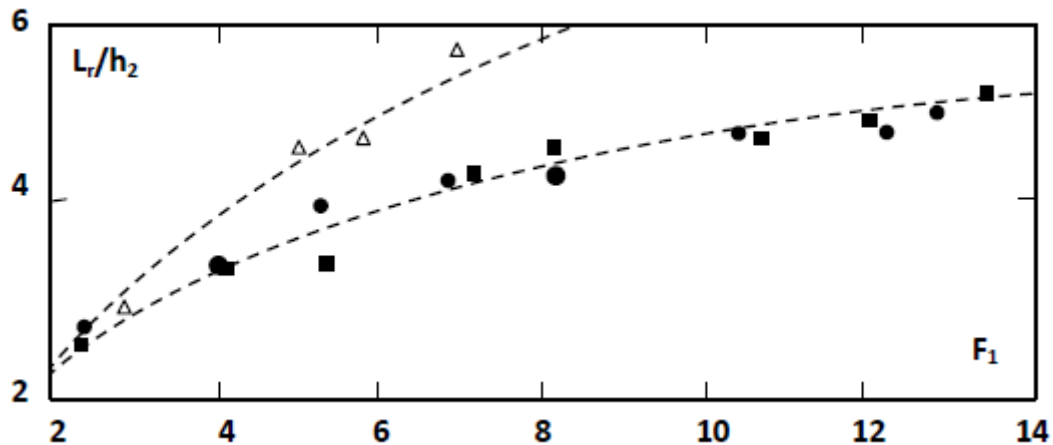


Figure 3.3 : Longueur relative L_r/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoschek (1987) ($m = 1$). (Δ) : $m = 0,58$ selon Rajaratnam (1964)

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

$$L_r/h_2 = 1.8(m)^{0.5} \cdot F_1^{0.4/m}, \quad 0.4 < m \leq 1 \quad (2.6)$$

Ainsi, dans la gamme pratique des nombres de Froude de l'écoulement incident tels que

$6 \leq F_1 \leq 9$, la longueur relative L_r/h_2 du rouleau, pour le cas d'un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° ($m = 1$), est telle que $3,7 \leq L_r/h_2 < 4,35$.

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

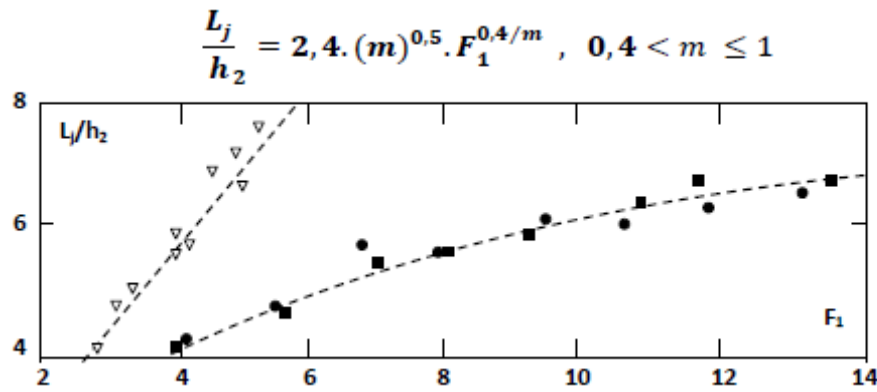


Figure 3.4 : Longueur relative L_j/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoschek (1987) ($m=1$), (∇) : $m = 0,44$ selon Argyropoulos (1962)

3.2.1.3. Profil de surface généralisé du ressaut

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

correspondant à $X = 0$, nous pouvons écrire que $h(x) = h_1$ et $y = 0$. Par contre, pour $x = L_j$, correspondant à $X = 1$, nous pouvons écrire que $h(x) = h_2$ et $y = 1$.

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

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

$$y(X) = (1 + X) \cdot \tanh(X) \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (2.7) \text{ " tanh " désigne la tangente hyperbolique.}$$

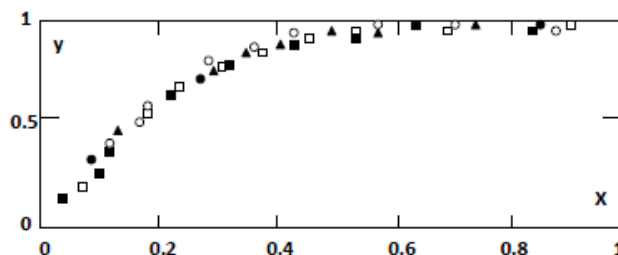


Figure 3.5 : Profil de surface généralisé $y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ($m = 1$), selon Hager et Wanoschek (1987).

La figure (3.5) montre que le profil de surface généralisé est pratiquement linéaire pour la gamme $0 \leq X \leq 0,2$. La droite, représentant la partie linéaire du profil passe par le point des coordonnées (0,0) et coupe approximativement l'axe parallèle à X au point des coordonnées (0,4,1) ;

le paramètre β figurant dans la relation (2.7) a donc pour valeur :

$\beta = (1-0)/(0,4-0) = 1/0,4$, soit $\beta = 2,5$. Ainsi, le paramètre α peut être déterminé en écrivant que $y(X = 1) = 1$, soit $1 = (1+\alpha).\tanh(2,5)$, par suite $\alpha = 0,014$. Le profil de surface généralisé admet donc pour équation :

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

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

3.3. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil

3.3.1. Approche de Debabeche et Achour (2007)

3.3.1.1. Position du problème

Dans le cas où un seuil continu est en travers de l'écoulement, les conditions de celui-ci ainsi que la position et la hauteur du seuil, peuvent conduire à deux configurations du ressaut. La première correspond à la formation complète du ressaut à l'amont immédiat du seuil et le ressaut est dit contrôlé (figure 3.6.a), la deuxième correspond à la formation partielle du ressaut de part et d'autre du seuil, le ressaut est alors dit forcé. Pour un nombre de Froude F_1 et une hauteur de seuil s donnés, la variation du niveau de la hauteur d'eau aval est conditionnée par le déplacement vertical d'un second seuil à paroi mince située à l'extrémité aval du canal. Selon la position verticale de ce dernier, trois cas de figure de la surface libre à l'aval peuvent apparaître, correspondants au ressaut forcé de type A, le ressaut forcé type B et de type B-min (figure 3.6.b). Ce dernier type du ressaut

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

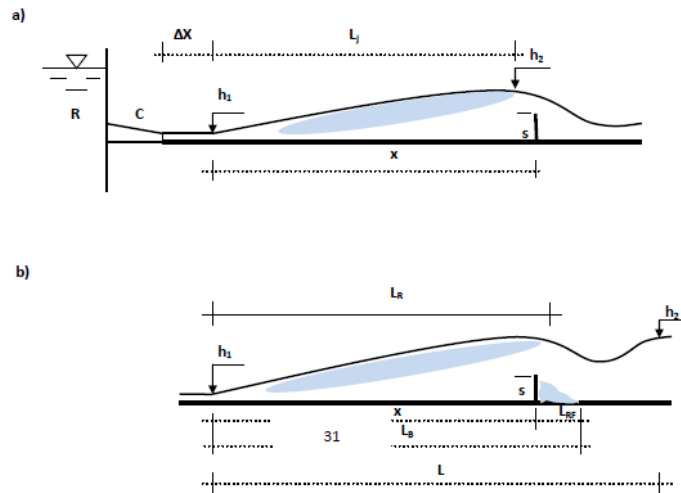


Figure 3.6 : a) Ressaut contrôlé. b) Ressaut forcé de type B-min

h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x position du seuil par rapport au pied du ressaut, L_j longueur du ressaut, L_{rf} longueur du rouleau de fond, L_B distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval, L distance entre le pied du ressaut et la position où h_2 devient constante. ΔX distance séparant le convergent du pied du ressaut, C convergent, R réservoir.

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

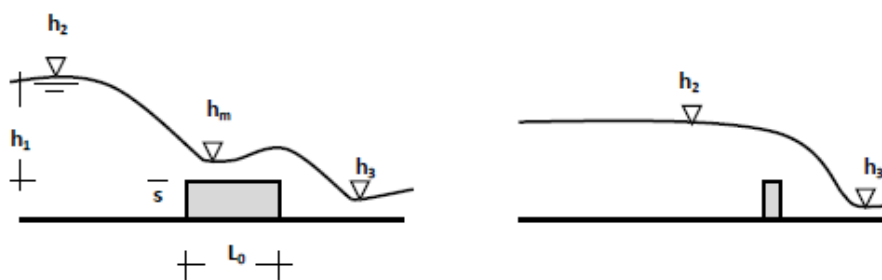


Figure 3.7 : Profil de l'écoulement au-dessus des seuils.

a) Seuil à paroi épaisse, b) seuil à paroi mince

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

Le ressaut n'étant pas encore forcé, théoriquement le seuil ne devrait avoir aucun effet réducteur sur la hauteur finale h_2 du ressaut, puisque celui-ci n'est pas encore forcé. En d'autres termes, la hauteur finale h_2^* du ressaut classique triangulaire doit être égale à la hauteur finale h_2 du

ressaut contrôlé par seuil, sous les mêmes conditions de l'écoulement incident. La figure (2.8) montre la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 , d'une part, pour le cas du ressaut contrôlé par le seuil à paroi mince et épaisse, et d'autre part pour le ressaut forcé. Nous avons également représenté la variation du rapport Y^* théorique du ressaut classique triangulaire issu de l'app

lication de l'équation de quantité de mouvement, soit :

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

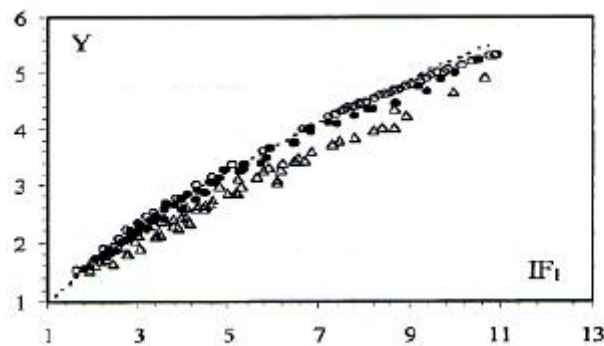


Figure 2.8 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m = 1$: (o) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (•) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) Ressaut forcé par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

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

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

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

Dans toute la gamme de $F1$ que nous avons testé, c'est-à-dire $1,6 \leq F1 \leq 11$, un ajustement des valeurs expérimentales a montré que la variation de $Y = f(F1)$ est de type logarithmique :

$$Y = 1 + \alpha \cdot \ln [(F1 + 4)/5] \quad (2.10)$$

$\alpha = 3,96$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. $\alpha = 3,78$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. $\alpha = 3,33$ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince.

La condition de criticité est ainsi satisfaite puisque : $F1 = 1, Y = 1$

L'analyse des mesures expérimentales a montré la possibilité de corréler le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil et la hauteur relative S de celui-ci, dans toute la gamme $1,60 \leq F1 \leq 11$. La figure (3.9) montre la variation expérimentale de Y en fonction de S

pour le cas du ressaut contrôlé par seuil à paroi mince et épaisse, et le cas d'un ressaut forcé par seuil mince. Il ressort que cette variation suit une loi linéaire et un ajustement a permis d'écrire avec une bonne approximation, ainsi bien pour le ressaut contrôlé (seuil à paroi épaisse) que pour le ressaut forcé, que :

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

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

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

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

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

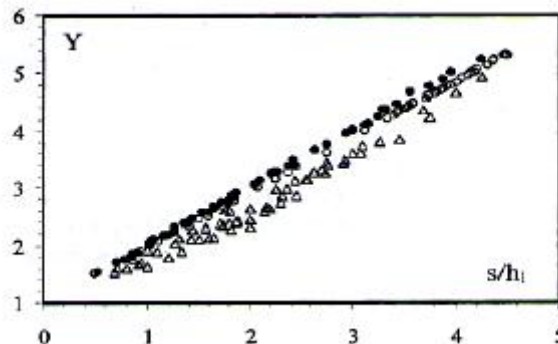


Figure 3.9 : Variation expérimentale du rapport Y hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative S du seuil.

Points expérimentaux pour $m = 1$: ($\circ$) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. ($\bullet$) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) Ressaut forcé par seuil à paroi mince.

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

$$S = . Ln [(F1+ 4)]/5 \quad (2.12)$$

$\gamma = 4,13$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

$\gamma = 3,71$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse.

$\gamma = 4,06$ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince.

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

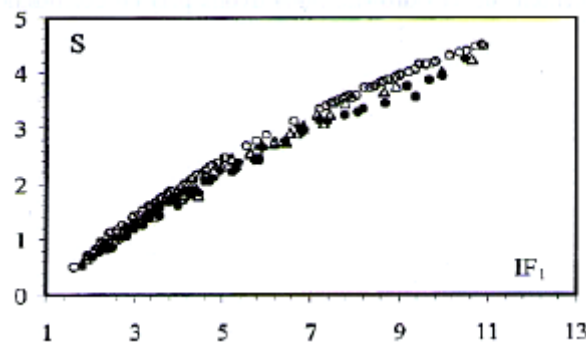


Figure 3.10 : Variation expérimentale de la hauteur relative $S = s / h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude $F1$, pour un ressaut évaluant dans un canal triangulaire. Point expérimentaux pour $m = 1$: (○) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (Δ) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (•) Ressaut forcé par seuil à paroi mince.

3.3.1.3. Influence du seuil sur la longueur relative du bassin

Comme il est bien illustré dans la figure (3.6), la notion de longueur de bassin diffère pour les trois types du ressaut.

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

La figure (3.11) montre la variation expérimentale de la longueur relative $X = x / h_1$ du bassin du ressaut contrôlé par seuil mince, par seuil épais et $X = LB / h_1$ du ressaut forcé par seuil mince

en fonction du nombre de Froude F_1 . Un ajustement, pour les trois types du ressaut, a une équation de type puissance de la forme :

$$X = a \cdot F_1^{0.4} - b \quad (2.13)$$

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

Tableau 3.1 : Les constantes a et b de l'équation (2.13)

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

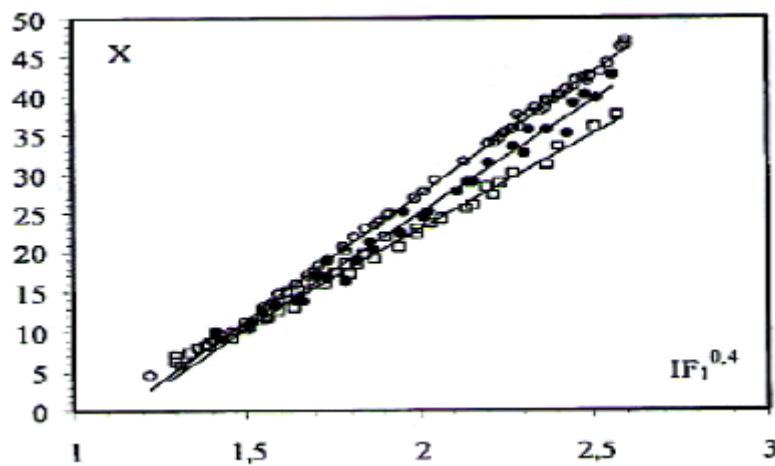


Figure 3.11 : Variation expérimentale de la longueur relative X du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 , pour un ressaut évaluant dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m=1$: ($\circ$) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. ($\bullet$) Ressaut forcé par seuil à paroi mince. (Δ) Courbe d'ajustement.

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

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

3.4. CONCLUSION

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

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

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

Chapitre 4

Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

4.1.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).

4.2.Approche de Hager et Wanoschek (1989)

4.2.1. 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 $F_1 < 4$.

4.2.2. 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.

4.2.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure 4.1 montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiales et finale 1 et 2.

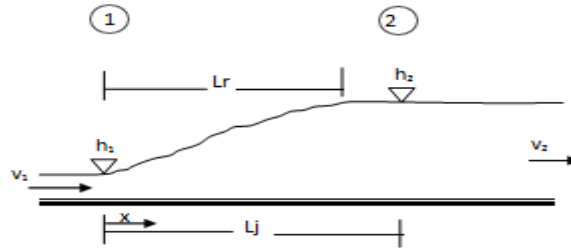


Figure 4.1 : Ressaut hydraulique classique.

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 :

$$P_1 = \varpi h_1 A_1 \quad (3.3)$$

$$P_2 = \varpi h_2 A_2 \quad (3.4)$$

$\varpi = \rho \cdot g$ désigne le poids spécifique du liquide, ρ est la masse volumique du liquide, h_1 et 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 :

$$h_1 = h_2/6 \times 3b + 2mh_1/A_1 \quad (3.5)$$

$$h_2 = h_2/6 \times 3b + 2mh_2/A_2 \quad (3.6)$$

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

$$b \cdot h_1^2/2 + mh_1^3/3 + Q^2/g(bh_1 + mh_1) = b \cdot h_2^2/2 + mh_2^3/3 + Q^2/g(bh_2 + mh_2) \quad (3.7)$$

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 :

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

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

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

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

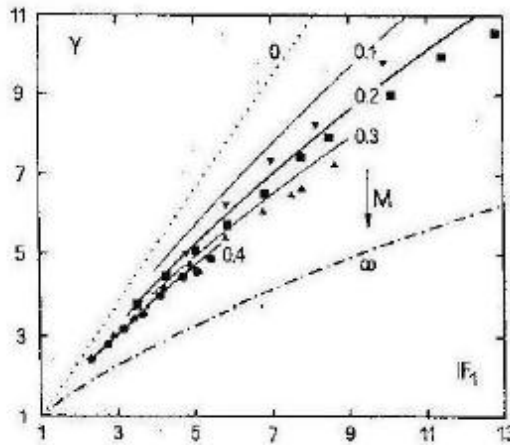


Figure 4.2 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M $0 < M < \infty$ profil trapézoïdaux. $M=0$: profil rectangulaire. $M \rightarrow \infty$: profil triangulaire.

La Figure 4.2 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.

4.2.4. Longueurs caractéristiques du ressaut

4.2.4.1. 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 4.3 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

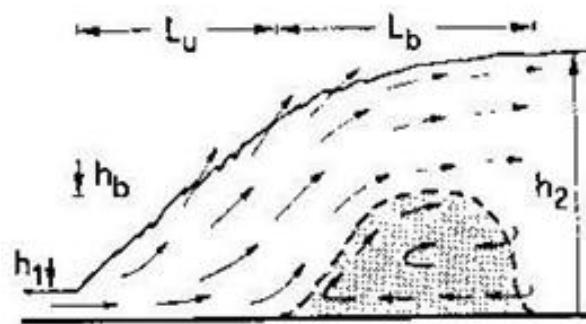


Figure 4.3: schéma de définition

Les figures 4.4.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.

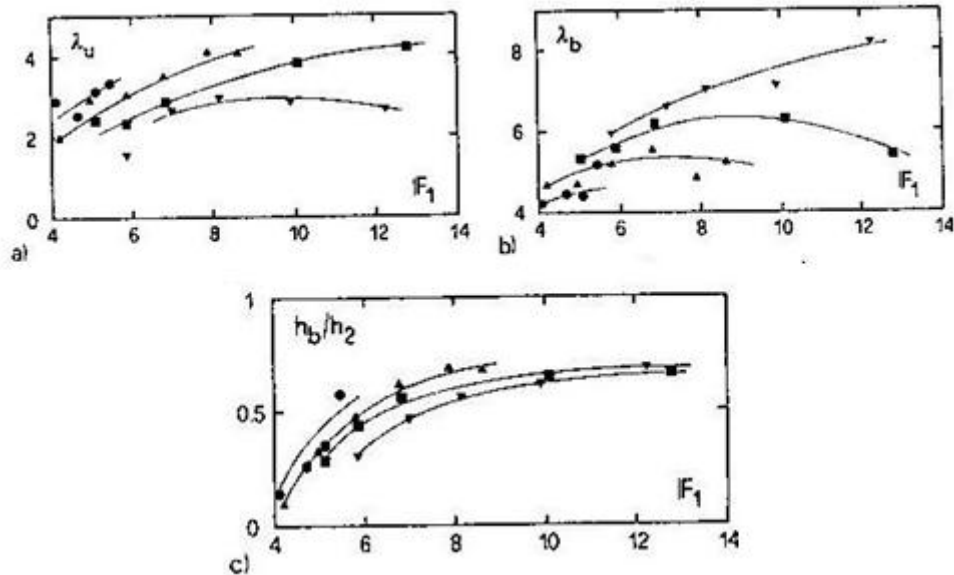


Figure 4.4 : caractéristique principale du rouleau de fond: a) distance d'approche,

a) longueur maximale, c) hauteur maximale.

La figure 4.4 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 .

4.2.4.2. 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.

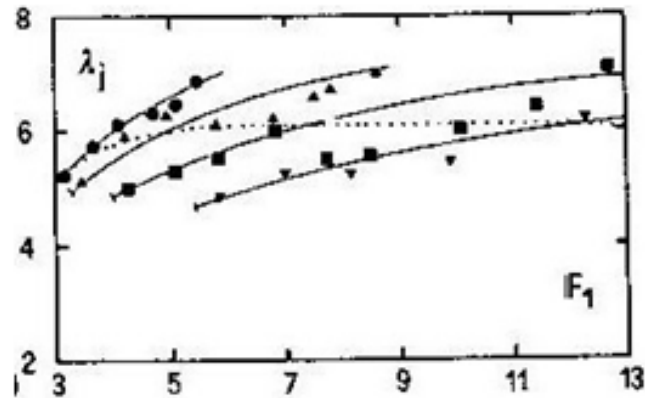


Figure 4.5: longueur relative λ_j du ressaut en fonction de F_1 et de M

La figure 4.5 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 .

4.2.4.3. Rendement du ressaut

La figure 4.6 montre la ligne de charge totale le long de la longueur L_j sur laquelle s'étend le ressaut classique.

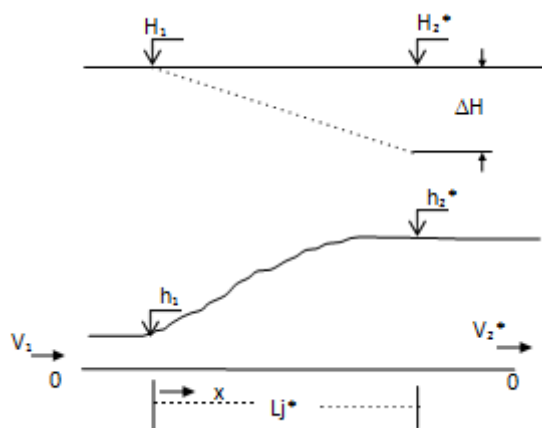


Figure 4.6 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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

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

Tandis que la charge totale dans la section finale est :

$$H_2^* = h_2^* + \alpha \frac{v_2^2}{2g} \quad (3.11)$$

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 :

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

où $A = bh_1 + mh_1^2$ et $A = bh_2^* + mh_2^{*2}$

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

$$F_1^2 = [Q^2(1+2M) / gb^2h_1^3(1+M)^3]$$

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

$$\eta = 1 - [Y + (F_1^2(1+M)^3 / 2Y^2(1+2M)(1+2M)(1+Y M)^3) / [1 + (F_1^2(1+M)/2(1+2M))]] \quad (3.14)$$

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

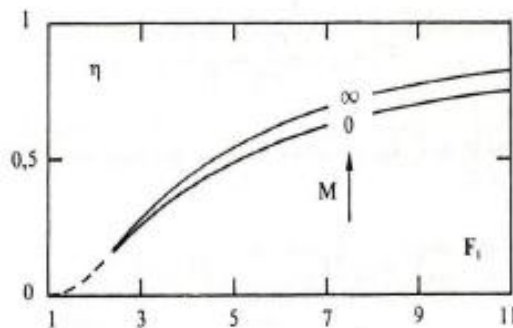


Figure 4.7 : Rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude.

$M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire

La figure 4.7 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.

4.2.4.4. 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.

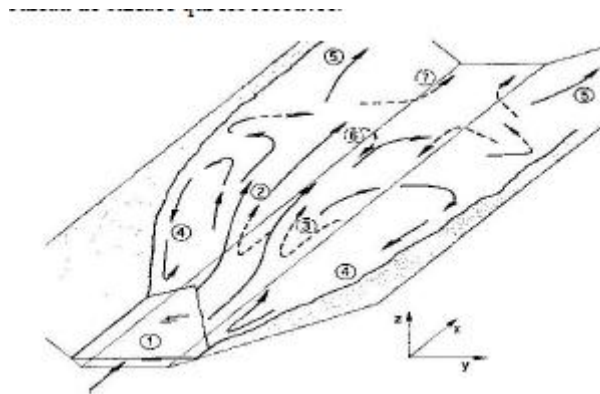


Figure 4.8 : Illustration schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal. (→) courants de surface, (- ->) courant de fond.

La figure 4.8 illustre un tracé schématique des caractéristiques de l'écoulement principal dans un ressaut trapézoïdal. La grande vitesse de l'écoulement (1) est soulevée en l'air et forme une zone éblouissante (2) en raison de la présence d'une zone de séparation de fond (3), dénommée 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 forme 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 spatiaux. 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.

4.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOIDAL A PENTE POSITIVE (Riguet, 2012)

4.3.1. ANALYSE THEORIQUE

4.3.1.1. 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

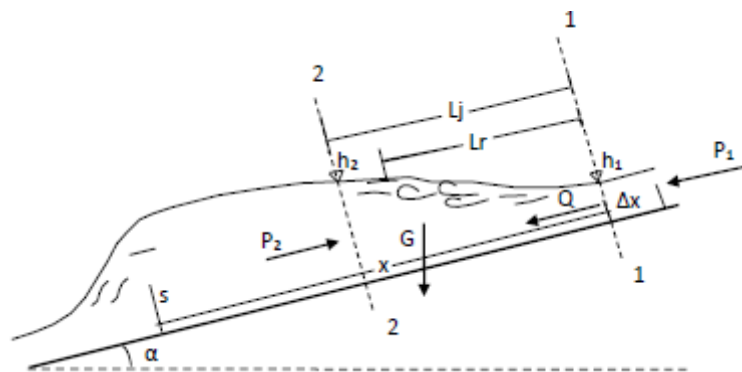


Figure 4.9 : Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal incliné à pente positive

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:

$$P_1 = \omega h_{c1} A_1, P_2 = \omega h_{c2} A_2, G = \omega V \quad (3.16)$$

Où: $\omega = \rho g$ représente le poids spécifique du liquide en écoulement, h_{c1} et h_{c2} représentent

respectivement les distances des centres de gravité des sections transversales 1 et 2 à partir de la surface libre de l'écoulement où :

$$hc_1 = h_1^2/6x3b+2mh_1/A1x \cos \alpha \quad hc_2 = h_2^2/6x3b+2mh_2/A2x \cos \alpha \quad (3.17)$$

A1 et A2 représentent respectivement l'aire de la section mouillée 1 et 2

$$\text{Où: } A1 = bh_1 + mh_1^2 \quad (3.18)$$

$$A2 = bh_2 + mh_2^2 \quad (3.19)$$

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.

$$V = kbh_1[M(Y^2+1)+Y+1/2].LJ \quad (3.20)$$

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

$$\frac{Q^2}{g(bh_1 + mh_1^2)} + \frac{h_1^2 \cos \alpha}{6} (3b + 2mh_1) + \frac{1}{3} Kbh_1L_j [(Y+1) + M(Y^2+1)] \sin \alpha = \frac{Q^2}{g(bh_2 + mh_2^2)} + \frac{h_2^2 \cos \alpha}{6} (3b + 2mh_2) \quad (3.21)$$

Le nombre de Froude F1 de l'écoulement incident pour une section triangulaire s'écrit alors comme suit :

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

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

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

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

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

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

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 :

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

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.

4.3.2. ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'EQUATION SEMI THEORIQUE

4.3.2.1. Estimation du coefficient k de correction

la relation (3.23) peut être reformulée comme suit :

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

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 $k=1.09$.

4.3.2.2. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F1 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:

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

$$1.49 \leq F_1 \leq 12.52. \quad (3.26)$$

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

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

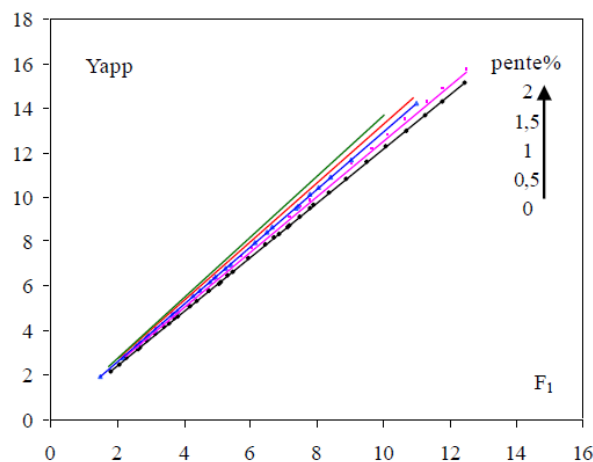


Figure 4.10: Variation expérimentale de $Y(F_1)$ pour différentes valeurs de $\tan(\alpha)$. (—) courbe tracé selon la relation (3.26).

4.3.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

4.3.3.1. Longueurs caractéristiques du ressaut

4.3.3.1.1. 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.

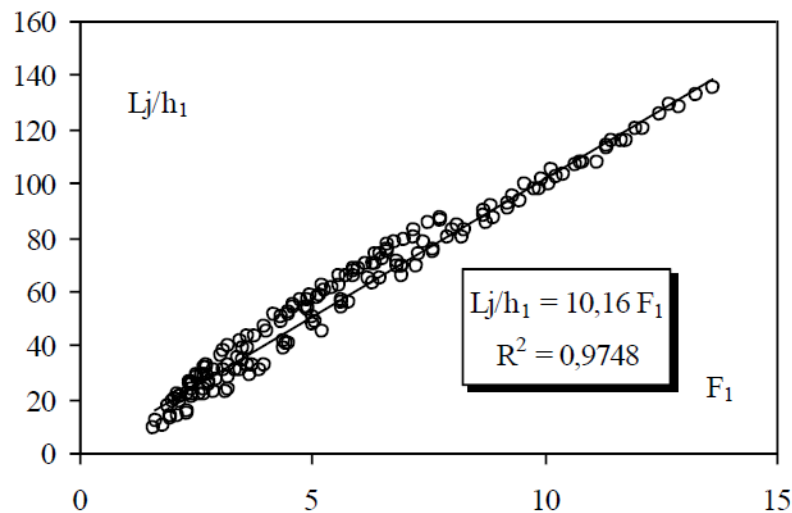


Figure 4.11 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 < \tan(\alpha) < 0,02$.

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 $1,6 < F_1 < 13,64$

4.3.3.1.2. 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 4.12 montre la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

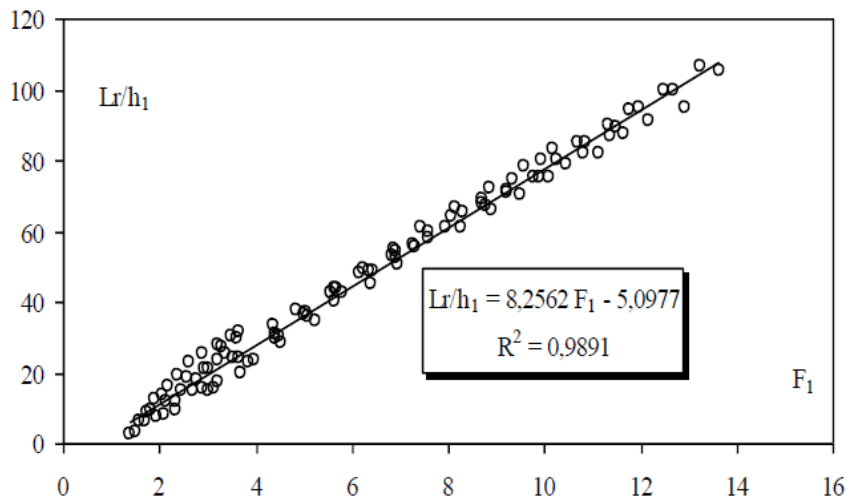


Figure 4.12 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,02$.

La figure 4.12 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 :

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

Pour $1,37 < F_1 < 13,64$

4.4. 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 $f(F1, Y, \lambda, M, \alpha) = 0$ 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

PARTIE II

**Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans
un canal rectangulaire a pente variable**

INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE

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

Cette étude a pour principal objectif d'analyser et de déterminer l'effet de la pente du canal sur les caractéristiques de ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à pente variable. L'étude expérimentale a été menée sous cinq hauteurs initiales : h_1 (mm) = 1.2.3.4.6.7.8mm. Pour chaque hauteur h_1 choisie, on donne au canal trois positions d'inclinaison d'angle θ correspondant chacune à une valeur bien déterminée de la pente positive, de sorte que la tangente de l'angle d'inclinaison θ par rapport à l'horizontal, prend les valeurs suivantes (en %) : 1.0.0.2. Une gamme assez pratique de nombres de Froude incident a été ainsi obtenue : $2 < F_1 < 14$.

Cette partie est divisée en deux chapitres :

- Le premier chapitre de cette partie de notre étude sera consacré à la description du modèle expérimental qui a servi de base à l'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à pente variable.
- Le deuxième chapitre aura pour objectif d'étudier par voie expérimentale les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire à pente positive et celle du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire à pente variable. L'expérience sera faite, pour les trois types de pente (pente positive-pente négative. Pente nulle).

.

CHAPITRE 1

Présentation du matérielle

I.1. Introduction :

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

I.2. Description du modèle :**I.2.1. Description du canal :**

La figure représente l'ensemble du banc d'essais. Il est constitué d'un canal de forme rectangulaire de 2.5 m de longueur, permettant la visualisation de l'écoulement.

Le canal est alimenté en circuit fermé par une pompe axiale. Celle-ci aspire de l'eau d'un réservoir ouvert de récupération et la refoule dans un bassin, également ouvert, alimentant le canal. Le système bassin de récupération pompe bassin d'alimentation est relié par une conduite circulaire en PVC. Le bassin de récupération est doté d'un tranquillisateur d'eau spécialement aménagé afin d'éviter les perturbations de la surface libre qui peuvent perturber le fonctionnement de la pompe.

Le réglage des débits volumes s'effectue par manipulation de la vanne .

Le canal de mesure a été conçu au laboratoire du département d'hydraulique de l'université de M'sila.



Photographie 1.1: Le banc d'essai mis en expérience

1.2.2 Caractéristiques géométriques du canal

C'est un canal de forme rectangulaire a plusieurs pentes I , et le tableau ci-dessous pressante leur dimensions :

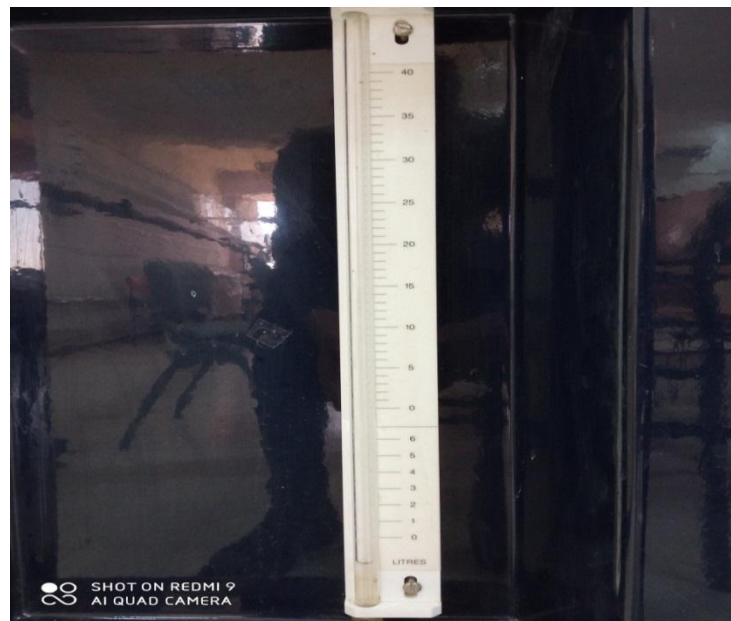
Tableau 1.1 : Caractéristiques géométriques du canal

Dimension [cm] Dispositif	Longueur	Largeur	Profondeur
Canal	2500	7.5	23

1.3. Appareillage de mesure

1.3.1. Mesure de débit

En banc d'essai il y a un tube qui mesure le volume d'eau .on mesure le volume puis on le divis par le temps représente par le photo



Photographie 1.2 : Tube de lecture le volume d'eau

1.3.2 Mesure de la pente

Dans cette partie de la composition de laboratoire peut contrôler manuellement l'inclinaison grâce à la direction rotative installé sur un appui fixé *Figure V.6*, s'accompagner une échelle des pentes *Figure V.7*, a une valeur maximale est égale à : $I_{max} = 3\%$.



Photographie 1.3 : Dispositif de variation de pente



Photographie 1.4 : Echelle de mesure

Limnimétrie :

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

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

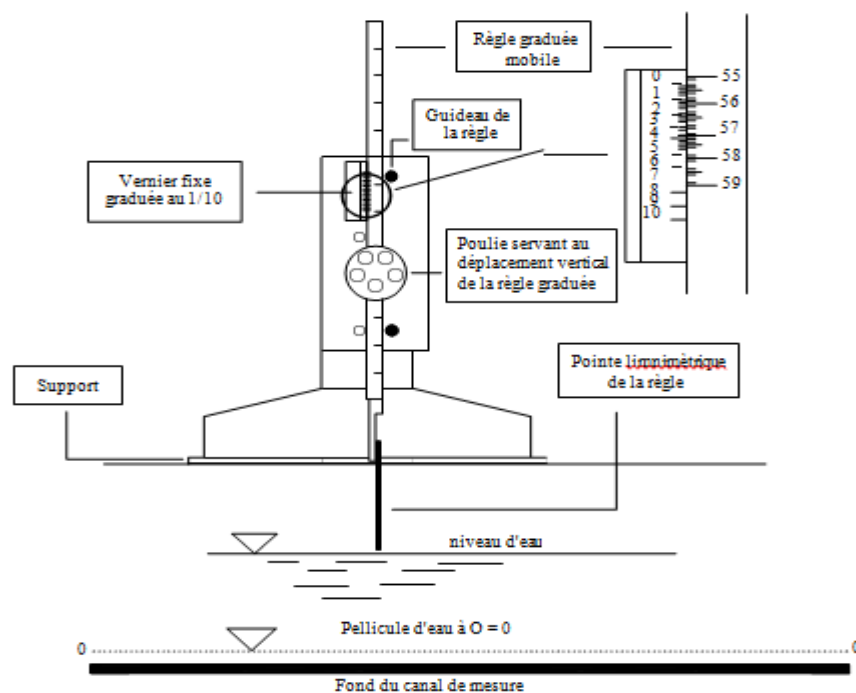
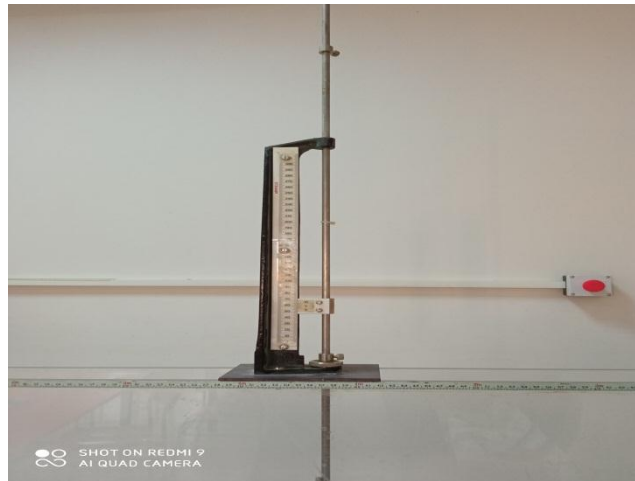


Figure 1.5: Schéma de limnimétrie



Photographie1.6 : Limnimétrie

1.4.Résultats expérimentaux :

1.4.2.Procédure expérimentale :

Les caractéristiques étudiées dans un ressaut hydraulique contrôlé par seuil à pente variablesont : 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 canal par rapport à l'horizontal, la longueur (L_r) du rouleau, mesurée à la fin de la formulation du ressaut et la longueur (L_j) du ressaut, mesurée dans le même endroit de la hauteur finale (h_2).

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

L'étude expérimentale a été menée sous huit hauteurs initiales : h_1 (mm) = 1.2.3.4.5.6.7.8. Pour chaque hauteur h_1 choisie, on donne au canal trois positions d'inclinaison d'angle α correspondant chacune a une valeur bien déterminé de la différent pente de sorte que la tangente de l'angle d'inclinaison α par rapport à l'horizontal, prend les valeurs suivantes (1).(0).(0.2). Une gamme assez pratique de nombres de Froude incident a été ainsi obtenue : $4 < F_1 < 9$.

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

Chapitre 2

Analyse des résultats expérimentale

2 Analyse des résultats expérimentaux

2.1 Les valeurs de mesures :

2.1.1 Canal à pente nulle

Tableau 2.1 : Tableau de caractéristique de ressaut hydraulique a pente nulle

$Q(m^3/s)$	$h_{ov}(m)$	$h_1(m)$	$h_2(m)$	$L(m)$	$L_r(m)$	$L_j(m)$
0,0003	0,001	0,003	0,0345	0,365	0,12	0,35
0,00041	0,002	0,004	0,0385	0,395	0,17	0,33
0,00053	0,003	0,005	0,0477	0,455	0,21	0,32
0,00059	0,004	0,006	0,05	0,458	0,22	0,3
0,00075	0,005	0,007	0,052	0,446	0,215	0,29
0,00084	0,006	0,008	0,0532	0,44	0,19	0,24
0,00001	0,007	0,009	0,0545	0,426	0,185	0,235
1,00003	0,008	0,01	0,056	0,41	0,18	0,22

Tel que : h_{ov} : Hauteur de ouverture de la vanne écluse .



Photographie 2.1 : Ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire a pente nulle

La photographie montre que le profil liquide s'y écoulant est presque parallèle au fond, pour peu que la longueur L du seuil soit suffisante. Donc, la notion de seuil épais est également liée aux caractéristiques de l'écoulement et suivant la classification de Rao et Murlidhar (1963)

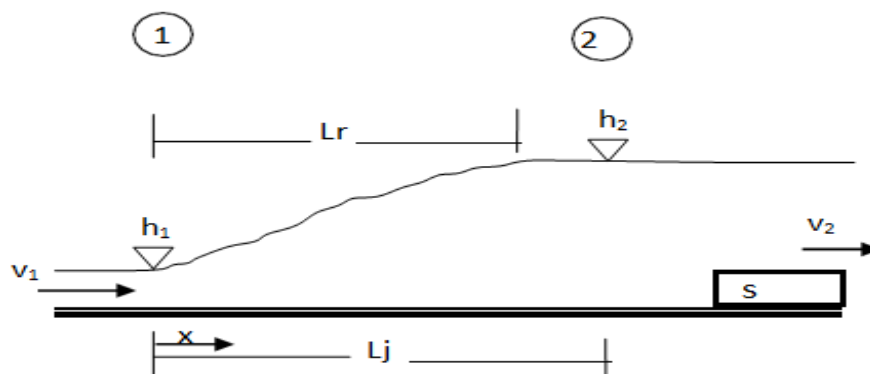


Figure 2.2 : Schéma représentatif d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire a pente nulle

2.1.2 Canal à pente $I = 1\%$

Tableau 2.2 : Tableau de valeurs des caractéristiques de ressaut hydraulique a pente positive

$Q(m^3/s)$	$h_{ov}(m)$	$h(m)$	$h_2(m)$	$L(m)$	$L_r(m)$	$L_j(m)$
0,000251	0,001	0,003	0,04	0,365	0,12	0,275
0,000395	0,002	0,004	0,0425	0,41	0,145	0,236
0,00046	0,003	0,005	0,0432	0,415	0,152	0,233
0,00057	0,004	0,006	0,0458	0,42	0,155	0,226
0,0007	0,005	0,007	0,0493	0,426	0,16	0,21
0,00083	0,006	0,008	0,0495	0,432	0,155	0,2
0,001	0,007	0,009	0,052	0,445	0,15	0,196
0,0011	0,008	0,01	0,054	0,454	0,144	0,17



Photographie 2.3 : Ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire a pente positive

La photographie ci-dessus montre que la pente du canal a un effet considérable sur l'évolution du ressaut hydraulique, juste au pied de la vanne éclose. Cette observation a un intérêt de plus de minimiser la longueur de bassin d'amortissement. On voit aussi, que le profil liquide s'écoulant est parallèle au toit du seuil de hauteur S franchi par un écoulement en régime critique de profondeur h_c .

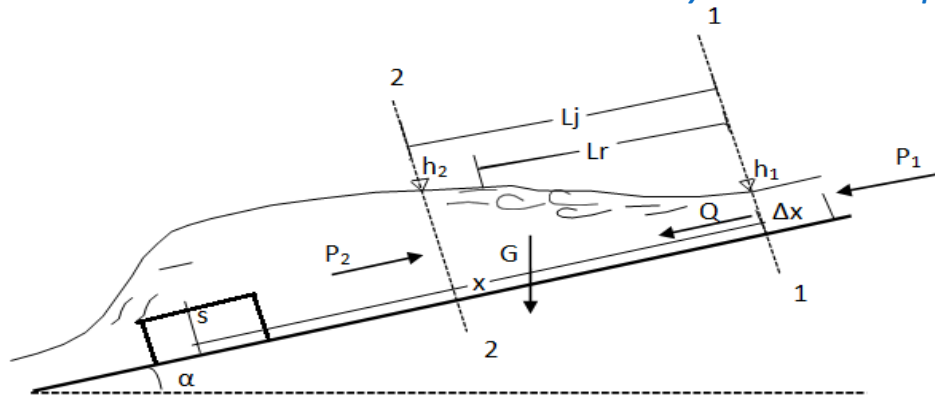
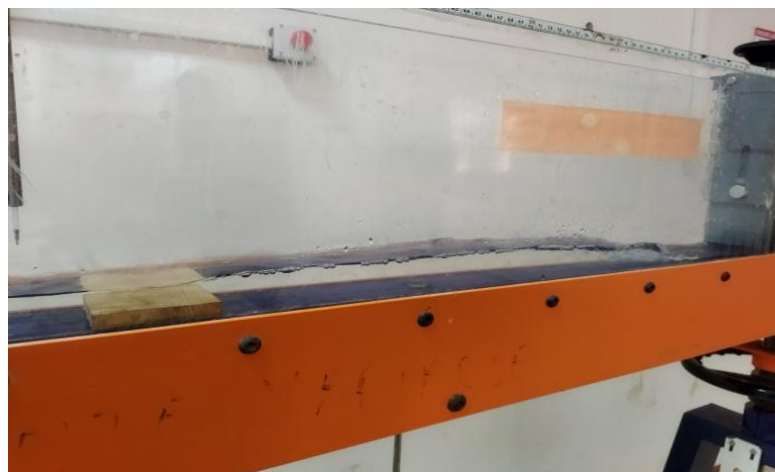


Figure 2.4 : Schéma représentatif d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire à pente positive

2.1.3 Canal à contre pente

Tableau 2.3 : Tableau de valeurs des caractéristiques de ressaut hydraulique à pente négative (contre pente) .

$Q(m^3/s)$	$h_{ov} (m)$	$h(m)$	$h_2(m)$	$L(m)$	$L_r(m)$	$L_j(m)$
0,0003	0,001	0,003	0,033	0.58	0.013	0.485
0,00041	0,002	0,004	0,0375	1,12	0.02	0.93
0,00053	0,003	0,005	0,044	1,38	0.0213	1,2
0,00058	0,004	0,006	0,046	1,54	0.0215	1,5
0,00071	0,005	0,007	0,05	1,85	0.022	1,8
0,00083	0,006	0,008	0,053	1,76	0.025	0.2
0,00091	0,007	0,009	0,056	1,73	0.0255	2,04
0,001	0,008	0,01	0,057	1,72	0.0258	2,1



Photographie 2.5 : Ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire à contre pente

La photographie ci-dessus à montrer que au cours de divers essais expérimentaux, il est apparu que le ressaut hydraulique peut rapidement disparaître du bassin amortisseur lorsque le nombre de Froude incident dépasse une valeur limite. Il ne réapparaît alors que pour un débit, et par conséquent pour un nombre de Froude incident, nettement inférieur à celui pour lequel il existait.

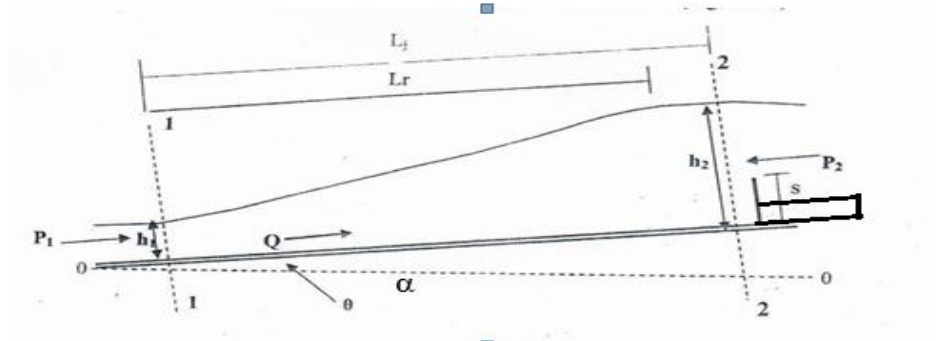


figure 2.6 : Schéma représentatif d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire à contre pente

2.2 Variation de hauteur de seuil par rapport hauteur h_1 en fonction de nombre de Froude pour la pente nulle

Les condition de déroulement de ressaut hydraulique évoluant en aval de la vanne sont satisfait sur le plan matérielle d'avoir l'installation d'une contrôle effectué pour un seuil épais inséré au droit aval de la vanne a fin d'engendré un ressaut hydraulique satisfait les condition hydraulique tell que la notion de seuil épais est égal lié au caractéristique du écoulement.

Dans ce contexte la condition établie par Rao et Murlidhar (1963) est considéré vérifiable dans notre essai lorsque $0,1 < (h_2-s)/L < 0,35$, a titre de concordance de nous essai par rapport effectué par les auteur (**Forster Skrinde**, 1959) la courbe s/h_1 en fonction de nombre de Froude F_r tracé selon les valeur suivant

tableau 2.4 : Valeur de s/h_1 et nombre de Froude

F	S/ h_1
7,77	7,66666667
6,9	5,75
6,38	4,6
5,56	3,83333333
5,45	3,28571429
5	2,875
4,92	2,55555556
4,89	2,3

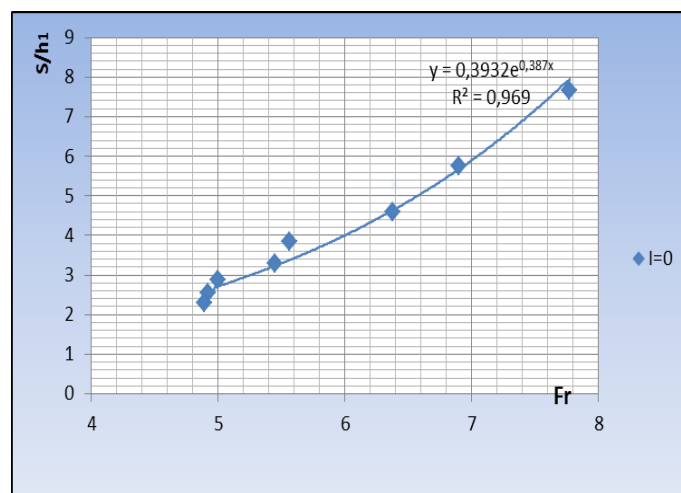
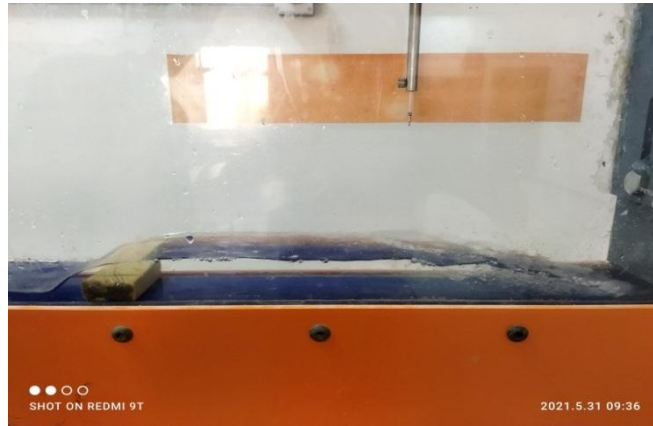


figure 2.7 : La courbe de s/h_1 en fonction de nombre de F_r

Alors l'allure de notre graphe est semblable en celle établie par les auteur (**Forster et Skander** 1950)

L'autre part ces résultats a nous permet facilement a donné une classification selon (**Bradly Peterka 1957**) tell que les valeur de nombre de froude sont comprise dans l'intervalle 4.5 jusqu'à 8 dans ce cas ce type de ressaut est bien caractérisé localisé comme montre la photographie ci-dessous :



photographie 2.8 : Ressaut hydraulique a pente nulle

Généralement ce type de ressaut est souvent adopte pour les bassin de dissipation l'énergie pour son bon rendement 45% jusqu'à 70 % c'est le ressaut stable

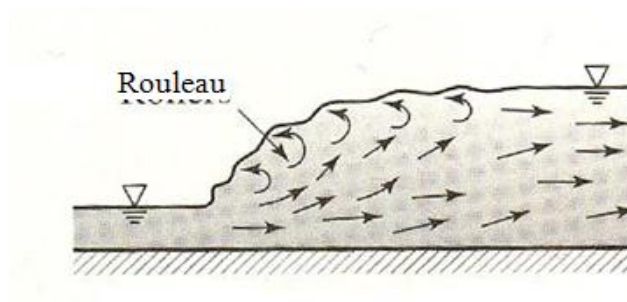


Figure 2.9 : Schéma représentatif d'un Ressaut hydraulique contrôlé par un seuil épais

Il ressort de graphe qui l'équation empirique due a l'expérimentation donne :

$$s/h_1 = 0.0583Fr^{2.3805} \text{ et de coefficient de corrélation } R^2 = 0.9772$$

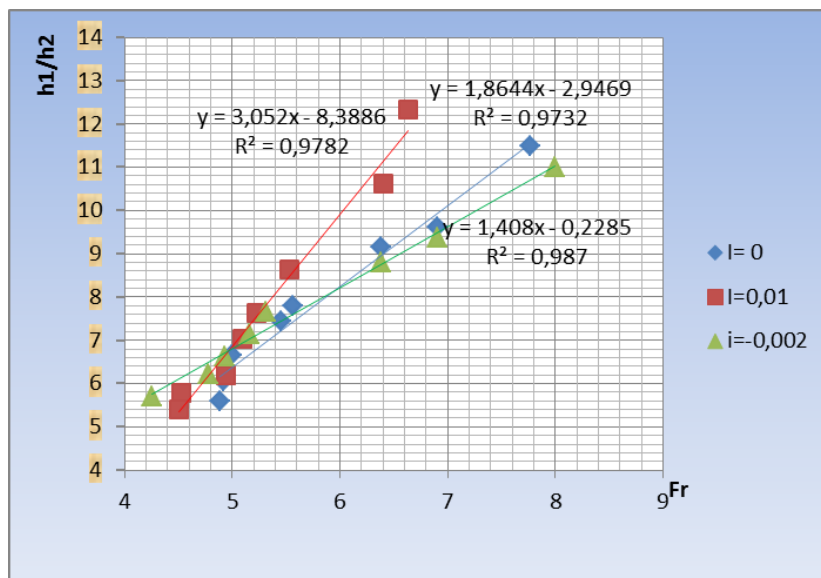
Cette équation permet de dimensionné les hauteur de seuil en fonction de nombre de Froude maximale .

2.3 Hauteur relative y en fonction de nombre de Froude Fr

La figure représente la variation de rapport de hauteur conjugué de Y en fonction de nombre de Froude pour différent pente il est clairement que les rapports Y sont le plus grand pour la pente positive et respectivement les rapports concernant la pente nulle jusqu'à la pente négative cette observation indique clairement que la hauteur conjugué h_2 pour le nombre de Froude prend les valeur maximale pour la pente positive qui nous permis à conclue que la majorité d'énergie est moins dissipé par rapport la pente nulle et la pente négative (contre pente) .

Tableau 2.5 : Les valeurs de hauteur conjuguées Y et nombre de Froude F_r

I = 0 %		I = 1%		I = -0,2%	
h1/h2	Fr	h1/h2	Fr	h1/h2	Fr
11,5	7,77	12,33333333	6,63	11	8
9,625	6,9	10,625	6,4	9,375	6,9
9,15	6,38	8,64	5,53	8,8	6,38
7,8	5,56	7,633333333	5,22	7,666666667	5,31
7,42857143	5,45	7,04285714	5,09	7,14285714	5,16
6,65	5	6,1875	4,94	6,625	4,93
6,055555556	4,92	5,777777778	4,53	6,222222222	4,78
5,6	4,89	5,4	4,5	5,7	4,25

**Figure 2.10** : Courbe des hauteurs conjuguées Y en fonction de Fr

La répartition des point expérimentaux de rapport de hauteur conjugué est prendront une forme linéaire donné comme suite :

- pour la pente $I = 0$: $Y = 1.8644F_r - 2.9469$ et $R^2 = 0.9732$;
- pour la pente $I = 1\%$; $Y = 3.052F_r - 8.388$ et $R^2 = 0.9782$;
- pour la pente $I = -0.2\%$: $Y = 1.408 F_r - 0.2285$ et $R^2 = 0.987$.

Autrement dit les équations de forme $y = a.x + b$.

Pour la pente positive le paramètre **a** ; est le plus grand ce qui signifie analytiquement :

La pente positive permet de donner les valeurs les plus grandes des hauteurs conjuguées Y .

Par contre la pente nulle et la contre pente les rapport des hauteurs conjuguées sont largement inférieur pour le même nombre de Froude .

Ces résultats doivent recommandées dans la construction du bassin d'amortissement notamment la nulle et la pente négative .

2.4 Variation de Longueur de ressaut par rapport hauteur h_1 en fonction de position de seuil rapporter à la hauteur conjugué h_1

La courbe représente la courbe de variation de la longueur de ressaut L_j rapporter à la hauteur conjugué h_1 en fonction de la position de seuil rapporter par la profondeur h_1 montre que pour la pente nulle et la pente positive on a remarqué bien que la variation du longueur de ressaut représente un nuage de point dans sa globalité une droite de forme $y = a.x + b$ les variation du longueur de ressaut pour une contre pente de ressaut est disparaitre pour les valeur de nombre de Froude supérieur a 5 en somme que :

Le ressaut évoluant dans un canal a pente nulle et positive les longueurs du ressaut sont inferieur a celle de contre pente.

Tableau 2.6 : Tableau de valeur des longueurs du ressaut L_j/h_1 et la position de seuil L/h_1 pour différente pentes

I=0		I=1%		I= -0.2%	
L_j/h_1	L/h_1	L_j/h_1	L/h_1	L_j/h_1	L/h_1
116,666667	121,666667	91,6666667	121,666667	201,3	193,333333
82,5	98,75	59	102,5	232,5	280
64	91	46,6	83	240	276
50	76,3333333	37,6666667	70	250	256,666667
41,4285714	63,7142857	30	60,8571429	257,142857	264,285714
30	55	25	54	250	220
26,1111111	47,3333333	21,7777778	49,4444444	226,666667	192,222222
22	41	17	45,4	210	172

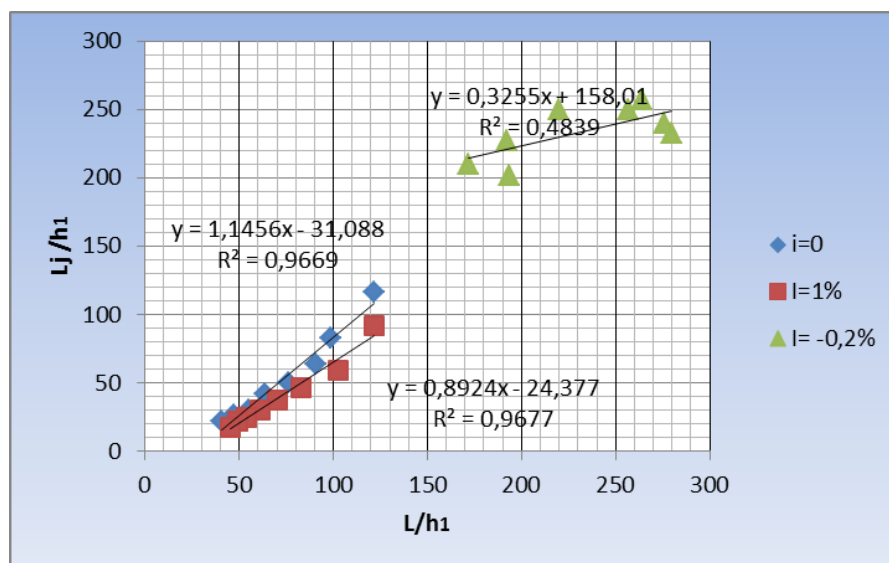


Figure 2.11 : Variation du longueur de ressaut L_j par rapport hauteur h_1 en fonction de position de seuil L rapporter à la hauteur conjugué h_1

La figure ci-dessus représente la variation adimensionnels des longueurs de ressaut L_j/h_1 en fonction de la position de seuil L/h_1 , cette variation est proportionnels. Les longueurs sont les plus moins pour les pentes faibles et nulles.

Tableau 2.7 : Tableau de valeur les longueurs de ressaut et Nombre de Froude

I=0		I=0,01		I=-0,002	
L_j/h_1	Fr1	L_j/h_1	Fr1	L_j/h_1	Fr1
116,666667	7,77	91,6666667	6,63	201,3	8
82,5	6,9	59	6,5	232,5	6,9
64	6,38	46,6	5,53	240	6,38
50	5,56	37,6666667	5,22	250	5,31
41,4285714	5,45	30	5,09	257,142857	5,16
30	5	25	4,94	250	4,93
26,1111111	4,92	21,7777778	4,53	226,666667	4,78
22	4,89	17	4,08285714	210	4,25

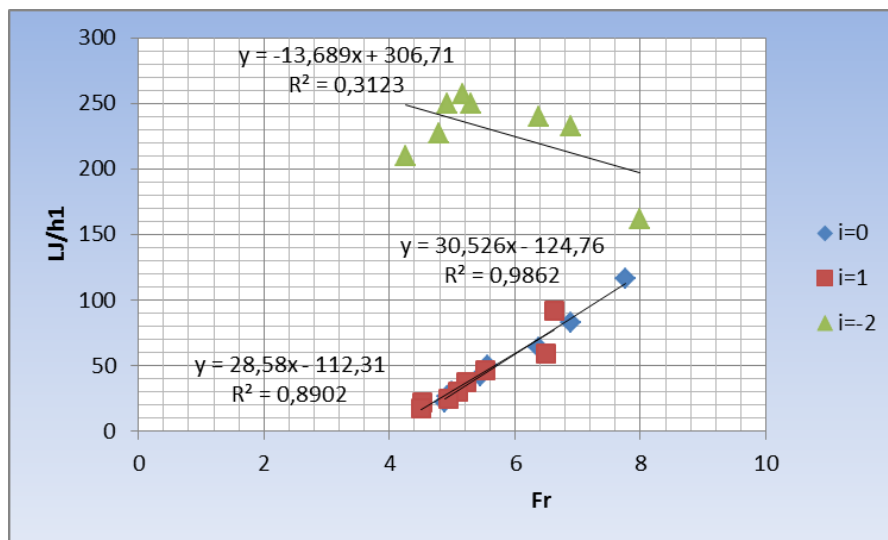


Figure 2.12 : Variation du longeur du ressaut L_j/h_1 en fonction de Nombre de Froude incident Fr pour différentes pente du canal

La figure ci-dessus montre que le ressaut hydraulique pour une contre pente, est disparaître lorsque le nombre de Froude dépasse la valeur $Fr = 4,8$.

Concernant les pentes nulles et faibles, la variation des longueurs de ressaut L_j/h_1 en fonction de Nombre de Froude Fr sont confondues l'un sur l'autre d'une équation linéaire :

$L_j/h_1 = 30,526 Fr - 124,76$; Cette équation est valable pour une gamme des Nombre de Froude Fr incident $4 < Fr \leq 8$.

Pour la pente négative toujours la variation reste linéaire caractérisée par des valeurs plus grandes de rapport L_j/h_1 pour les me nombre de Froude mes nombre de Froude. Ce qu'est montre l'influence de la pente sur la longueur du ressaut.

2.5 La variation de la perte de charge en fonction de la pente du canal

Les essais expérimentales effectuées au laboratoire hydraulique a pour but de montrer l'effet de la pente du canal sur les caractéristiques du ressaut contrôlé par un seuil épais dans un canal rectangulaire à parois lisse. L'étude de la perte de charge fait objet essentiel de cette expérimentation, afin de connaître l'effet de pente sur la dissipation d'énergie maximale.

La figure 2.13, montre de manière schématisque un ressaut contrôlé, à l'aval d'une vanne de fond, par un seuil dénuyé à paroi épaisse de hauteur S franchi par un écoulement en régime critique de profondeur

$$H_c = \frac{3}{2} h_c \quad (2.1)$$

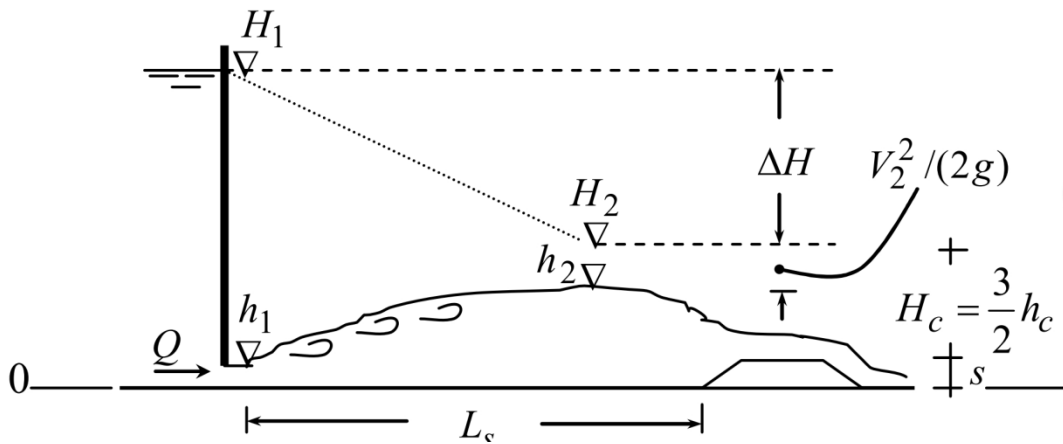


Figure 2.13 : Ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais

Le ressaut est caractérisé par ses hauteurs conjuguées h_1 et h_2 , ainsi que par la perte de charge ΔH qu'il occasionne. Celle-ci est donnée par la différence des charges initiale H_1 et finale H_2 . En considérant le facteur de Coriolis égal à l'unité, les charges H_1 et H_2 s'écrivent respectivement, par rapport au plan de référence 0-0 (Figure 2.13) :

$$H_1 = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (2.2)$$

$$H_2 = S + H_c \quad (2.3)$$

$$H_2 = S + \frac{3}{2} h_c \quad (2.4)$$

Celle-ci permet d'écrire que :

$$\Delta H = H_1 - [s + \frac{3}{2} h_c] \quad (2.5)$$

$$\frac{\Delta H}{h_c} = \frac{H_1}{h_c} - [\frac{s}{h_c} + \frac{3}{2}] \quad (2.6)$$

$$\Delta H^* = H_1^* - [\frac{s}{h_c} + \frac{3}{2}] \quad (2.7)$$

Le tableau de valeur adimensionnels de la perte de charge ΔH^* en fonction de Nombre de Froude F_r incident .

Tableau2.8 : Tableau de valeur de ΔH^* et Nombre de Froude F_r incident

$i=0$		$i=0,01$		$i=-0,002$	
$\Delta H_1/h_c$	Fr	$\Delta H_1/h_c$	Fr	$\Delta H_1/h_c$	Fr
5,17657916	7,77	2,65516249	6,63	4,33657916	
4,46506764	6,9	2,36149324	6,5	3,62506764	6,9
4,10179297	6,38	2,29704811	5,53	3,26179297	
3,65639897	5,56	1,7377108	5,22	2,81639897	5,31
3,31200915	5,45	1,74192791	5,09	2,47200915	
3,03701623	5	1,76814607	4,94	2,19701623	4,93
2,81187439	4,92	1,68801341	4,53	1,97187439	
2,90060629	4,89	1,95265426	4,5	2,39774582	4,25

fonction

de Nombre de Froude F_r incident $4 < F_r \leq 8$ pour différentes pentes du canal est présentées sous formes des droite d'une équation $y=ax+b$.

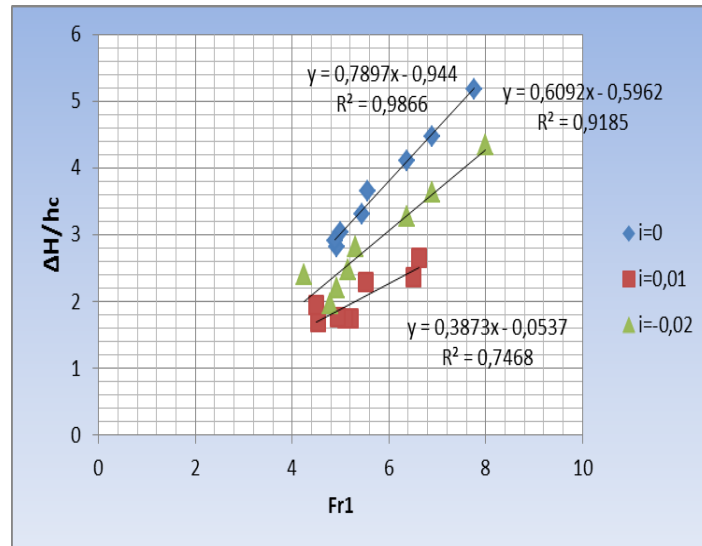


Figure 2.14 : Variation de la perte d'énergie adimensionnelles ΔH^* en fonction de Nombre de Froude incident Fr pour différentes pente du canal

On remarque :

1. Les droites de chaque pente sont bien séparées ;
2. Les coefficients de corrélation de chaque équation montre la bonne adaptation à la justement linéaire ;
3. La gamme de Nombre de Froude est comprise : $4 < Fr \leq 8$
4. Les valeurs ΔH^* c'est à dire les pertes de charges rapportées à la profondeur critique h_c en fonction de Fr , prend les grandes valeurs pour la pente nulle pour les même Nombre de Froude ;
5. Pour une pente différentes à zéro , les graphes montrent que le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil épais, la contre pente est mieux dissipée à celle de la pente positive,

2.6. Conclusion

A travers ce chapitre nous avons étudié et analysé les résultats expérimentaux de ressaut hydraulique contrôlé par un seuil épais, évoluant dans un canal rectangulaire à parois lisse. Il a été démontré dans un premier temps que la variation des rapports des hauteurs S/h_1 en fonction de Nombre de Froude incident F_r prend la même allure à celle établie par les auteurs (**Forster et Skander** 1950). En second temps la variation des hauteurs conjuguées Y en fonction de Nombre de Froude F_r prend une forme linéaire donnée comme suite :

- pour la pente $I = 0$: $Y = 1.8644F_r - 2.946$ avec $R^2 = 0.9732$
- pour la pente $I = 1\%$; $Y = 3.052F_r - 8.3886$ avec $R^2 = 0.9782$
- pour la pente $I = -0.2\%$: $Y = 1.408 F_r - 0.2285$ avec $R^2 = 0.987$

Ces résultats favorisent la pente nulle et la pente négative.

L'étude comparative, entre la fonction $L_J/h_1 = f(F_r)$ pour les trois configurations de ressaut, a montré que le ressaut de la pente faible et nulle donne des longueurs du ressaut L_J a plus d'avantage que son homologue, le ressaut à contre pente. Cet avantage a une incidence directe sur l'aspect économique.

Un second avantage du ressaut hydraulique dans canal rectangulaire contrôlé par un seuil épais a montré que les pertes de charge ΔH^* rapportées à la profondeur critique h_c en fonction de F_r prend les grandes valeurs pour la pente nulle par rapport les autres pente pour les même Nombre de Froude.

Enfin sur le plan technique et économique on peut déduire que le ressaut hydraulique à pente nulle recueille tous les avantages d'intérêt pour une meilleure dissipation d'énergie avec les longueurs du ressaut avantageuses.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La présente étude s'intéresse à l'analyser expérimentalement et théoriquement l'effet de la pente sur les caractéristiques de ressaut hydraulique, à savoir, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire à pente variable .

On a deux parties ont été nécessaires : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine, une deuxième partie qui a concerné notre propre contribution à l'étude du ressaut contrôlé par seuil dans canal rectangulaire à pente variable .

La première partie c'est la partie bibliographie

La première partie a été divisée en quatre chapitres :

- La première chapitre de la partie bibliographie c' est un généralité sur les écoulement a surface libre
- Le second 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 troisième 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.

Le deuxième partie c'est la partie expérimentale

Le deuxième partie a été divisé en deux chapitre :

- Le premier chapitre c'est un description du model , s'est intéressé de donné des définitions sur le matérielle de notre travaille a laboratoire de département hydraulique, faculté de technologie, université de Msila .
- Le deuxième chapitre c'est un analyse de résultats expérimentales , permis à nous démontré dans un premier temps que la variation des rapports des hauteurs S/h_1 en fonction de Nombre de Froude incident Fr prend la même allure à celle établie par les auteur (**Forster** et **Skander** 1950). En seconde temps la variation des hauteur conjuguées Y en fonction de Nombre de Froude Fr prend une forme linéaire et l'étude comparative entre la fonction $L_J/h_1 = f(F_r)$ pour les trois configurations de ressaut, on a aussi dans un troisième temps faire un études de variations le perte de charge en fonction de nombre de Froude , en fin cette études permis à nous de déduire le meilleur choix de pente pour le meilleur caractéristique de ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire tels que, sur le plan technique et économique en peut déduire que le ressaut hydraulique à pente nulle recueille tous les avantages d'intérêt pour une meilleur dissipation d'énergie avec les longueurs du ressaut avantageuses.

LISTE DES TABLAUX

Partie 1: Etude bibliographique

Tableau 3.1 : Les constantes a et b de l'équation

Partie 2: Etude expérimentale

Tableau 1.1: Caractéristiques géométriques du canal

Tableau 2.1 Tableau de caractéristique de ressaut hydraulique a pente nulle

Tableau 2.2 : Tableau de valeurs des caractéristiques de ressaut hydraulique a pente positive

Tableau 2.3 : Tableau de valeur des caractéristique de ressaut hydraulique a pente négative (contre pente)

Tableau 2.4 : valeur de s/h_1 et nombre de Froude

Tableau 2.5 : les valeurs de hauteur relative Y et nombre de Froude

Tableau 2.6 : Tableau de valeur des longueurs du ressaut et la position de seuil pour différente pentes

Tableau2.7 : Tableau de valeur les longueurs de ressaut et Nombre de Froude

Tableau2.8 : Tableau de valeur de ΔH^* et Nombre de Froude F_r incident

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Section transversal d'un canal Naturel

Figure 1.2 : Canaux artificiels

Figure 2.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). a) Pré-ressaut, b) Ressaut de transition, c) Ressaut stable

Figure 2.2 : Aspect du ressaut classique.

Figure 2.3 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1

Figure 2.4 : Classification des ressauts inclinés selon Kindsvater (1944).

Figure 2.5 : Notation du ressaut incliné

Figure 2.6 : Classification du ressaut à pente négative.

Figure 2.7 : Schéma de définition et volume de contrôle pour le ressaut à pente négative

Figure 2.8 : 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).

Figure 2.9 : 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)

Figure 3.1 : Ressaut en canal semi-triangulaire selon Hager et Wanoschek (1987)

Figure 3.2 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et de la hauteur relative

Figure 3.3 : Longueur relative L_r/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoschek (1987) ($m = 1$). (Δ) : $m = 0,58$ selon Rajaratnam (1964)

Figure 3.4 : Longueur relative L_j/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoschek (1987)

Figure 3.5 : Profil de surface généralisé $y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ($m = 1$), selon Hager et Wanoschek (1987).

Figure 3.6 : a) Ressaut contrôlé. b) Ressaut forcé de type B-min

Figure 3.7 : Profil de l'écoulement au-dessus des seuils.

Figure 3.8: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, dans un canal triangulaire.

Figure 3.9 : Variation expérimentale du rapport Y hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative S du seuil. Points expérimentaux pour $m = 1$: (○) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (•) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) Ressaut forcé par seuil à paroi mince.

Figure 3.10 : Variation expérimentale de la hauteur relative $S = s / h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 , pour un ressaut évaluant dans un canal triangulaire.

Figure 3.11 : Variation expérimentale de la longueur relative X du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 , pour un ressaut évaluant dans un canal triangulaire.

Figure 4.1 : Ressaut hydraulique classique.

Figure 4.2 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M .

Figure 4.3 : schéma de définition

Figure 4.4 : caractéristique principale du rouleau de fond: a) distance d'approche.

Figure 4.5 : longueur relative λ_j du ressaut en fonction de F_1 et de M

Figure 4.6 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

Figure 4.7 : Rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude.

Figure 4.8 : Illustration schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal.

Figure 4.9 : Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal incliné à pente positive

Figure 4.10 : Variation expérimentale de $Y(F_1)$ pour différentes valeurs de $\tan(\alpha)$.

Figure 4.11 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 < \tan(\alpha) < 0,02$.

Partie 2

photographie 1.1 : Le banc d'essai mis en expérience

photographie 1.2 : tube de lecture le volume d'eau

photographie 1.3 : dispositif de variation de pente

photographie 1.4 : échelle de mesure

photographie 1.5 : Schéma de limnimétrie

photographie 1.6 : Limnimétrie

photographie 2.1 : Ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire à pente nulle

Figure 2.2 : Schéma représentatif d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire a pente nulle

photographie 2.3 : Ressaut hydraulique Ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire a pente positive

Figure 2.4 : Schéma représentatif d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire a pente positive

photographie 2.5 : Ressaut hydraulique Ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire a contre pente

figure 2.6 : : Schéma représentatif d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire à contre pente

figure 2.7 : la courbe de s/h_1 en fonction de nombre de Fr

photographie 2.8 : ressaut hydraulique a pente nulle

Figure 2.9 : schéma ressaut hydraulique

Figure 2.10 : courbe de hauteur relative y en fonction de Fr

Figure 2.11 : courbe de longueur de ressaut par rapport hauteur h_1 en fonction de position de seuil rapporter à la hauteur conjugué h_1

Figure 2.12 : Variation du longueurs du ressaut L_j/h_1 en fonction de Nombre de Froude incident Fr pour différentes pente du canal

Figure 2.13 : ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais

Figure 2.14 : Variation de la perte d'énergie adimensionnelles ΔH^* en fonction de Nombre de Froude incident Fr pour différentes pente du canal

PRINCIPALES NOTATIONS

PRINCIPALES NOTATIONS

A1	L'aire de la section mouillée initiale	[m ²]
A2	L'aire de la section mouillée finale	[m ²]
b	Base du canal trapézoïdal	[m]
F1	Nombre de Froude incident	[-]
P1	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	[N]
P2	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	[N]
g	Accélération de la pesanteur	[m.s ⁻²]
h1	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h2	Hauteur finale du ressaut	[m]
h(x)	Profondeur de l'eau à la distance x du pied du ressaut	[m]
hb	hauteur maximal du rouleau de fond	[m]
Lr	Longueur du rouleau	[m]
Lj	Longueur du ressaut	[m]
Lr*	Longueur du rouleau classique rectangulaire	[m]
Lj*	Longueur du ressaut classique rectangulaire	[m]
Lb	longueur du rouleau de fond	[m]
m	cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale	[-]
M	coefficient de forme	[-]
Q	Débit volume	[m ³ .s ⁻¹]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
s	Hauteur du seuil	[m]
S	Hauteur relative du seuil	[-]
V	Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiale et finale	[m ³]
v1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m.s ⁻¹]
v2	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	[m.s ⁻¹]
Y*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	[-]
ν	Viscosité cinématique	[m ² .s ⁻¹]
Yj	longueur relative du ressaut	[-]
Yr	longueur relative du rouleau	[-]
ω	Poids spécifique du liquide	[N.m ⁻³]
ρ	Masse volumique du liquide	[kg.m ⁻³]
η	Rendement du ressaut	[-]

Reference bibliographies

- 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
- 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.
- 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
- Hager, W.H., Wanoschek, R (1989), Hydraulic jump in trapezoidal channel, J. hydraulic research, Vol. 27, 1989, N.3.
- Hager, W.H., Wanoschek, R., (1987), Hydraulic Jump in Triangular Channel, J. Hydraulic Research, Vol. 25, Nr. 5, pp. 549-564..
- Mc Corcodal, 1994, Journal of Hydraulic Research, VOL. 32, 1994, NO.1; 119-130.
- Rajaratnam, N., (1965), Hydraulic Jump in horizontal conduit, Water Power, 17, pp. 80-83.
- Rajaratnam, N., (1967), Hydraulic jumps, Advances in Hydro science, Vol. 4, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York.
- CHOW, V.T. (1972), « Open-channel hydraulic » Ed, Eyrolles, Paris.
- GRAF, W. H. et ALTINAKAR, M. S. (2000), « Hydraulique fluviale, Tome II Ecoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple». Edition. Presses Polytechnique et universitaires Romandes, Lausanne.

Résumé:

Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier, d'un point de vue théorique et expérimental, le ressaut hydraulique, dans un canal rectangulaire en différents pente . 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 rectangular channel of a different slopes. 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 nondimensional terms to allow their use in the practice.

ملخص:

هذه المذكرة تهدف إلى الدراسة النظرية و التجريبية للقفزة الهيدروليكية في قناة ذات شكل مستطيل في مختلف الانحدارات ثم ايجاد علاقات عامة تظهر تأثير الانحدار للقناة على خصائص هذا النوع من القفزات الهيدروليكية , المعادلات التي تم الحصول عليها هي معادلات بدون ابعاد , وذلك لاستعمالها في الواقع