



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Hydraulique
Ouvrages hydraulique

Réf. : OH 07

Présenté et soutenu par :
BOKHARI Ibrahim Hachem

Le : mardi 26 juin 2018

Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal trapézoïdal composé à base rectangulaire

Jury :

M.	OUANOUGHY Samira	MCA	Université de Biskra	Président
M.	CHARHABIL Sonia	MCB	Université de Biskra	Examineur
M.	DEBABECHE Mahmoud	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2017 - 2018

Remerciement

À dieu, le tout puissant, que j'adresse mes vifs remerciements d'avoir me donner le courage et la patience pour réaliser ce modeste travail. Toute ma gratitude va à mon encadreur Pr DEEBABECHE Mahmoudé pour m'avoir guidé afin de mener à bien cette étude sa avec disponibilité, ses remarques pertinentes, et ses suggestions ont sans cesse permis l'amélioration de ce travail Je remercie également les membres de jury qui ont accepté d'examiner mon travail, Je remercie enfin Mm Ouassaf, mon collègue Salah, Ms Benmalek, Reiguet, et Ms Kouidri et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration du présent étude, qu'ils sachent que je ne les oublierai jamais.

Dédicace

À la personne la plus chère dans ma vie, ma mère Amel, mon soleil qui a fait et fera tout pour moi sans que je puisse la remercier assez À mon père Ali qui m'a appris le correct chemin et le bon principe de la vie. À ma tante Zahia, À mes chères frères Heithem, Hatem et Assem.

À toute ma famille, À mes amis Aymen, Belkacem, Rachid, et Abderrahman, Cherifa, Hadjer, et Maria. À tous tous ceux qui m'ont encouragé de prés ou de loin.

SOMMAIRE

Introduction général	1
----------------------	---

Première partie : L'étude bibliographique

Introduction à la première partie	4
-----------------------------------	---

CHAPITRE 01

Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

1.1. Introduction	5
1.2. Ressaut hydraulique classique	7
1.2.1. Typologie et la longueur de ressaut	8
1.2.2. La quantité de mouvement et l'énergie spécifique	9
1.2.3. Le rendement et le rapport d'énergie	11
1.2.4. Hauteurs du ressaut	14
1.2.5. Longueur du rouleau	14
1.3. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire	16
1.3.1. Seuil continu à paroi mince	16
1.3.2. Seuil continu à paroi épaisse	17
1.4. Conclusion	19

CHAPITRE 02

Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal

2.1. Introduction	21
2.2. Approche de Hager et Wanoschek (1989)	21
2.2.1. Généralités	21
2.3. Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal	21
2.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	22
2.2.2. Cas particulier du canal triangulaire	24
2.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut	25
2.2.3.1. Longueur du rouleau de fond	25
2.2.3.2. Longueur de ressaut	27
2.2.3.3. Le rendement	28
2.3. Conclusion	29

CHAPITRE 03

Ressaut hydraulique en canal composé

3.1. Introduction	31
3.2. L'origine de la forme composée	31
3.3. Histoire de quelques études sur les canaux de forme composée	33
3.3.1. Approche de Sellin(1964)	33
3.3.2. Approche de Rajaratnam et Ahmadi (1979)	33
3.3.3. Approche de Wormleaton et al (1982)	33
3.3.4. Approche de Knight et Demetriou (1983)	34
3.3.5. Wormleaton and Hadjipanous (1985)	34
3.3.6. Knight et Shiono (1998)	34
3.4. L'avantage des canaux de type composés	34
3.5. Les caractéristiques de l'écoulement	35
3.6. La géométrie du canal	36
3.7. Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé	37
3.7.1. Rapport des hauteurs conjuguées	37
3.7.2. Rendement du ressaut	42
3.8. Conclusion	43
Conclusion de la première partie	44

Deuxième partie : L'étude expérimentale

Introduction à la deuxième partie	45
-----------------------------------	----

CHAPITRE 01

Description du modèle

1.1. Introduction	46
1.2. Description de canal	46
1.3. Le limnimètre	51
1.4. Seuil mince	52
1.5. Modèle expérimental	52
1.6. Conclusion	53

CHAPITRE 02

L'étude expérimentale

2.1. Introduction	54
2.2. Position de problème	54
2.3. Procédé de détermination du débit volume Q	54
2.4. Procédure expérimentale	55
2.5. Profil de surface généralisé du ressaut	57
2.6. Analyse des résultats expérimentaux	59
2.6.1. Le rapport des hauteurs conjuguées	59
2.6.2. Longueur relative de ressaut L_j/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1	62
2.6.3. Longueur relative de rouleau L_r/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1	65
2.6.4. Le rapport S/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1	67
2.6.5. Le rendement	69
2.7. Conclusion	73
Conclusion de deuxième partie	74
Conclusion général	75

Résumé

Cette recherche a été étudiée d'une manière théorique le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, et le ressaut hydraulique dans un canal composé. D'une manière expérimentale les caractéristiques de ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évaluant dans un canal trapézoïdal composé à base rectangulaire, L'objectif principal étant la détermination des relations fonctionnelles pratiques permettent le dimensionnement des bassins de dissipation de charge hydraulique à l'aval des barrages, ainsi que le dimensionnement des canaux d'irrigation. En effet, les équations obtenues sont représentées en termes adimensionnels, afin de permettre leur utilisation dans la pratique.

Mot clés : le ressaut hydraulique, canal rectangulaire, canal trapézoïdal, canal composé, bassin de dissipation, seuil mince, canal trapézoïdal composé.

ملخص

تمت دراسة هذا البحث من الناحية النظرية القفزة الهيدروليكية في قناة مستطيلة، القفزة الهيدروليكية في قناة شبه منحرف، والقفزة الهيدروليكية في قناة مركبة. من الناحية التجريبية إيجاد العلاقات الرياضية التجريبية التي تسمح لنا بإيجاد أبعاد حوض تبديد الحمولة الهيدروليكية وراء السد و كذلك أبعاد قنوات الري. و بالفعل، فإن المعادلات التي يتم الحصول عليها ممثلة بعبارات رياضية بدون أبعاد، للسماح باستخدامها عملياً.

الكلمات المفتاحية: القفزة الهيدروليكية، قناة مستطيلة، قناة شبه منحرفة، قناة مركبة الشكل، حوض التبديد، العتبة الرفيعة. قناة شبه منحرفة مركبة.

Introduction générale

Introduction générale

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

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

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

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

L'application de la quantité de mouvement a eu pour but d'évaluer le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 incident caractérisant l'écoulement à l'amont. La relation la plus simple est celle obtenue par Bélanger pour le cas du ressaut classique en canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible et dont la

validité a été vérifiée par plusieurs auteurs (Debabeche et Achour (2007)). En effet, Bélanger (1928) est le premier à avoir présenté une relation exprimant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, appliquée au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal. Parmi les pionniers de l'étude du ressaut hydraulique on peut citer : Safranez (1927) qui a étudié expérimentalement le ressaut hydraulique classique et Bakhmeteff et Matzake (1936) qui ont travaillé sur le ressaut en canal de section droite rectangulaire à pente faible. Quant à Posey et Hsing (1938), ils ont abordé d'un point de vue expérimental le ressaut hydraulique dans le canal trapézoïdal.

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

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

Parmi les travaux les plus intéressants sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal, on peut citer ceux effectués par Silvester (1964) et Wanoschek et Hager (1989). Cependant, la première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné fut celle de Bakhmeteff et Matzké (1938), qui ont évoqué dans leur étude, le profil de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses.

La présente étude s'intéresse à l'analyse théorique et expérimentale de ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince en canal trapézoïdal composé à base rectangulaire. L'étude a nécessité deux parties :

- La première partie, à travers laquelle nous passerons en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, dans un canal trapézoïdal, et le ressaut hydraulique dans un canal de section composée.
- ✓ Dans le premier chapitre nous allons donner un bref aperçu sur le ressaut hydraulique classique, ensuite nous passerons en revue les travaux de Bradly et Peterka (1957), Hager et Sinniger (1986) relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire.
- ✓ Le second chapitre présente les travaux les plus intéressants dans le domaine du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal trapézoïdal.
- ✓ Le troisième chapitre sera consacré à l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section rectangulaire composée. Les travaux les plus récents dans ce domaine

sont ceux de Achour et khataoui (2012). Nous allons également passer en revue des quelques études sur les canaux composés.

- La deuxième partie de notre étude, consiste à analyser expérimentalement et théoriquement les caractéristiques des ressauts hydrauliques contrôlés par seuil évoluant dans un canal trapézoïdal composé à une base rectangulaire. L'objectif principal de cette étude est de déterminer expérimentalement les relations fonctionnelles liant les différents paramètres de ce type de ressaut hydraulique, Ce volet de notre travail a été divisé en deux chapitres :
 - ✓ Le premier chapitre sera consacré à la description du modèle expérimental utilisé pour entamer l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal composé à une base rectangulaire.
 - ✓ Le deuxième chapitre a pour objectif d'étudier, d'un point de vue expérimental, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal composé à base rectangulaire. Des relations fonctionnelles, en terme adimensionnel, liant les différentes caractéristiques du ressaut sont trouvées.

Partie N°

01

L' étude bibliographique

Introduction à la première partie

Introduction à la première partie

Dans cette partie une synthèse bibliographique sera proposée, elle fait le point sur l'état de connaissances des principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique. Ce phénomène hydraulique que nous essayons de développer, est l'objet de recherche de plusieurs hydrauliciens, étrangers et locaux. Ces chercheurs ont abouti à des résultats fiables, basés sur des essais effectués au laboratoire, d'une part pour obtenir une bonne structure du bassin d'amortissement, d'autre part, pour résoudre les problèmes d'érosion du lit de l'oued, à l'aval des barrages.

La présente partie se divise en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à citer l'évaluation dans le temps du ressaut hydraulique.

- En premier lieu, nous avons abordé le ressaut hydraulique classique, évoluant en canal de section droite rectangulaire, de pente faible ou nul, et nous avons représenté l'équation de Bélanger (1828), qui donne la relation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident. Ainsi les travaux de Hager et Sinniger (1986) font l'objet de la détermination des caractéristiques géométriques du ressaut.
- En deuxième lieu, nous avons abordé le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal à travers les travaux de Posey et Hsing (1938), Silvester (1964), et al récemment ceux de Hager et Wanoschek (1989). On a représenté la hauteur conjuguée dans ce type des canaux, les caractéristiques, les cas particuliers, et le rendement,
- Dans le dernier chapitre bibliographique, nous avons cité des quelques études concernés les canaux de forme composé et particulièrement l'étude expérimental de Achour et khataoui (2012) sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal de forme rectangulaire composée.

CHAPITRE

01

Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

1.1. Introduction

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 est d'amener l'écoulement du cours d'eau (généralement fluvial) à un écoulement torrentiel afin que le ressaut puisse se former. Ceci est obtenu, soit par l'écoulement sur une pente inclinée supérieure à la pente critique (chute inclinée), soit par la chute libre de la nappe d'eau (chute verticale).

Afin de bien dimensionner ces ouvrages hydrauliques, une bonne connaissance des caractéristiques des ressauts est essentielle, qui 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. Ces caractéristiques seront d'abord évaluées pour un canal rectangulaire, puis une généralisation à d'autres types de canaux sera présentée.

Dans un écoulement en régime fluvial, les surfaces libres amont et aval sont reliées entre elles par un rouleau dans lequel les filets d'eau sont animés d'un mouvement de rotation qui produit une dissipation importante d'énergie, (se traduisant par une perte de charge Δh)

$$\Delta h = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2}$$

h_1, h_2 étant la profondeurs des lames en aval .

les caractéristiques du ressaut sont essentiellement :

1. Les longueurs l_r & l_j qui désignent respectivement la longueur du rouleau et de longueur du ressaut
2. Les hauteurs initial h_1 et final h_2 appelées également les hauteurs conjuguées

La longueur l_j du ressaut n'est pas déterminé par une relation simple en fonction des caractéristiques hydraulique de phénomène, elle est de l'ordre de 5 à 6 fois la hauteur $(h_2 - h_1)$

Bradly & Peterka (1957) ont classé les différents types de ressaut hydraulique classique qui se caractérise par le nombre de Froude F_1 , en cas d'un canal de section droite rectangulaire, la formule peut être définie comme suit :

$$F_1 = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

La variation de nombre de Froude autour de l'unité provoque différents régimes : si $F_1 \leq 1$ le régime est lent (fluvial) ou critique, à partir de cette valeur, ils apparaissent des plusieurs types du ressaut hydraulique qui en va s'exprimer à travers ce chapitre.

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par le nombre de Froude $F_1 > 1$ étroitement lié au débit volume, à la hauteur initial h_1 ainsi qu'à la forme géométrique du canal.

On s'accorde à dire que le ressaut hydraulique est régit par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation liant le rapport Y^* des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 . Pour une section droite rectangulaire, l'équation de Bélanger (1828) a fait l'exemple d'application du théorème d'Euler au ressaut hydraulique classique.

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

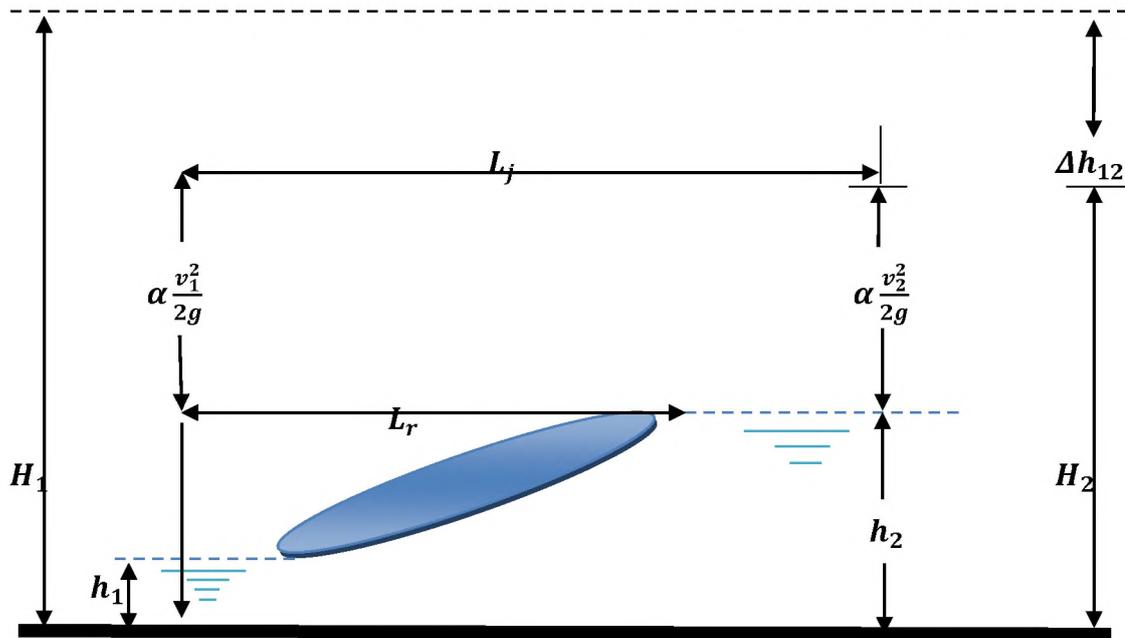


Figure 1.1 Le ressaut hydraulique

La capacité du ressaut pour dissiper une telle énergie est caractérisée par son rendement η , qui est le rapport entre la différence des charges totales initiales et finales ΔH_{1-2} , et la charge totale dans la section initiale du ressaut h_1 . Nous passerons en revue les travaux de Hager et Sinniger (1986), concernant leur relation, qui permet le calcul explicite du rendement η .

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

1.2. Ressaut hydraulique classique

Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible.

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.

1.2.1. Typologie et la longueur de ressaut

Le type et la longueur de ressaut classique est basée essentiellement sur la variation de nombre du Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut.

après une expérimentation extensive, Bradly & Peterka ont classé le ressaut hydraulique en quatre catégories, et Andersen (1978) a classé un type comme indiqué dans les figures au dessous

Le nombre de Froude compris entre 1 et 1,7 et cela d'après Andersen (1978), la différence des profondeurs conjuguées en amont et en aval est très faible, et le ressaut est caractérisé par de légères rides à la surface libre, aspect qui diffère peu de celui que l'on observe dans le régime critique, c'est le ressaut ondulé (figure 1.2.a).

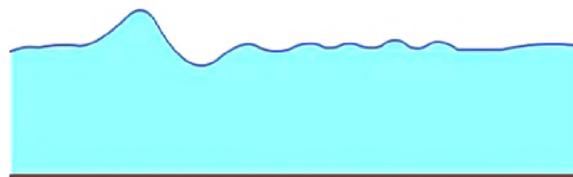


Figure 1.2.a Ressaut ondulé

Pour des valeurs de $1,7 < F_1 < 2,5$, on constate le même phénomène, mais plus accentué ; dans ce cas se produisent déjà de petits tourbillons superficiels. Jusqu'à ces valeurs de F_1 , la surface libre est raisonnablement plane et la distribution des vitesses est régulière mais le rendement obtenu est très faible : c'est le pré-ressaut (figure 1.2.b).

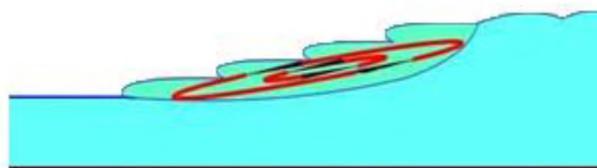


Figure 1.2.b Le pré-ressaut

Pour des valeurs de $2,5 < F_1 < 4,5$ l'écoulement est pulsative ; la plus grande turbulence se vérifie soit près de fond, ou à la surface : c'est le ressaut de transition (figure 1.2.c). Chaque pulsation produit une onde de période irrégulière, qui peut se propager sur plusieurs kilomètres dans la nature, ce qui peut causer des dommages aux berges.

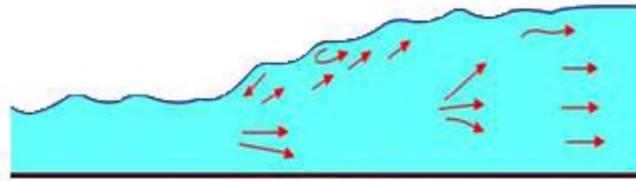


Figure 1.2.c Le ressaut de transition

Pour des valeurs de $4,5 < F_1 < 9$, le ressaut est bien caractérisé et localisé. Ce type de ressaut est souvent adopté pour les bassins de dissipation d'énergie pour son bon rendement (45% et 70%) : c'est le ressaut stable (figure 1.2.d).

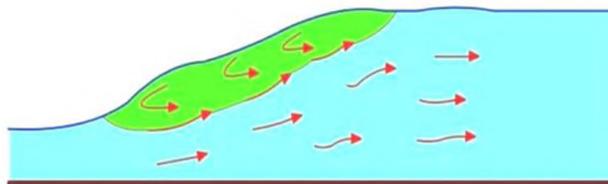


Figure 1.2.d Le ressaut stable

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

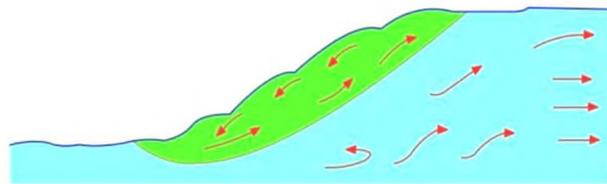


Figure 1.2.e Le ressaut clapoteux

1.2.2. La quantité de mouvement et l'énergie spécifique

De façon générale, le ressaut nécessite que certaines conditions soient rencontrées afin qu'il se réalise. Ces conditions sont le respect de l'équation de continuité et de l'équation de Newton sous la forme "impulsion-quantité de mouvement" (équation 1.2). De la (Figure 1.3) et pour un canal rectangulaire nous avons :

$$v_1 y_1 = v_2 y_2 \quad (1.1)$$

$$\frac{1}{2}\rho g y_1^2 + q\rho v_1 = \frac{1}{2}\rho g y_2^2 + q\rho v_2 \quad (1.2)$$

v_1 et v_2 : vitesses moyennes en amont et en aval du ressaut (m/s).

y_1 et y_2 : hauteurs d'eau en amont et en aval du ressaut (m).

ρ : masse spécifique de l'eau (kg/m^3).

g : constante d'accélération gravitationnelle (m/s^2).

q : débit unitaire (m^3/s).

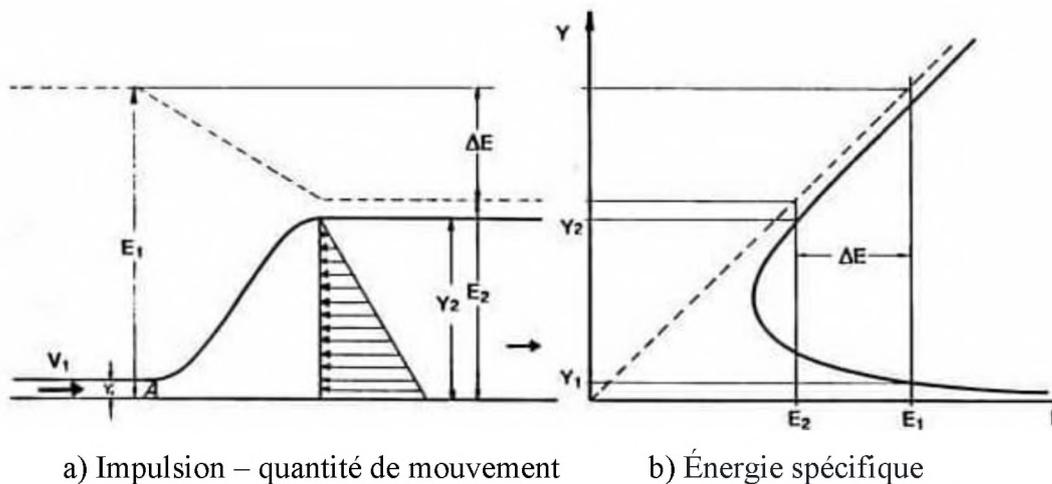


Figure 1.3

La solution de ces équations est :

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8F_1} - 1) \quad (1.3)$$

F_1 : Nombre de Froude de l'écoulement torrentiel en amont du ressaut.

y_1, y_2 : Hauteurs conjuguées du ressaut .ou bien (h_1 et h_2)

Le nombre de Froude est donné par l'équation suivante :

$$F_1 = \frac{V}{\sqrt{g(A/l)}} \quad (1.4)$$

V : Vitesse d'écoulement (m/s)

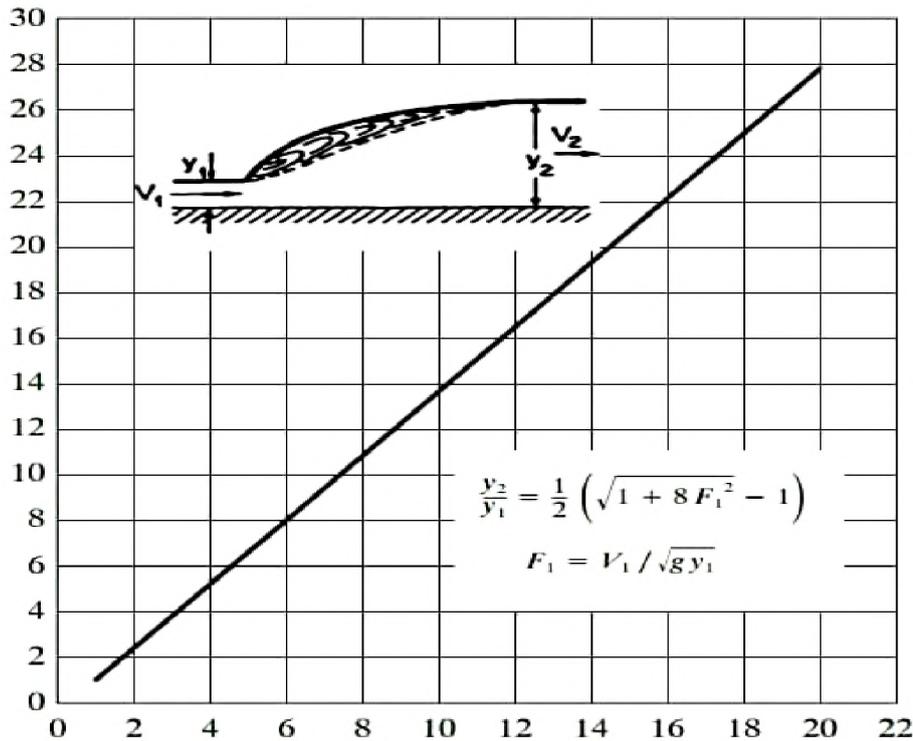
g : constante gravitationnelle ($9,81m/s^2$)

l : largeur au miroir (m)

A : section d'écoulement (m^2)

La (Figure 1.4) représente la solution de l'équation (1.3)

$$y_2/y_1$$



$$F_1$$

Figure 1.4

Relation entre F_1 et y_2/y_1 pour un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal.

L'équation de Bélanger (1828)

Il faut noter ici les points suivants :

1. Le ressaut ne se réalisera qu'à la condition que le niveau d'eau en aval y_3 dans le canal soit supérieur à la hauteur conjuguée y_2 . Ce niveau est souvent déterminé par l'ouvrage situé en aval du ressaut.
2. Dans les petits cours d'eau ($Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$), les nombres de Froude varient généralement de 2 à 6, ce qui entraîne des hauteurs y_2 de deux à huit fois supérieures à y_1 .

1.2.3. Le rendement et le rapport d'énergie

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

A partir de théorème de Bernoulli (1738), on peut trouver la formule de perte d'énergie, $\Delta H_{1-2} = H_1 - H_2$ Produite par le ressaut en admettant que $Z_1 = Z_2$ (canal horizontal) (Figure 1.5).

$$\Delta E_{1-2} = \Delta H_{1-2} = \left(\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \right) - \left(\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \right)$$

La charge totale dans la section amont est :

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

Et la charge totale dans la section aval est :

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

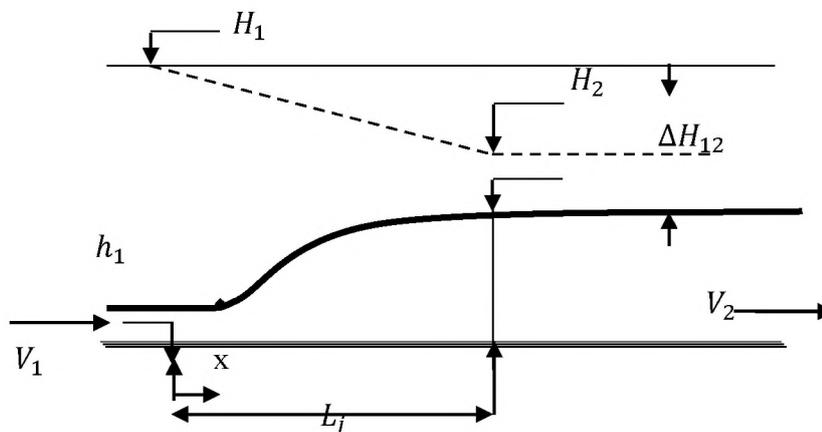


Figure 1.5 Schéma de charge totale le long de ressaut classique

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

La perte d'énergie et l'efficacité du ressaut sont calculés à partir de l'équation de l'énergie :

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta E \quad (1.5)$$

ΔE : Perte d'énergie

A partir de 1.1 et 1.5 nous trouvons :

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad (1.6)$$

L'efficacité de la dissipation η est alors :

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1} \quad (1.7)$$

Cette efficacité peut être évaluée de façon analytique et ne dépend que de F_1 . En effet, dans le cas du canal rectangulaire, le rapport E_2/E_1 peut s'exprimer ainsi :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2+1)^{2/3} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2+F_1^2)} \quad (1.8)$$

La figure 1.6 donne graphiquement le rapport E_2/E_1 en fonction de F_1 (équation 1.8) ainsi que le rendement η (équation 1.7).

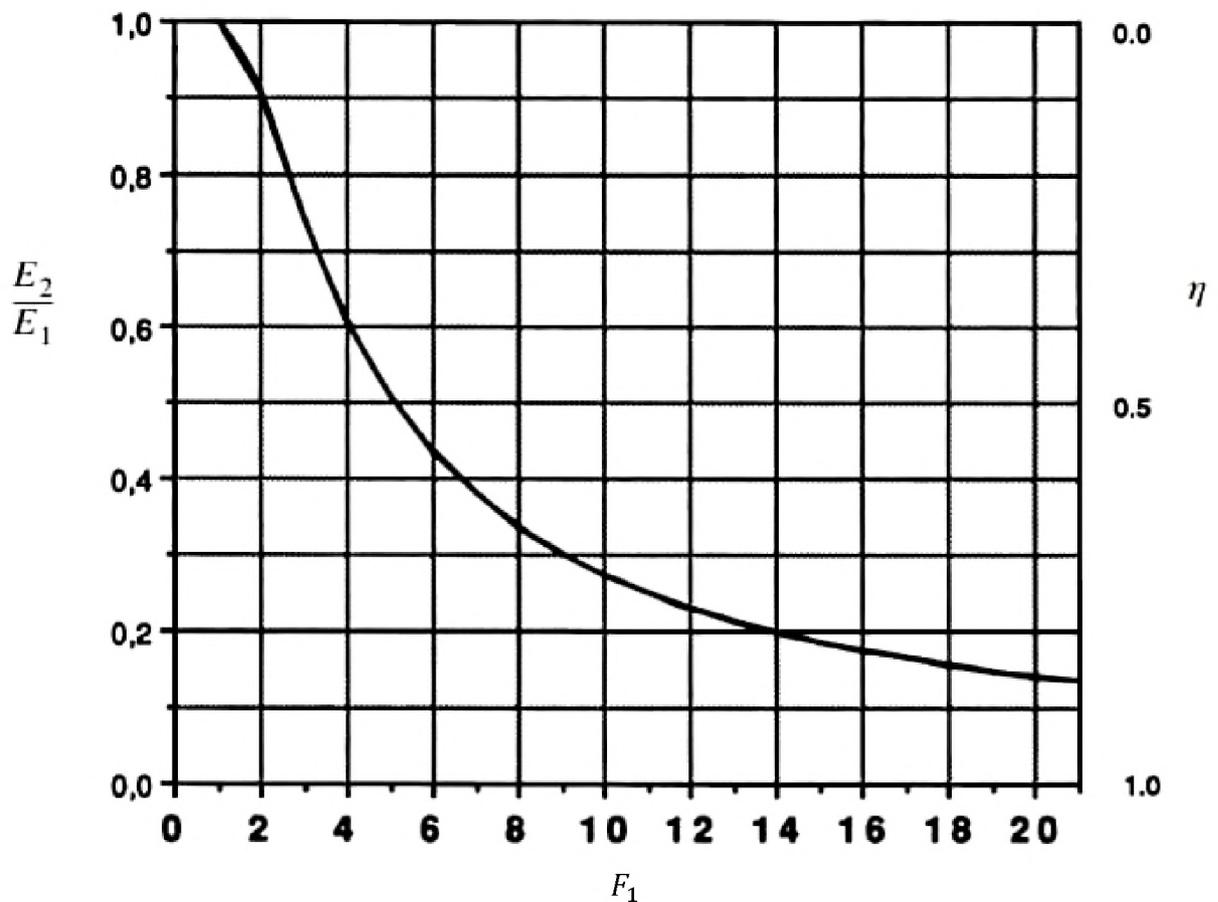


Figure 1.6 Efficacité du ressaut

1.2.4. Hauteurs du ressaut

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



Figure 1.7 La hauteur de ressaut

1.2.5. Longueur du rouleau

En 1990, Hager et al. Définissent deux types de longueur du rouleau tous dépendent de forme du ressaut étudié. En effet, ils ont introduit la notion de longueur du rouleau développé et non développé. La Figure (1.8.a et b) illustre ces deux types du ressaut et les longueurs L_r qui correspondent

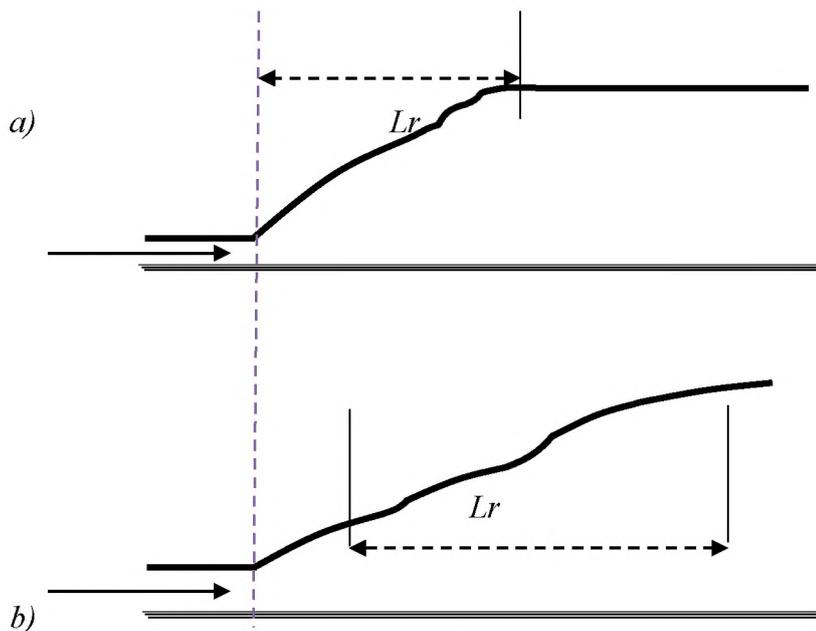


Figure (1.8.a et b) Aspect du ressaut classique

a) Rouleau développé, b) Rouleau non développé

La forme générale du rouleau développé est presque uniforme (figure 1.8.a). Par contre le rouleau non développé présenté par une surface libre perturbée sous l'effet des vagues qui se forment à l'aval (figure 1.8.b).

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

$$\lambda_r = -12 + 160.Tgh\left(\frac{F_1}{20}\right) \text{ pour } W = \left(\frac{h_1}{b_1}\right) < 0.1 \quad (1.9)$$

$$\lambda_r = -12 + 100.Tgh\left(\frac{F_1}{12.5}\right) \text{ pour } 0.1 < W < 0.7 \quad (1.10)$$

Tgh : indique la tangente hyperbolique.

Il faut noter ici que pour une gamme des valeurs de nombre de Froude $2.5 < F_1 < 8$ les hydrauliciens ont proposé une relation plus simple que (1.9) et (1.10), celle-ci est de la forme d'une équation linéaire de pente 8.

La seconde caractéristique et la longueur L_j sur laquelle il s'étend. Quand la longueur du rouleau. La longueur de ressaut L_j n'a pas peut-être quantifiée par voie expérimentale et ça définition varié d'un auteur à un autre. En effet, on estime que la longueur L_j doit être mesuré toujours par la section à Laval du ressaut aux:

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 de rouleau de surface sont existantes
4. L'écoulement graduellement varié apparaît à l'extrémité aval du rouleau

Toutes les définitions ont pour but d'indiquer la limite aval du ressaut au-delà de la protection où le rendement du bassin amortisseur 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 comme ci-dessous :

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

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

$$L_j/h_2 = 6 \quad (1.12)$$

Autre formule a été proposé par Smetana(1993) pour un canal de section droite rectangulaire, selon Carlier (1980) on a :

$$L_j = 6(h_2 - h_1) \quad (1.13)$$

Pour $F_1 = 3$ selon Sinniger et Hager (1985), on peut aussi appliquer la formule empirique suivante :

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

En fin en va trouvé les mêmes résultats.

1.3. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire

1.3.1. Seuil continu à paroi mince

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

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

La Figure 1.9.a montre un ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince dans un canal rectangulaire. Le seuil de hauteur s est dénoyé et fonctionne alors comme un déversoir. La profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval du seuil n'a aucune influence sur le comportement du ressaut et répond à l'inégalité : $h_3 < h_2 - 0,7$

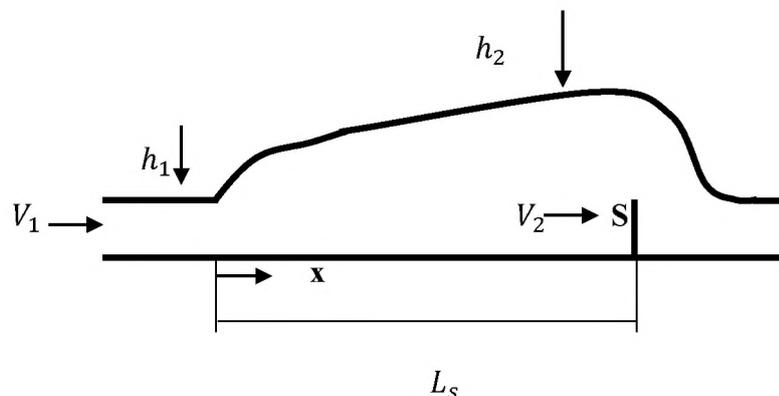


Figure 1.9.a Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

Les mesures expérimentales obtenues sont traduites graphiquement sur la Figure 1.9.b

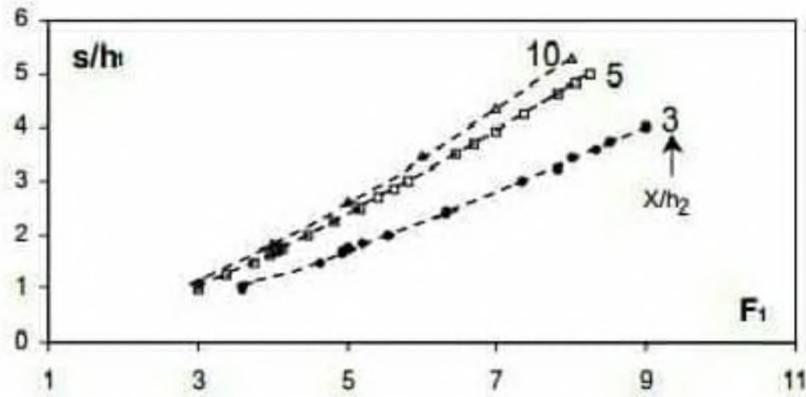


Figure 1.9.b variation expérimentale du F_1 en fonction de la hauteur relative S/h_1 du seuil à paroi mince quelques valeurs de X/h_2 (Forster & Skrinde)

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

1.3.2. Seuil continu à paroi épaisse

Le seuil est considéré comme épais lorsque le profil liquide s'y écoulant est presque parallèle au fond, pour peu que la longueur L du seuil soit suffisante (figure 1.10).

La notion de seuil épais est également liée aux caractéristiques de l'écoulement et suivant la classification de Rao et Murlidhar (1963), le seuil est considéré comme étant épais lorsque :

$$0.1 \leq (h_2 - s)/L \leq 0.35 \quad (1.15)$$

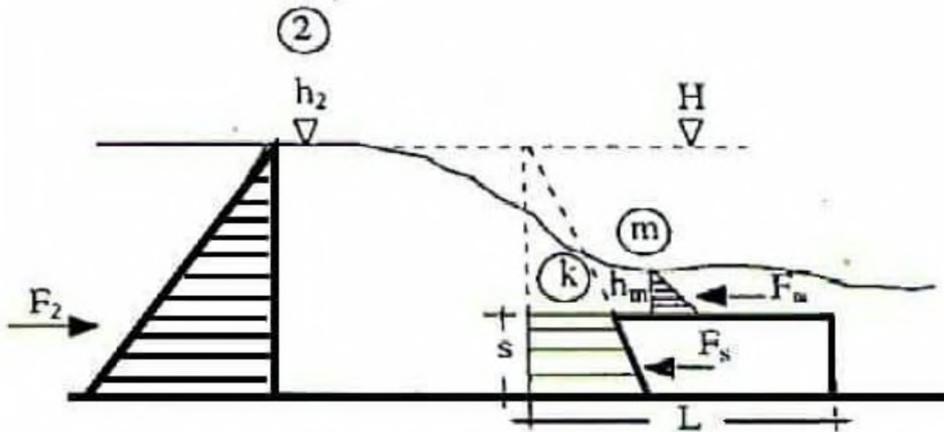


Figure 1.10 Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L .
Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique.

Dans la section 2, l'écoulement est en régime fluvial de profondeur h_2 . Le seuil est ensuite franchi par un écoulement en régime critique de profondeur K , suivi d'une tranche en régime torrentielle dont la profondeur finale h_m est minimale (section m).
L'étude théorique basée sur l'équation de la quantité de mouvement, appliquée entre la section initiale du ressaut et la section au droit du seuil, a abouti à une relation fortement implicite liant la hauteur relative s/h_1 du seuil et le nombre de Froude F_1 (équation 1.16). Le paramètre X/h_2 , n'a ainsi théoriquement aucune influence sur le contrôle du ressaut

$$\frac{21,33F_1^2}{\sqrt{1+8F_1^2-1}} = \frac{(\sqrt{1+8F_1^2-1}-2s/h_1)^3}{\sqrt{1+8F_1^2-1+2s/h_1}} \quad (1.16)$$

Au contraire le cas du seuil à paroi mince, une seule courbe est obtenue (figure 1.11), traduisant la variation de s/h_1 en fonction du F_1 . Cette courbe peut être utilisée à condition que :

$$h_3 < (2h_2 + s)/3 \quad (1.17)$$

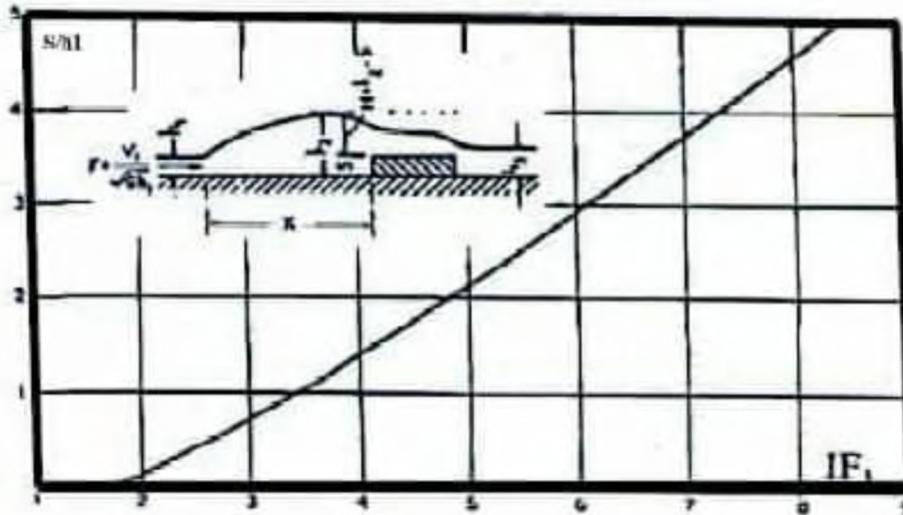


Figure 1.11 Variation expérimentale du nombre de Froude F en fonction de la hauteur relative du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation (1.30)

1.4. Conclusion

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

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

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

A la fin de ce chapitre, nous avons examiné, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, et nous avons cité les travaux de Forster et Skrinde (1950) concernant le seuil à paroi mince. Les auteurs ont défini, en premier lieu, la variation de la hauteur relative $S = s/h_1$ du

seuil en fonction du nombre de Froude F_1 et pour des valeurs données de x/h_2 . En deuxième lieu, ils ont établi trois courbes à la base des données expérimentales, ils ont constaté que les trois courbes se rapprochent, lorsque la valeur de x/h_2 augmente.

CHAPITRE

02

Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal

2.1. Introduction

Les caractéristiques du ressaut se formant dans un canal trapézoïdal sont sensiblement différentes de celles obtenues dans la section précédente. Ce chapitre 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°.

2.2. Approche de Hager et Wanoschek (1989)

2.2.1. 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 mesurés 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 $F_1 < 4$.

2.3. Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

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

2.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

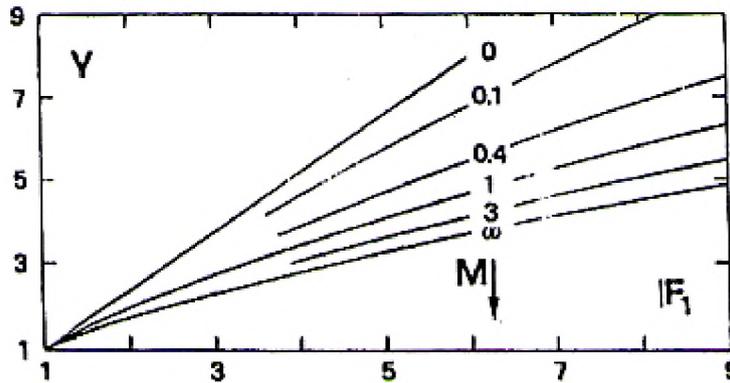


Figure 2.1 Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M . $M \rightarrow 0$: profil rectangulaire. $0 < M < \infty$: profils trapézoïdaux.

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 :

$$V_1 = Q/A_1 \tag{2.1}$$

Q : Le débit volume.

A_1 : la section mouillée initiale.

Et on peut exprimer A_1 par la formule suivante :

$$A_1 = bh_1 + mh_1^2 \tag{2.2}$$

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 :

$$P_1 = \bar{\omega} \bar{h}_1 A_1 \quad (2.3)$$

$$P_2 = \bar{\omega} \bar{h}_2 A_2 \quad (2.4)$$

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

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6} \cdot \frac{3b+mh_1}{A_1} \quad (2.5)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6} \cdot \frac{3b+mh_2}{A_2} \quad (2.6)$$

En applique la loi de Newton ,les équations (2.5) et (2.6) peut se ramener à :

$$\frac{bh_1^2}{2} + \frac{mh_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(bh_1+mh_1^2)^3} = \frac{bh_2^2}{2} + \frac{mh_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(bh_2+mh_2^2)^3} \quad (2.7)$$

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

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_1^2)^3}, y = \frac{y_2}{y_1} = \frac{h_2}{h_1}, M = \frac{mh_1}{b} \quad (2.8)$$

L'équation (2.7) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme :

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

La relation (2.9) 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 (2.9)

Il y a 2 cas particuliers de section trapézoïdal ; la section rectangulaire : Cette section n'est qu'un cas particulier de la section trapézoïdale avec une pente de talus $m = 0$ et on a le déjà connu dans le 1^{er} chapitre et , la section triangulaire.

2.2.2. Cas particulier du canal triangulaire

En remplaçant dans l'équation (1.9) : $b = 0$ et $1/M=0$ ($M \rightarrow l'infini$), L'équation (2.9) donne :

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^2+Y+1)}{3(Y+1)} \quad (2.10)$$

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

$$Y = \left(\frac{3}{2} F_1^2 - 1 \right)^{1/2} \quad (2.11)$$

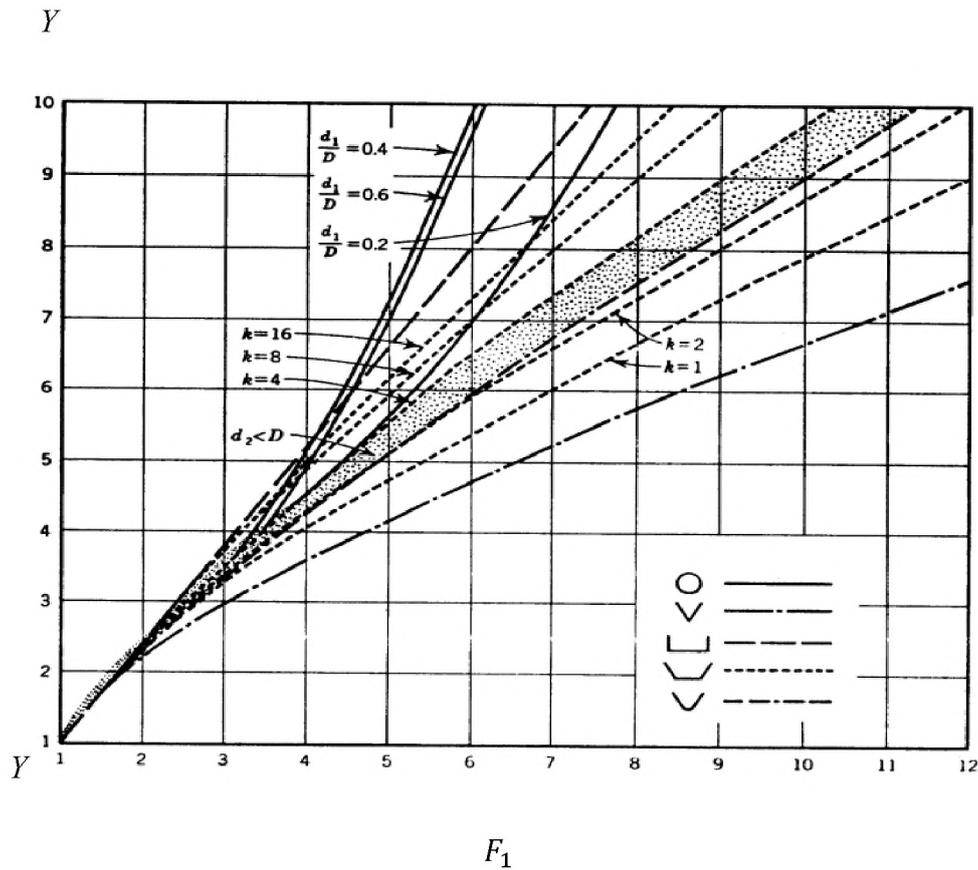


Figure 2.2 Rapport entre les hauteurs conjuguées du ressaut pour différents types de canaux (adapté de Silvester 1964).

La Figure 2.2 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 F_1 de l'écoulement incident.

2.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut

2.2.3.1. Longueur du rouleau de fond

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

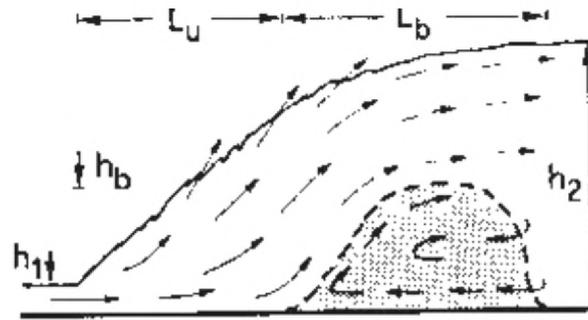


Figure 2.3 schéma de ressaut en canal trapézoïdal, Hager et Wanoschek (1989)

Les figure 2.4 de a à c montre les rapports $\lambda_u = L_u/h_2$, $\lambda_b = L_b/h_2$ & 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.

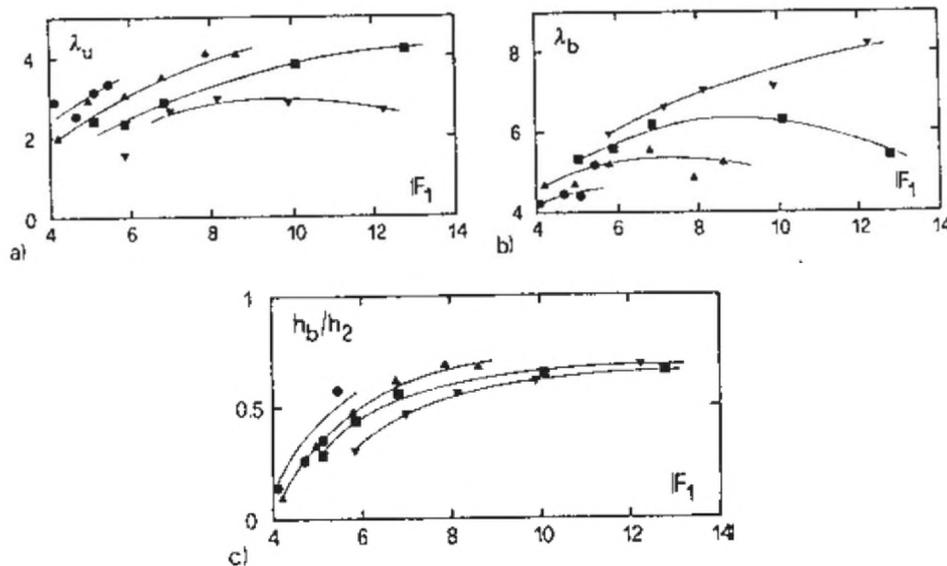


Figure 2.4 caractéristique principale du rouleau de fond: a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximale

La figure 2.4 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 valeurs aussi supérieures que la valeur 8.
- λ_b diminue avec l'augmentation de M.
- à 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 .

2.2.3.2. Longueur de ressaut

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

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

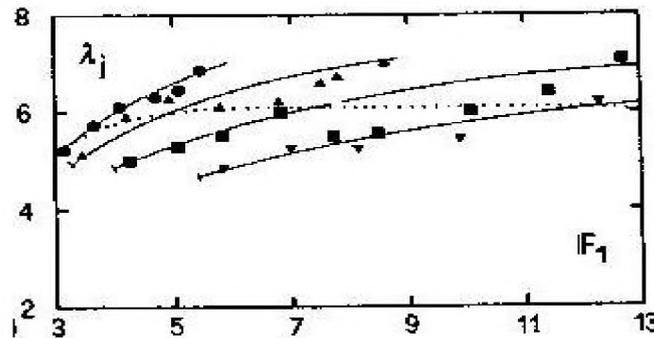


Figure 2.5 longueur relative λ_j du ressaut en fonction de F_1

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

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_2} = 5 \left[1 + 4 \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right)^{1/2} \right] \quad (2.12)$$

$W_1 = b + 2mh$ et W_2 c'est la largeur de la section mouillée.

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

Une autre formule de la longueur du ressaut a été analysée par Silvester (1964),

Wanoschek et Hager (1989) c'est la relation : $\frac{L_j}{h_2 - h_1} = 7.1(1 + 10M)$

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

- L_u : Distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau du fond.
- L_b : Longueur du rouleau du fond.
- h_b : Hauteur maximale du rouleau du fond.(figure 2.3)

2.2.3.3. Le rendement

On peut obtenir l'équation de rendement à partir de l'équation de perte de charge les pertes de charge ΔH du ressaut c'est la différence des charges initiale et finale

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

Et la perte de charge relative écrite comme suit :

$$\eta = \Delta H / H_1 = (H_1 - H_2) / H_1 \quad (2.13)$$

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2}$$

$$H_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}$$

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

$Y = h_2/h_1$ et de $M = mh_1/b$, ainsi que le nombre de Froude F_1 tel que :

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

On obtiendra :

$$\eta = 1 - \left[\left[Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \left(\frac{(1+M)^3}{(1+2M)(1+MY)^2} \right) \right] \cdot \left[1 + \frac{F_1^2(1+M)}{2(1+2M)} \right]^{-1} \right] \quad (2.14)$$

$$\text{Avec } 0 < \eta < 1$$

Pour le cas du canal triangulaire on a : $1/M = 0 ; (M \rightarrow \infty)$ l'expression de rendement sera :

$$\eta = 1 - \left[\left(Y + \frac{F_1^2}{4Y^4} \right) \cdot \left(1 + \frac{F_1^2}{4} \right)^{-1} \right] \quad (2.15)$$

Hager et Sinniger (1985) proposent la relation approchée suivante:

$$\text{Pour } F_1 > 3 \quad \eta = \left[\left(1 - \frac{12}{F_1^4} \right)^{1/3} \right]^2 \quad (2.16)$$

La représentation graphique (figure 2.6) de la relation générale (2.14), montre que pour même nombre de Froude F_1 , le rendement du ressaut triangulaire est plus élevé que celui du rectangulaire ou du trapézoïdale. Comparé au rendement du ressaut rectangulaire, le rendement du ressaut trapézoïdal est environ 10 % plus important.

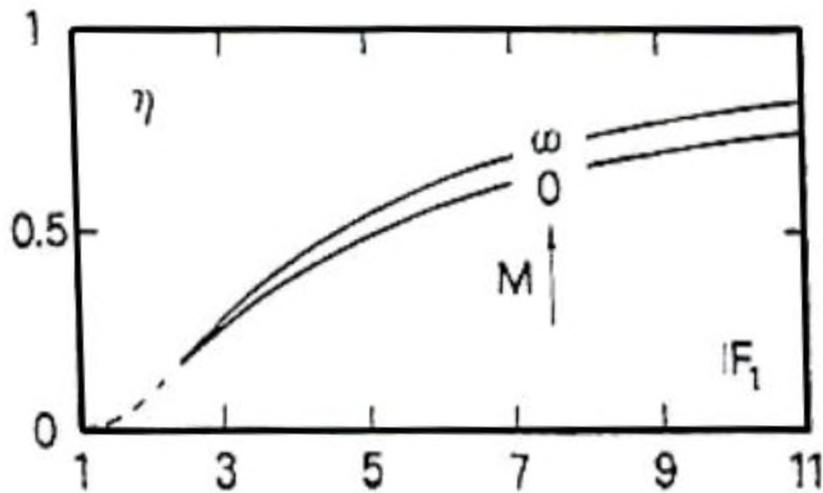


Figure 2.6 Représentation graphique de la relation (2.14) du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . $M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire.

2.3. Conclusion

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

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

Concernant la relation de la perte de charge relative, nous avons eu recours au théorème de Bernoulli pour la détermination de la charge totale en amont et en aval du ressaut ; nous pouvons donc déduire le résultat du canal rectangulaire et triangulaire, et nous

avons présenté la relation approchée de Hager et Sinniger (1985). La représentation graphique de la relation du rendement du ressaut, en fonction du nombre de Froude F_1 en canal trapézoïdal, a montré que, c'est le canal triangulaire qui présente le plus grand intérêt du point de vue rendement.

En fin de ce chapitre, suite aux résultats de l'étude bibliographique obtenue, plusieurs points importants sont à retenir :

1. Pour la valeur de nombre de Froude donnée :

a) Le rapport Y_2/Y_1 diminue en passant du canal rectangulaire au canal trapézoïdal et au canal triangulaire.

b) Le rendement augmente en passant du canal rectangulaire au canal triangulaire.

c) La longueur du ressaut augmente du canal triangulaire, au canal rectangulaire et au canal trapézoïdal.

2. La longueur de ressaut obtenue dans un canal trapézoïdal peut être de 2 à 3,5 fois supérieure celle obtenue dans un canal rectangulaire pour la même valeur de F_1 . La présence des contre-courants de chaque côté du canal trapézoïdal en aval du ressaut explique ce phénomène. En effet, ceux-ci diminuent la force de pression disponible pour supporter le ressaut.

CHAPITRE

03

Ressaut hydraulique en canal composé

3.1. Introduction

Bien que de nombreux chercheurs aient étudié l'écoulement hydraulique dans les canaux composés. Il y a encore, beaucoup de problèmes dans la détermination de leurs courbes. Il ya nombreuses méthodes différentes ont présenté pour ces canaux pour tous les types de forme composés avec différents géométriques, les conditions hydrauliques sont certainement difficiles, l'écoulement dans la forme des canaux composée est destiner par certaines caractéristiques différents à autre. , ces caractéristiques sont permet à exploiter la forme composée au lieu que d'autres formes.

Mais l'étude des écoulements uniformes, ou plus encore les écoulements non uniformes en lit composé sont très compliqués à cause du transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al. 2005). Ces deux phénomènes, se manifestant de différentes façons, sont des sources de dissipation d'énergie supplémentaire de l'écoulement. Il peut être donc intéressant de voir la grandeur de ces dissipations dans le cas où il se produit un ressaut hydraulique dans le lit composé.

Et c'est pour ça, nous avons besoin de ce type des canaux afin de dissiper l'énergie hydraulique par l'utilisation de phénomène du ressaut hydraulique.

Ces canaux composés s'intéressent à l'hydraulique à surface libre. Ce type de comportement hydraulique se rencontre essentiellement en assainissement et surtout en rivière.

A travers ce chapitre nous allons citer quelques études concernant les canaux de forme composé et particulièrement, l'étude expérimental de Achour et khataoui (2012) sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal de forme rectangulaire composée.

3.2. L'origine de la forme composée

Un cours d'eau est confiné dans son lit mineur en période normale. En période de crue, le lit mineur peut déborder et l'eau envahir les plaines d'inondations qui forment le lit majeur. Dans ce cas ,le lit mineur est flanqué des lits majeurs.

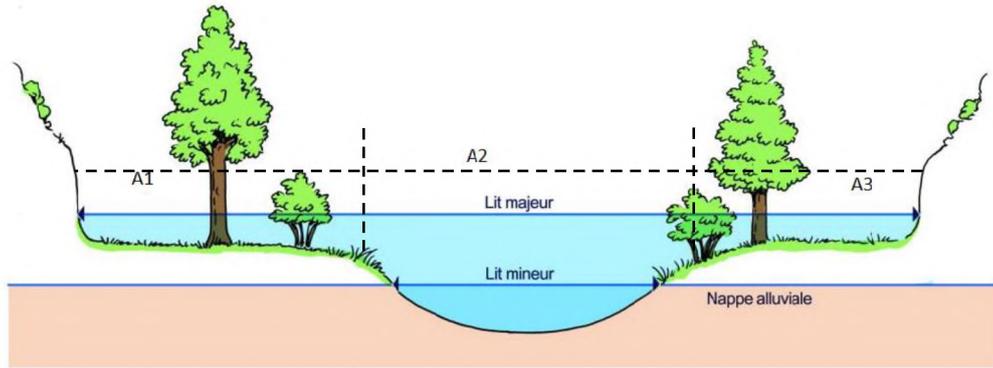


Figure 3.1 Image explicative du lit mineur et le lit majeur en cas d'inondation

La méthode la plus simple divise le cours d'eau en sections d'écoulement homogène et le débit total est égal au débit de chacune des sections (Figure 3.1).

$$Q = V_1 A_1 + V_2 A_2 + V_3 A_3$$

$$Q = \frac{A_1}{n_1} R h_1^{2/3} S^{1/2} + \frac{A_2}{n_2} R h_2^{2/3} S^{1/2} + \frac{A_3}{n_3} R h_3^{2/3} S^{1/2}$$

Et le coefficient de la rugosité moyenne :

$$\bar{n} = \frac{\sum A_i R h_i^{2/3}}{\sum \frac{A_i}{n_i} R h_i^{2/3}}$$

Chow (1959) présente d'autres méthodes d'évaluation qui sont semblables à celle-ci.

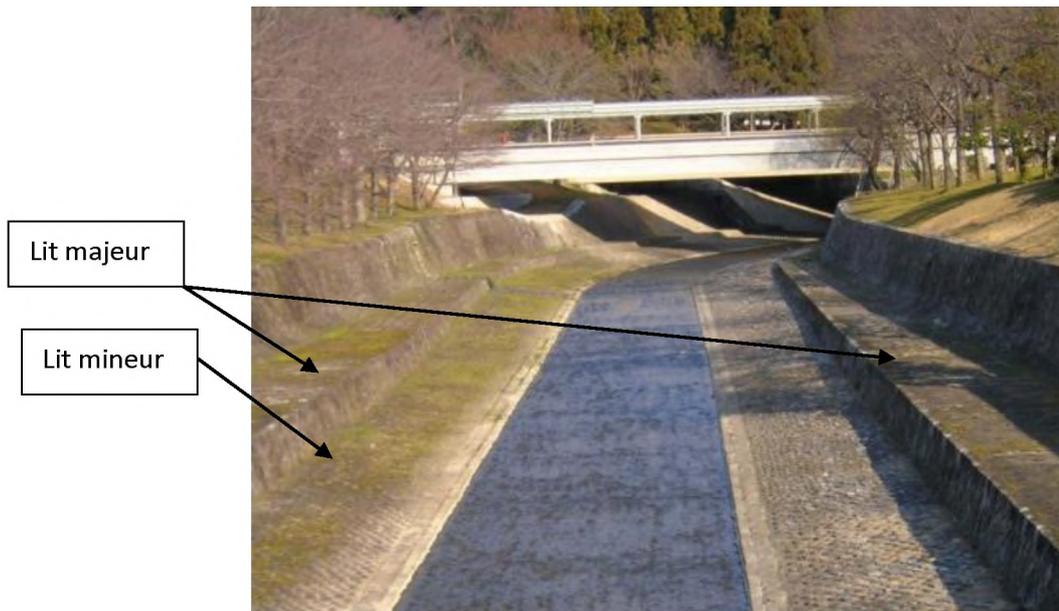


Figure 3.2 Représentation d'un canal de forme composé

3.3. Histoire de quelques études sur les canaux de forme composée

3.3.1. Approche de Sellin(1964)

Sellin (1964) a conduit un nombre d'essais dans un canal composé et est arrivé à un résultat du mécanisme de transfert d'impulsion dans un canal composé qui est dû à la vitesse relative entre le canal principal et la plaine d'inondation. Il a étudié les tourbillons qui se forment à l'interface du canal principal et de la plaine inondable. Il a analysé le débit et les vitesses pour les conditions composées et simples. Il a observé que la vitesse se trouvait plus dans la condition simple que celle de l'état composé.

3.3.2. Approche de Rajaratnam et Ahmadi (1979)

Les auteurs ont rapporté l'effet de l'écoulement dans un canal droit composé avec des lits majeurs symétriques lisses. Ils ont déclaré au que le mécanisme de transfert de moment a eu lieu du lit mineur au lit majeur. Ils ont également conclu qu'avec l'augmentation de la profondeur de l'écoulement sur le lit majeur, l'effet de l'interaction du débit diminue. Le cisaillement du lit du canal principal est diminué.

3.3.3. Approche de Wormleaton et al (1982)

Les auteurs ont étudié le canal composé droit et ont mené une série d'essais au laboratoire dans le canal composé avec des plaines d'inondation symétriques pour mesurer

l'écoulement. Ils ont utilisé la méthode des canaux de division pour calculer le débit. Pour avoir choisi la meilleure méthode de division du canal. Ils ont suggéré un rapport de contrainte de cisaillement apparent. Des résultats satisfaisants ont été obtenus par la méthode des canaux divisés par interface horizontale et diagonale par rapport à la méthode des canaux divisés par interface verticale.

3.3.4. Approche de Knight et Demetriou (1984)

Ils ont étudié les caractéristiques de l'écoulement, les distributions de la force de cisaillement limite et la contrainte de cisaillement limite à une section du canal composé symétrique. Pour estimer le pourcentage de la force de cisaillement dans les équations de lit majeur étaient proposées. Ils ont également étudié diverses sous-zones de la section composée et calculé les proportions du débit total. La force de cisaillement apparente pour l'interface verticale entre le canal principal (le lit mineur) et la plaine d'inondation (le lit majeur) est plus grande pour une profondeur d'écoulement plus faible et une largeur de plaine d'inondation plus élevée.

3.3.5. Approche de Wormleaton and Hadjipanos (1985)

Ils ont rapporté une étude en canal composé pour la distribution du débit. Ils ont conclu que même si une méthode de prévision de l'écoulement peut donner des résultats satisfaisants dans l'écoulement globale, mais la distribution d'écoulement de vitesse entre le lit mineur et le lit majeur peut être suffisamment modélisée.

3.3.6. Approche de Knight et Shiono (1996)

Knight et Shiono ont étudié sur le canal composé avec une section transversale différente. Il ont étudié le modèle trapézoïdal et ont développé un modèle analytique qui prédit la contrainte de cisaillement limite et la vitesse moyenne de profondeur. Pour cela, des équations mathématiques ont été proposées qui influencent la couche de cisaillement entre le canal principal et la plaine inondable.

3.4. L'avantage des canaux de type composés

On peut remarquer quelques avantages de ce type des canaux :

- Il peut être effectué des travaux de maintenance presque toujours, C'est lorsque l'écoulement dans le canal principal.

- Obtenez une vitesse considérable permet le transfert des sédiments dans le cas des écoulements faibles, et aussi ils ont la capacité d'absorber des débits importants en cas des crues.
- l'interaction entre les zones de différente profondeur d'eau augmente la dissipation d'énergie.
- En ce qui concerne les avantages environnementaux et écologiques des canaux à deux étages proviennent en partie des quelques apparences.
- L'utilisation la plus générale des plaines inondables (le lit majeur) est pour l'agriculture,
- en particulier où ils ont une caractéristique naturelle du paysage, et nous pouvons être utiliser les lits majeurs comme des zones de dévêtissement.

3.5. Les caractéristiques de l'écoulement

Les différentes vitesses dans le canal profond et sur les bermes provoquer un forte turbulence à l'intersection, et cela influence le débit sur une distance considérable de chaque côté de la ligne de berme. Cette turbulence est le mécanisme supplémentaire de perte de charge, et elle doit dépendre du gradient transversal de vitesse qui caractérise la couche de cisaillement, la théorie de la turbulence moderne est capable de gérer de telles situations et peut fournir des solutions générales ; la figure (3,3) représente des paramètres physique qui produit par l'écoulement, Cependant, l'étape actuel de développement ne favorise pas encore son utilisation dans la conception technique normale, en partie à cause de la complexité, mais surtout en raison de la précision de l'incertitude d'une méthode de prédiction de manière générale, et ainsi de la méthode proposée ici utilise des facteurs d'ajustement empiriques.

L'influence des différents écoulements et les caractéristiques géométriques sur le degré d'interaction entre le canal principal et le lit majeur du canal est établi par le rapport entre le débit réel à la décharge nominale.

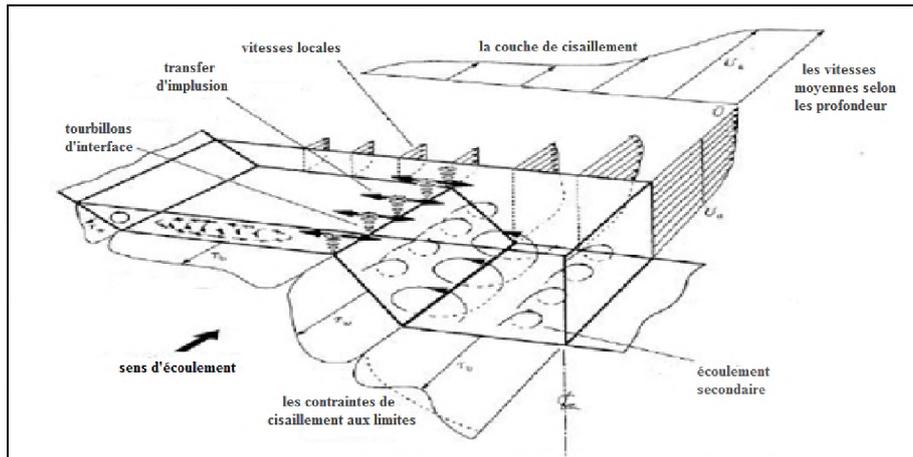


Figure 3.3 structure de l'écoulements générées en raison du canal principal-plaine inondable interaction sur une section droite composée (Knight and Shiono,1996).

3.6. La géométrie du canal

Possibilité de préciser les dimensions de base des canaux par utilisation des géométries globale.

En cas de canal de section rectangulaire composée, Figure (3.3.1)

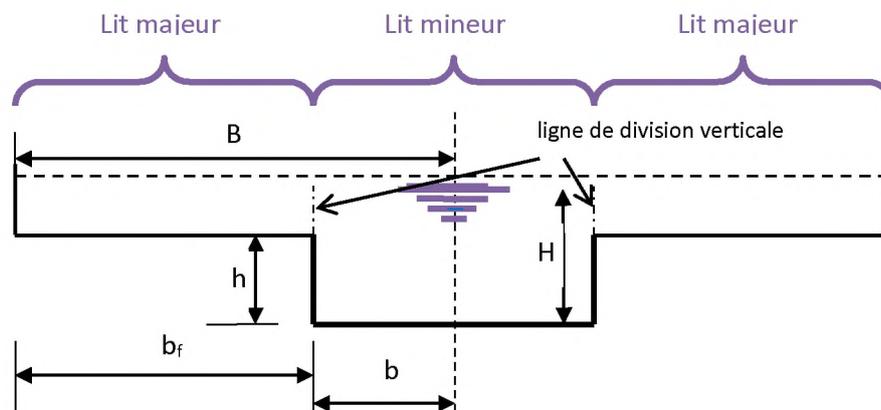


Figure 3.4.1 canal de section rectangulaire composée: définitions et terminologie

tel que :

- b : largeur du lit mineur diviser par 2 .
- b_f : largeur d'un berme.
- B : largeur du lit majeur diviser par 2.
- h : hauteur de plein bord du lit mineur .
- H : la charge d'eau sur le lit mineur en cas de plaine inondable.

En cas de canal de section trapézoïdal composée , Figure 3.4.2

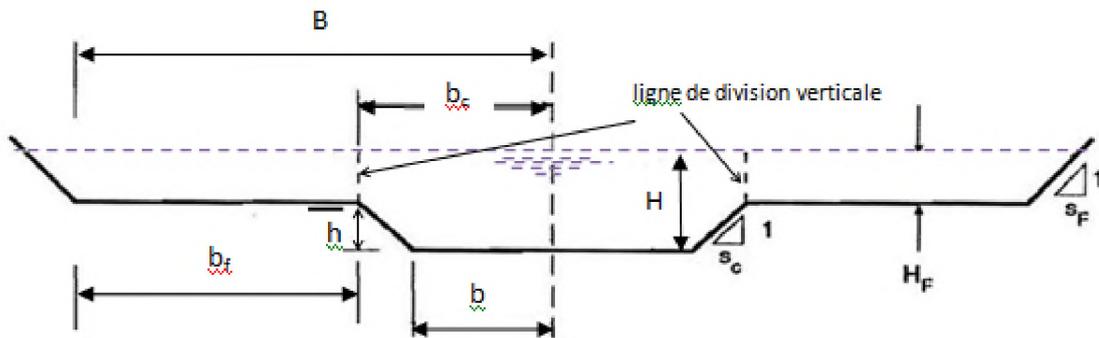


Figure 3.4.2 canal de section trapézoïdal composé: définitions et terminologie

b_c : largeur de plein bord du lit mineur divisé par 2 .

s_c : cotangente des talus de lit mineur.

s_f : cotangente des talus de lit majeur.

H_f : la charge d'eau sur le lit majeur.

On est déterminée les dimensions d'un côté du canal, pour étudier l'écoulement, parce que c'est le même résultat pour l'autre côté (canal symétrique).

3.7. Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé

Selon les notes, qui on été tirées, nous constatons que nous pouvons obtenir un bon résultat lors de l'utilisation du canal de forme composé pour dissiper l'énergie de l'eau par le phénomène du ressaut hydraulique.

D'après les travaux de *Khattaoui et Achour (2012)*, sur le ressaut hydraulique dans ce canal Nous allons voir comment l'évolution du ressaut hydraulique.

3.7.1. Rapport des hauteurs conjuguées

La Figure 3.5 montre les différentes caractéristiques géométriques et hydrauliques du ressaut hydraulique en lit composé droit

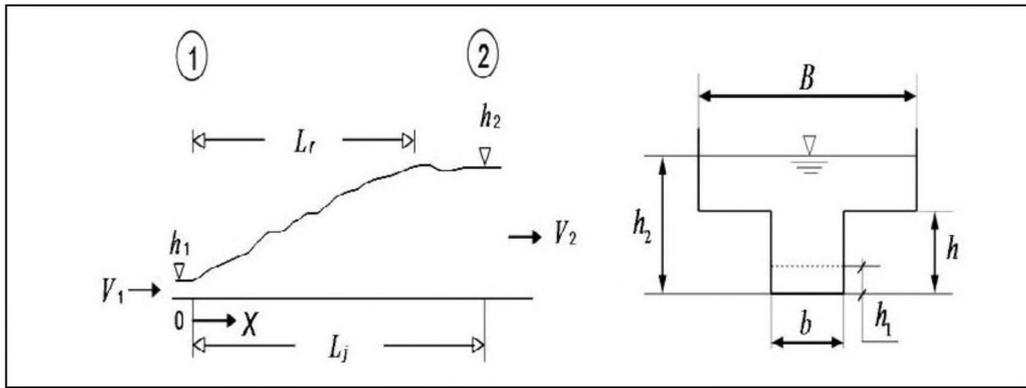


Figure 3.5 Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit rectangulaire

Le transfert de masse et de quantité de mouvement se produit à l'interface entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al. 2004).

L'équation de la quantité de mouvement appliquée entre le pied et la fin du ressaut, défini par la figure 1, s'écrit comme suit :

$$\rho \cdot Q(\beta_2 \cdot V_2 - \beta_1 \cdot V_1) = f_1 - f_2 \quad (3.1)$$

Où :

β_1 et β_2 : facteurs de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité puisque la répartition des vitesses est supposée uniforme.

f_1 et f_2 : Forces hydrostatiques au pied et à la fin du ressaut.

ρ : la masse volumique du liquide en mouvement.

Q : débit volume.

V : Vitesses moyennes au pied et à la fin du ressaut

En s'inspirant de l'article de Achour (2000), par analogie à la relation de Borda-Carnot et au vue de la forme de la relation 1, il paraît admissible de rajouter une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement aurait comme expression:

$$f_x = -k \cdot \varpi (h_2 - h)^x \cdot h_1^y (B - b)^z \quad (3.2)$$

Où :

h_1 et h_2 : Charges d'eau au pied et à la fin du ressaut

h : Hauteur de plein bord du lit mineur.

ϖ : Poids spécifique du liquide.

k : Coefficient.

b : Largeur du lit mineur.

B : Largeur du lit majeur.

C'est une source de perte de charge liée nécessairement au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur. Les exposants, r , y et z sont liés par la relation $x+y+z = 3$, le coefficient k est tel que $k = \varphi. (L_j \text{ ou } L_r, h_2, h_1, h)$

En tenant compte de f_x , l'équation d'Euler devient :

$$\rho. Q^2(1/A_2 - 1/A_1) = f_1 - f_2 + f_x \quad (3.3)$$

Où : f_x : Force de résistance.

Analysons l'équation pour la fonction $f_x = (1/2). \varpi(h_2 - h). h_1(B - b)$

L'hypothèse d'une distribution uniforme pour les vitesses dans les sections transversales correspondant au pied et à la fin du ressaut implique que $\beta_1 = \beta_2 = 1$. Les sections A_1 et A_2 sont données respectivement par $A_1 = bh_1$ et $A_2 = B(h_2 - h) + bh$. Prenons comme hypothèse aussi que la distribution des pressions est hydrostatique dans les sections 1 et 2 du ressaut, ce qui donne les expressions des forces :

$$f_1 = \varpi(h_1/2). bh_1 \quad \text{et} \quad f_2 = \varpi(h_2 - h/2). bh + \varpi [(h_2 - h)/2] . B(h_2 - h)$$

En tenant compte de toutes ces hypothèses et informations ainsi que de l'équation de continuité, $V_1A_1 = V_2A_2 = Q$, l'équation 3 s'écrit en définitive, après réarrangement, comme suit :

$$2F_1^2 \left(\frac{\beta}{Y-(1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (3.4)$$

$$\text{Où : } F_1 = Q / \sqrt{b^2 \cdot h_1^3 g} \quad (3.5)$$

$\tau = h_1/h$: Rapport des hauteurs

$\beta = b/B$: Rapport de l'élargissement

En négligeant la force de résistance f_x , l'équation résultante aurait comme expression :

$$2F_1^2 \left(\frac{\beta}{Y-(1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} \quad (3.6)$$

Les relations (3.3) et (3.4) sont des équations fonctionnelles de forme $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

Notons que les équations 4 et 6 peuvent s'écrire sous la forme $Y + aY^2 + bY + C = 0$.

En faisant le changement de variable $Y = x - a/3$, l'équation de troisième degré devient sous la forme $Y^3 + pY + q = 0$ dont la résolution peut se faire aisément en utilisant la méthode trigonométrique.

La Figure (3.6) illustre la variation de Y , calculé par l'équation (3.6), en fonction de F_1 . L'une des variables, β ou τ , est fixée, l'autre varie avec un pas de 0,2. Pour que le ressaut se produise effectivement dans le canal composé ($h_2 > h$), les valeurs de F_1 à considérer doivent être strictement supérieur à la valeur minimale $F_1 = [1/(2\sqrt{2})]\sqrt{(2/\tau + 1)^2 - 1}$ correspondant à $h_2 = h$.

On s'aperçoit de ces figures, que pour un β et τ données, Y augmente continuellement avec l'accroissement de F_1 . L'augmentation du rapport Y en fonction de F_1 est plus rapide pour de grandes valeurs de β . Pour un F_1 fixé, Y croît avec l'accroissement de β et diminue avec l'augmentation de τ .

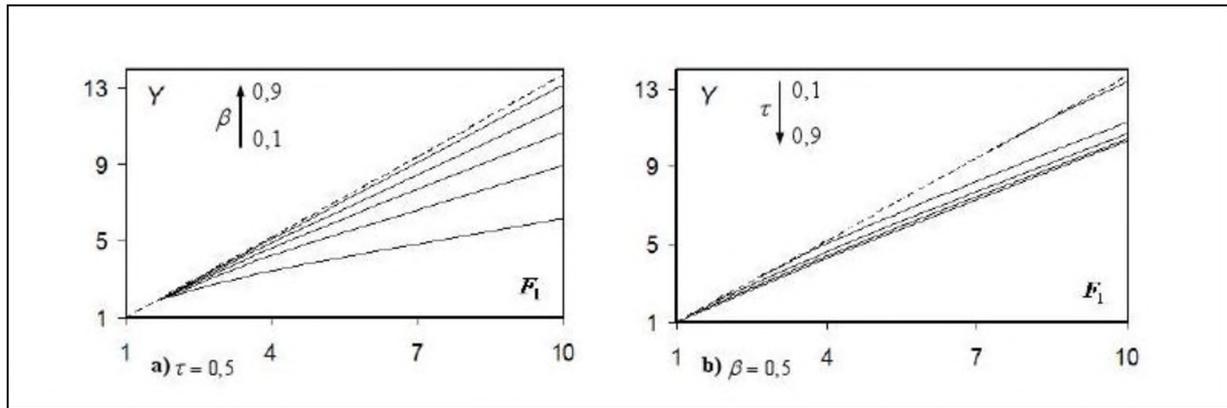


Figure 3.6 Variation de Y , calculé par (1), en fonction de F_1 . (---) : $\beta=1$

Sur la figure (3.6) nous avons représenté la variation de Y en fonction de F_1 pour $\beta = T = 0,5$. On voit clairement que les Y calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont inférieures à celles calculées en l'a négligeant. La différence est plus claire au fur et à mesure que le nombre de Fronde F_1 augmente. La force f_x traduit les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

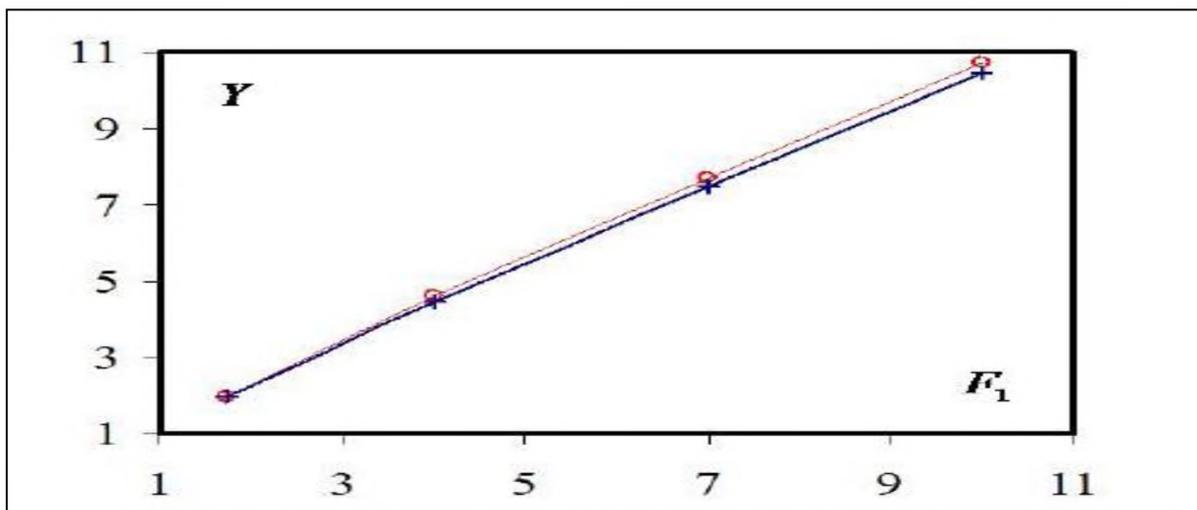


Figure 3.7 Variation de Y en fonction de F_1 . (O) : équation (1), (+) : équation 1

Sur la figure (3.7) nous avons représenté la variation de Y en fonction de F_1 pour $\beta = T = 0,5$. On voit clairement que les Y calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont inférieures à celles calculées en l'a négligeant. La différence est plus claire au fur et à mesure que le nombre de Fronde F_1 augmente. La force f_x traduit les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

3.7.2. Rendement du ressaut

En considérant les mêmes hypothèses que pour le rapport des hauteurs conjuguées, le rendement, $\eta = \Delta H / H_1$, peut s'exprimer par :

$$\eta = 1 - \frac{Y \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (3.7)$$

L'équation (3.7) permet le calcul, d'une manière explicite, le rendement du ressaut se produisant en lit composé droit, connaissant F_1 , Y ainsi que β et τ . En considérant les valeurs de Y calculées avec la relation (3.6), nous avons représenté sur la figure (3.7) la variation de η en fonction de F_1 . Pour un τ et un β fixés, il est clairement illustrer sur la figure que le rendement η d'un ressaut hydraulique dans un lit composé, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de F_1 .

Pour un τ connu, en fixant F_1 , η diminue avec l'augmentation de β . Pour un β et un F_1 fixés, on peut aisément voir que le η augmente avec l'accroissement de τ .

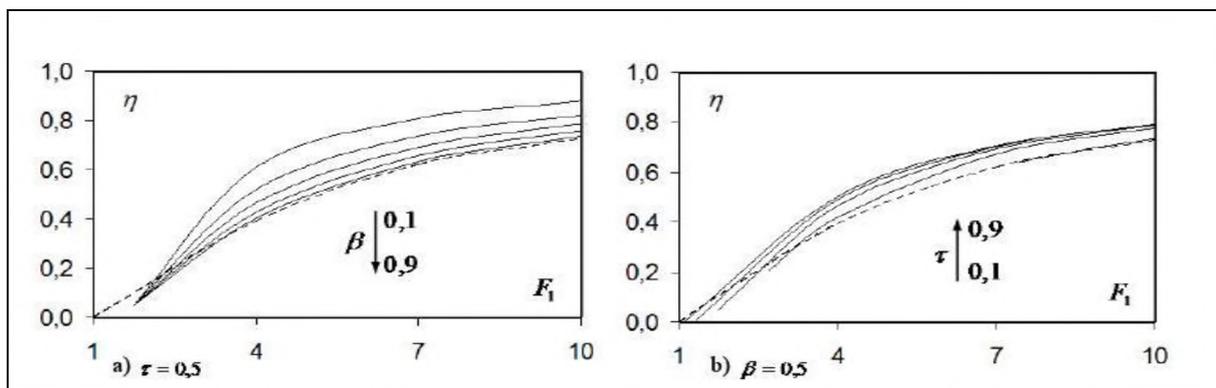


Figure 3.8 Variation de η en fonction de F_1 . (---) : $\beta=1$. Y est calculé par l'équation 3

Sur la figure (3.9) est représentée la variation de η en fonction de F_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. Il est bien illustré que les η calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont supérieures à celles calculées en l'a négligeant.

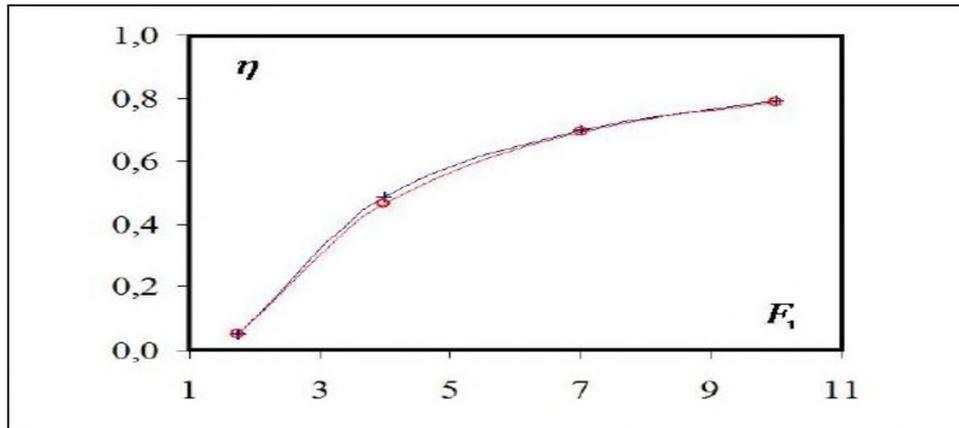


Figure 3.9 Variation de η en fonction de F_1 . (0) : équation 2, (+) : équation 2

3.8. Conclusion

Ce chapitre de cette étude bibliographique a pour objectif de faire le point sur les principales caractéristiques du canal composée, et les travaux dans le domaine du ressaut hydraulique dans ce type de canal.

Nous pouvons remarquer que le canal de lit composé produit une turbulence à l'intersection des lits, qui aide dans la dissipation d'énergie, ainsi que le phénomène de ressaut hydraulique.

En plus, la nouvelle approche est proposée en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du développement théorique mené par *Achour* (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans son développement, les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapprochées de la réalité.

Afin de trouver l'expression mathématique de cette force de résistance, étroitement liée au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures, sur un modèle réduit au laboratoire, sont disponible.

Conclusion de la première partie

Conclusion de la première partie

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

Le premier chapitre a eu pour but d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire.

Le ressaut hydraulique classique, où nous avons mis l'accent sur les travaux de Hager (1990), relatif aux caractéristiques du ressaut classique. Nous avons montré que l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre ses sections initiale et finale, en négligeant les pertes de charge autres que celles dues au ressaut, mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement. et d'après l'équation de Bernoulli, nous avons défini le rendement et l'efficacité de dissipation, plus de ces travaux, nous avons abordé aussi tous ce qui concerne la longueur de rouleur et la longueur de ressaut, et en fin on a touché les travaux de ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince et épais en canal de section droite rectangulaire (l'approche de Forster et Skrinde (1950).

Dans le deuxième chapitre, on a examiné les travaux qui sont concerné le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal; premièrement l'approche de Hager et Wanoschek (1989), 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, deuxièmement on a vu en détail comment obtenir l'équation qui exprime la variation du nombre de Froude à l'amont du ressaut en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées, et en fin de ce chapitre, on a abordé les caractéristiques de ressaut et le rendement en canal de section trapézoïdale.

Dans le dernier chapitre bibliographique, il a pour objectif de faire le point sur les principales caractéristiques du canal composée, et les travaux dans le domaine du ressaut hydraulique dans un canal de section composé,

- Premièrement nous avons représenté ce canal dans la nature, on a défini aussi leur lits (le lit mineur et le lit majeur),
- Deuxièmement nous avons représenté aussi quelques études sur les canaux composé comme l'étude de Knight et Shiono (1998),
- Et en fin, nous avons examiné le travail de Achour et khataoui (2012) sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal de forme rectangulaire composée.

Partie N°

02

L' étude expérimentale

Introduction à la deuxième partie

Introduction à la deuxième partie

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

Le ressaut hydraulique dans les canaux composé n'a connu que très peu d'études. Les travaux les plus récents dans ce domaine, sont ceux de Khataoui et Achour (2012), ces auteurs ont étudié les différentes caractéristiques de ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire composé, alors que le cas du ressaut hydraulique évaluant en canal trapézoïdal composé à base rectangulaire, n'a pas fait l'objet d'étude pour ces chercheurs. C'est ce qui nous a poussés à faire le pas pour aborder cette étude, en nous basant toujours sur les travaux et les résultats obtenus par nos antécédents.

Les travaux de la deuxième partie de notre étude, consistent à analyser expérimentalement les caractéristiques de ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal composé à une base rectangulaire.

L'objet principal de cette étude, est de déterminer expérimentalement les relations fonctionnelles liant les différents paramètres de ce type de ressaut hydraulique.

Dans le but d'organiser ce travail, nous avons divisé la partie de notre étude en deux chapitres

- Le premier chapitre sera consacré à la description du modèle expérimental utilisé pour entamer l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal composé à une base rectangulaire.
- Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude expérimentale afin de donner une description détaillée des essais, et enfin à l'analyse des résultats expérimentaux.

CHAPITRE

01

Description de modèle

1.1. Introduction

Avant d'aborder le côté pratique, nous devons introduire la description détaillée du modèle expérimental, description de banc d'essais, les appareillages de mesures, la forme de canal et également la formule utilisée pour le calcul de débit.

1.2. Description de canal

Les expériences ont été conduites le canal à surface libre, il s'agit d'un canal superposé de section trapézoïdal à base de section rectangulaire (Figure 1.9), la base ; la hauteur et la largeur, la mesure de chacun d'eux est 0.2m ; et le trapèze de 0.2m aussi avec un angle d'inclinaison de 45 degrés, et la longueur totale de canal est de 12m . Le canal a été construit à partir de deux côtés d'une série de 12 panneaux transparents en plexiglas permettant les prises de vues et observations, Ces panneaux sont reliés entre eux par collage au silicone. Celui-ci est relié à un bassin d'accumulation par le moyen d'une conduite circulaire de 115 mm de diamètre, Elle est reliée à une boîte métallique fermée (la boîte en charge) (Figure 1.7), sur laquelle est insérée une ouverture en tôle de section rectangulaire débouchant dans le canal. Le rôle de cette dernière est de générer un écoulement incident à grande vitesse. La section de sortie de celle-ci est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale h_1 du ressaut. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérées deux pompes axiales reliées en parallèles débitant jusqu'à 40 l/s chacune, et on a fixé les seuils à l'extrémité du canal ($x \approx 4.6m$)

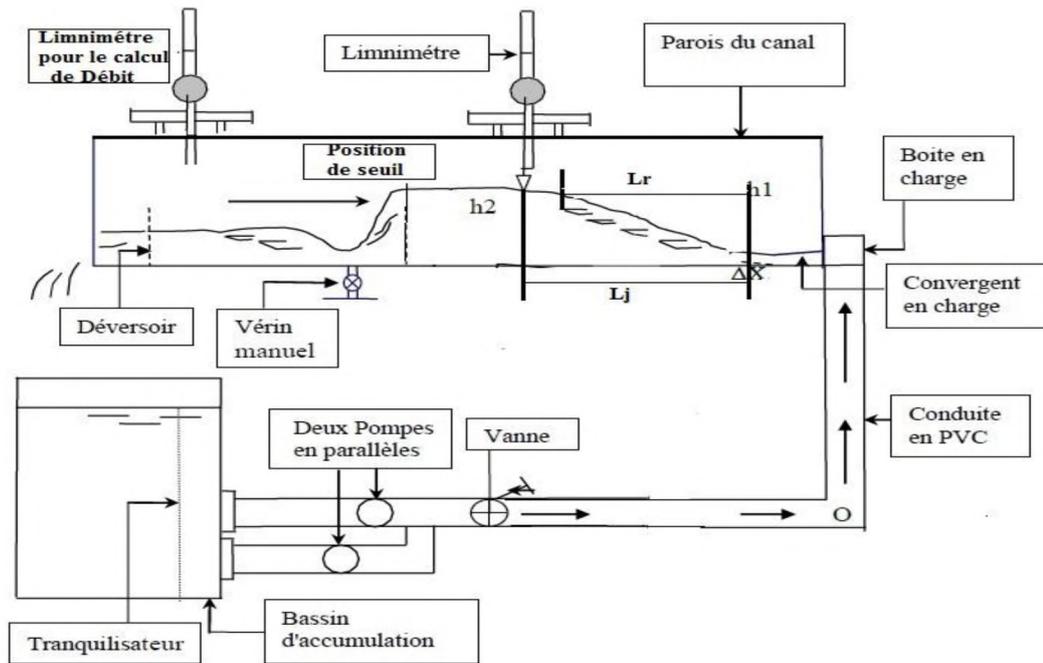


Figure 1.1 Schéma simplifié du canal de mesure de section trapézoïdal composé à une base rectangulaire, ayant servi à l'expérimentation.



Figure 1.2 Photographie du modèle expérimental du canal



Figure 1.3 Pompe centrifuge axiale (pompe principale)



Figure 1.4 Photographie d'une boîte en charge



Figure 1.5 Photographie d'une série de convergent.



Figure 1.6 Photographie d'un canal trapézoïdal composé à une base rectangulaire



Figure 1.10

a) Photographie du déversoir rectangulaire sans b) limnimètre utiliser pour les mesures de h_2 hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit

Le débit volume Q ainsi que la profondeur h_2 sont les seules grandeurs qui nécessitent un appareillage spécifique. Mais la position x du seuil mince ainsi que sa hauteur géométrique s sont simplement mesurées à l'aide d'un ruban gradué et la hauteur initiale h_1 du ressaut est assimilée à l'ouverture du convergent en charge générant l'écoulement incident ($h_1 = 2 \text{ cm}$; 2.5 cm ; 3 cm ; 3.5 cm et 4 cm), après avoir positionné le pied du ressaut à environ $\Delta x \approx 5 \text{ cm}$. En mesure la profondeur h_2 à l'aide d'un limnimètre à vernier à double précision (figure 1.10). Les mesures de h_2 obtenues seront injectées plu tard dans la formule de Hachemi Rachedi L. (2006), pour le débitmètre à déversoir utilisé.

1.3. Le limnimètre

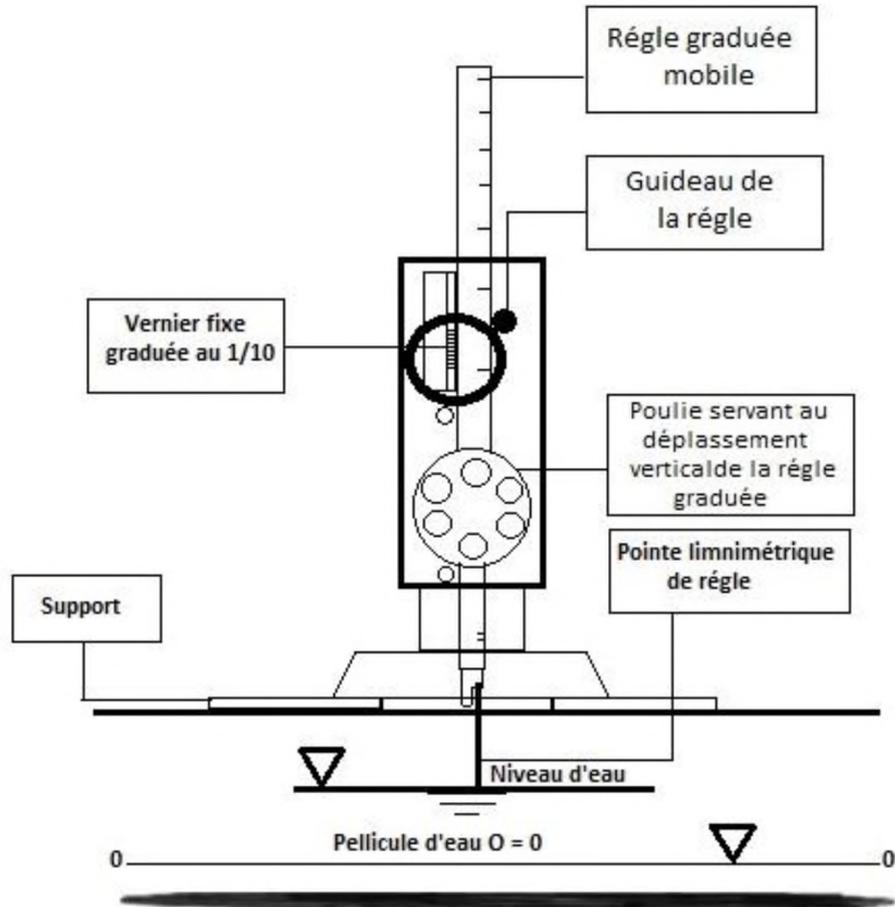


Figure 1.11 Le limnimètre

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

L'instrument est formé d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnimétrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau (Figure 1.10).

La lecture sur le limnimètre s'effectue en deux étapes :

raduation sur la règle, située immédiatement en haut de zéro du vernier.

on effectue la lecture du nombre de cinquantième en face de la division qui coïncide ou qui est la plus rapprochée d'une division de la règle.

1.4. Seuil mince

Ce canal est bien adapté aux méthodes de mesures que nous avons souhaité employées au cours de notre étude. En effet, pour la création du ressaut on a utilisé des seuils terminaux en Acier avec de différentes hauteurs ($h=2\text{cm} . 3\text{cm} \dots$ jusqu'à 20cm)

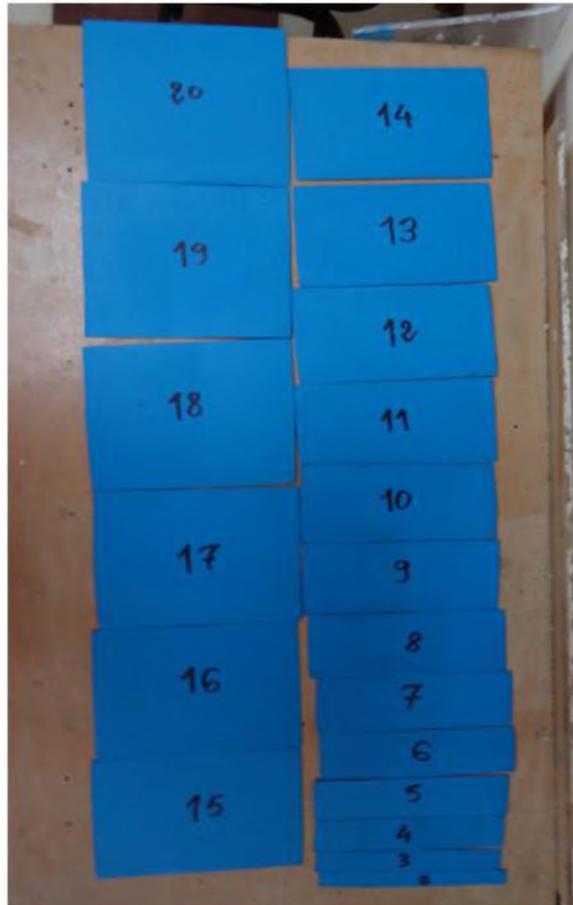


Figure 1.12 Les seuils minces utilisés pour l'étude

1.5. Modèle expérimental

Le positionnement longitudinal de l'obstacle n'est pas anodin. En effet, il est placé sur la paroi du fond du canal, après positionné le pied de ressaut (sa fait par la manipulation de vanne). Les distances horizontales ont été mesurées à l'aide d'un ruban gradué telle que la longueur du ressaut L_j et de son rouleau L_r .

Afin d'atteindre un plus grand nombre de points de fonctionnement dans le plan des paramètres voulus on a pris un pas $\Delta x=5\text{cm}$, cette distance n'a pu être réduite davantage en raison de l'instabilité horizontale de ressaut, notamment pour les débits forts, pour chaque convergent on utilise 19 seuils de tailles différentes.

1.6. Conclusion

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

On a fixé les seuils minces sur le fond du canal rectangulaire, est assurée par le support du seuil.

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

CHAPITRE

02

L' étude expérimentale

2.1. Introduction

Cette étude expérimentale est basé sur les rapports adimensionnel de mesures de ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évaluant dans un canal de forme trapézoïdale composée à une base rectangulaire

L'expérimentation a été menée des plusieurs hauteurs initiale de l'écoulement : $h_1 = 2\text{cm}, 2.5\text{cm}, 3\text{cm}, 3.5\text{cm}$, une large gamme du nombre de Froude incident a été ainsi obtenue, correspondant a $2.27 < F_1 < 11.41$. tel que rapport de l'élargissement ($\beta = b/B$) de ce canal est égale $1/3$. et au dessous un schéma explique la forme de canal (*Figure 2.1*).

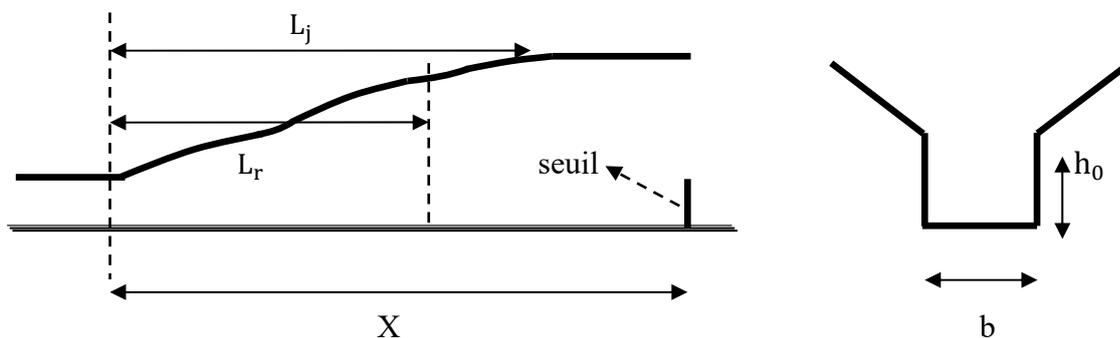


Figure 2.1 Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil évaluant dans un canal trapézoïdal composé à base rectangulaire.

2.2 Position de problème

L'étude se propose d'examiner de vue expérimentale, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil évaluant dans un canal trapézoïdal composé à base rectangulaire.

L'objectif de cette étude chaque année c'est pour trouver le bon dimensionnement du bassin de dissipation de la charge hydraulique à l'aval d'un barrage en particulier, et le dimensionnement des canaux d'adduction et d'irrigation de forme du canal que on a étudié, d'une manière générale, et l'un de l'objectif important est d'obtenir un bon rendement.

2.3. Procédé de détermination du débit volume Q

Dans le chapitre précédent, le canal de mesure est relié, dans sa partie aval, à un second canal de section rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale, permettant la détermination du débit volume Q. Cette procédure est assurée par l'injection des hauteurs déversant $h_{dév}$ dans la formule (2.1) en

assurant la condition d'application de celle-ci qui est: $\beta_{dév} < 0.45$.

Calcule du nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident, par l'application suivante

$$Q = 0.3794 \sqrt{2(1 + 0.16496\beta^{2.0716})^{2/3}} h_{dév}^{2/3} \quad (2.1)$$

$$\beta_{dév} = b/B.$$

Q : Le débit en (m³/s).

B : La largeur du canal en (m).

G : L'accélération de la pesanteur (m³/s²)

$\beta_{dév}$:Le rapport de forme.

b : Largeur de l'échancrure (m).

$h_{dév}$: La hauteur de la lame déversant (m)

La condition d'application de cette équation est satisfaite puis que :

$$\beta_{dév} = b/B = 0.24/0.6 = 0.4 < 0.45$$

2.4.Procédure expérimentale

L'objet de notre étude expérimentale est d'analyse, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal de section trapézoïdale composée à une base rectangulaire. Comme il a été signalé précédemment, les mesures de la hauteur initiale h_1 s'effectue sur l'axe central de l'écoulement, des convergent ont été testé de hauteur initial : $h_{convergent} = 2$ cm, 2.5cm, 3cm, 3.5cm et 4cm

La gamme des nombres de Froude obtenue par ces ouvertures est : $2,34 < F_1 < 11,41$. Les résultats obtenus par cette large gamme de nombre de Froude F_1 nous ont fournis des échantillons de mesures assez significatifs pour le type du ressaut étudié.

La formation complète du ressaut est conditionnée par la mise en place de seuil au travers de l'écoulement, pour cela 19 seuils ont été préparées et testées, de hauteur géométrique varie de 2cm à 20 cm.

Dés l'obtention de la forme complète du ressaut, nous effectuerons pour chaque hauteur S et position x de pied du ressaut les étapes suivantes :

- mesure de la hauteur déversant $h_{dév}$

- calcul du débit volume Q par l'application de la relation (2.1).
- calcul de nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par l'application de la relation suivante :

$$F_1 = Q^3 / gh_1^3 b^2$$

- mesure de la longueur de rouleau L_r .
- mesure de la longueur de ressaut L_j .
- mesure de la hauteur conjuguée h_2 en aval de ressaut.

Pendant l'expérimentation on a remarqué que l'accroissement du nombre de Froude F_1 entraîne un déplacement du ressaut vers l'aval ce qui provoque une augmentation de la longueur de son rouleau L_r . Par ailleurs la longueur du ressaut L_j .

La Figure (2.2) représente trois configurations différentes du ressaut contrôlé par seuil mince évaluant dans un canal de forme trapézoïdale composée à base rectangulaire obtenue à débit croissant pour une position x de seuil et une convergente fixées.

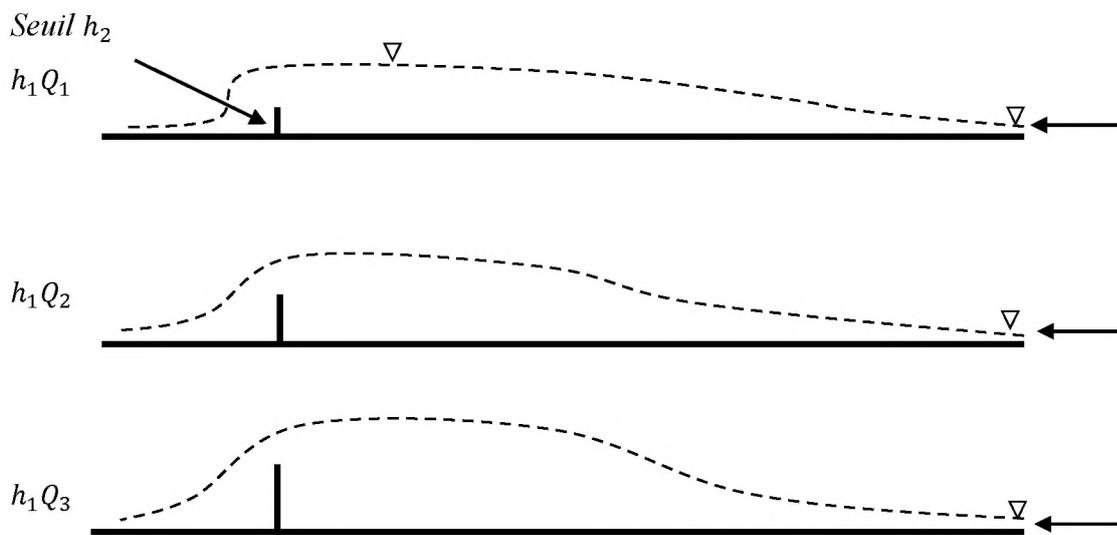


Figure 2.2. trois schémas représentent trois configurations de ressaut hydraulique contrôlé par seuil à parois mince dans un canal de forme trapézoïdale composée à base rectangulaire





Figure 2.2.b Formation du ressaut en canal trapézoïdal composé à base rectangulaire
 $S=16\text{cm}, h_1=3\text{cm}, h_2=29.5\text{cm}, F_1=6,90$

2.5. Profil de surface généralisé du ressaut

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

La figure 2.3 représente la variation de y en fonction de X pour un seul seuil, et un seul convergent.

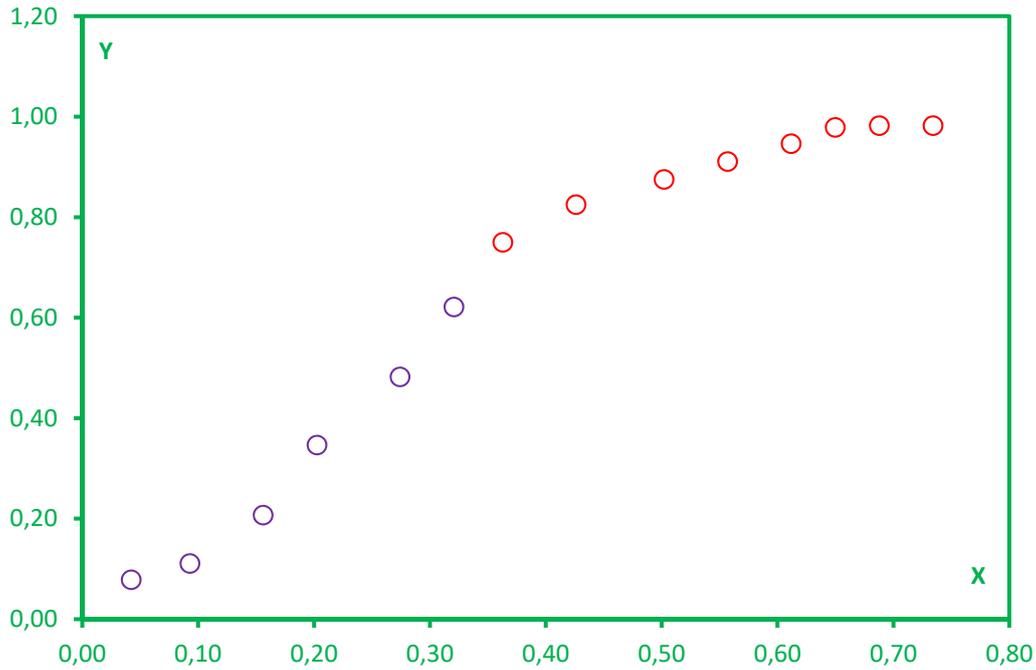


Figure 2.3 profile de surface du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal composé à base rectangulaire pour $S=18\text{cm}$.

○ La forme trapézoïdale du canal, ○ la base du canal.

Tableau 2.1: Les Valeurs expérimentales de X et de Y pour chaque valeurs de ressaut contrôlé

$x(m)$	$h(m)$	$h_1(m)$	$h_2(m)$	$L_j(m)$	Y	X
0,1	0,05	0,03	0,31	2,37	0,08	0,04
0,22	0,06	0,03	0,31	2,37	0,11	0,09
0,37	0,08	0,03	0,31	2,37	0,21	0,16
0,48	0,12	0,03	0,31	2,37	0,35	0,20
0,65	0,16	0,03	0,31	2,37	0,48	0,27
0,76	0,20	0,03	0,31	2,37	0,62	0,32
0,86	0,24	0,03	0,31	2,37	0,75	0,36
1,01	0,256	0,03	0,31	2,37	0,83	0,43
1,19	0,27	0,03	0,31	2,37	0,88	0,50
1,32	0,28	0,03	0,31	2,37	0,91	0,56
1,45	0,29	0,03	0,31	2,37	0,95	0,61
1,54	0,30	0,03	0,31	2,37	0,98	0,65
1,63	0,30	0,03	0,31	2,37	0,98	0,69
1,74	0,30	0,03	0,31	2,37	0,98	0,73

2.6. Analyse des résultats expérimentaux

2.6.1. Le rapport des hauteurs conjuguées

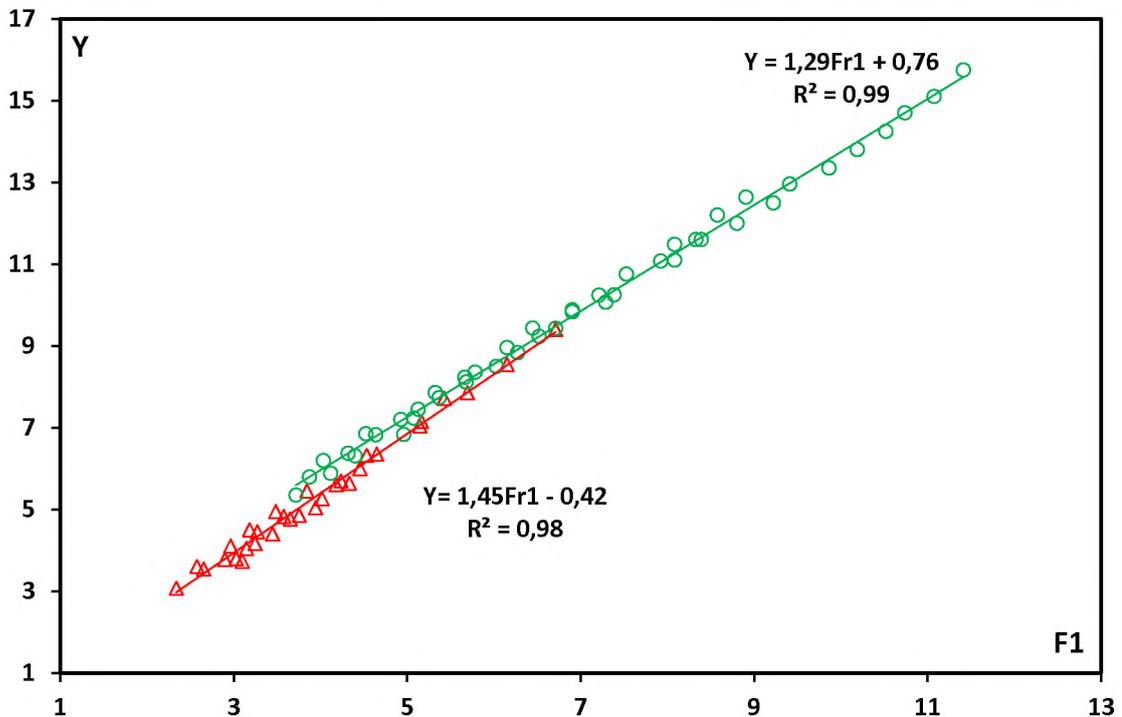


Figure 2.4 Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de nombre de Froude F_1 pour différentes valeurs de la hauteur, h_1 (Δ) pour $h_2 < h_0$, (\circ) pour $h_2 > h_0$

h_0 : la hauteur de la base de canal composée (la partie rectangulaire) est égale 0.2m.

h_1 : la hauteur de l'ouverture = 0.2m, 0.25m, 0.30m, 0.35m, 0,40m.

h_2 : la hauteur de l'eau quand le régime sera un régime fluvial.

La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que les deux relations $Y = f(F_1)$ suivent deux courbes linéaires pour chaque configuration du ressaut. Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé de courbes $Y = f(F_1)$ pour chaque valeur de ($h_2 < h_0$ et $h_2 > h_0$) sont consignées dans le tableau (2.1) et (2.2)

En remarque d'après la figure (2.3) qu'il ya un petit décalage entre les deux courbes, cela est due à l'effet de la forme du canal.

1. Si $h_2 < h_0$ l'étude a été faite dans la base du canal (forme rectangulaire)
2. Si $h_2 > h_0$ Dans ce cas l'étude a été faite au dessus du canal (forme trapézoïdale)

Par ailleurs, l'ajustement des points expérimentaux à permis d'aboutir à deux relations linéaires.

La courbe (Δ) $Y = f(F_1) = 1,45F_1 - 0.45$ a une corrélation de $R^2 = 0,98$.

La courbe (\circ) $Y = f(F_1) = 1,29F_1 + 0.76$ avec une corrélation de $R^2 = 0,99$.

Tableau 2.2 : Les valeurs expérimentales de rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut pour des valeurs du nombre de Fronde F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 < h_0$.

Y	F_1	Y	F_1	Y	F_1
3,73	3,10	6,32	4,53	5,70	4,24
4,17	3,25	7,04	5,15	6,35	4,65
4,77	3,65	7,72	5,43	7,15	5,17
5,27	4,02	3,54	2,66	7,85	5,70
5,60	4,18	3,77	2,9	8,55	6,15
6,00	4,46	4,46	3,28	9,40	6,71
4,05	3,15	4,83	3,58	3,80	3,03
4,85	3,76	5,46	3,85	4,40	3,45
4,95	3,49	3,08	2,34	4,50	3,19
5,04	3,95	3,60	2,58		
5,64	4,34	4,10	2,97		

Tableau 2.3 : Les valeurs expérimentales de rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour : $h_2 > h_0$.

F_1	Y	F_1	Y
4,96	6,83	6,45	9,44
5,08	7,23	6,90	9,88
5,37	7,73	7,21	10,24
5,67	8,23	7,53	10,76
6,03	8,50	7,93	11,08
6,28	8,83	8,09	11,48
6,52	9,23	8,33	11,6
6,71	9,43	8,58	12,2
6,90	9,83	8,91	12,64
7,29	10,07	9,41	12,96
7,39	10,25	4,12	5,89
8,09	11,1	4,40	6,31
8,39	11,6	4,64	6,83
8,80	12	4,93	7,2
9,22	12,5	5,13	7,46
9,86	13,35	5,33	7,86
10,19	13,8	5,68	8,11
10,52	14,25	3,72	5,35
10,74	14,7	3,88	5,8
11,08	15,1	4,04	6,2
11,42	15,75	4,32	6,375
5,79	8,36	4,53	6,85
6,15	8,96		

2.6.2. Le rapport de L_j/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1

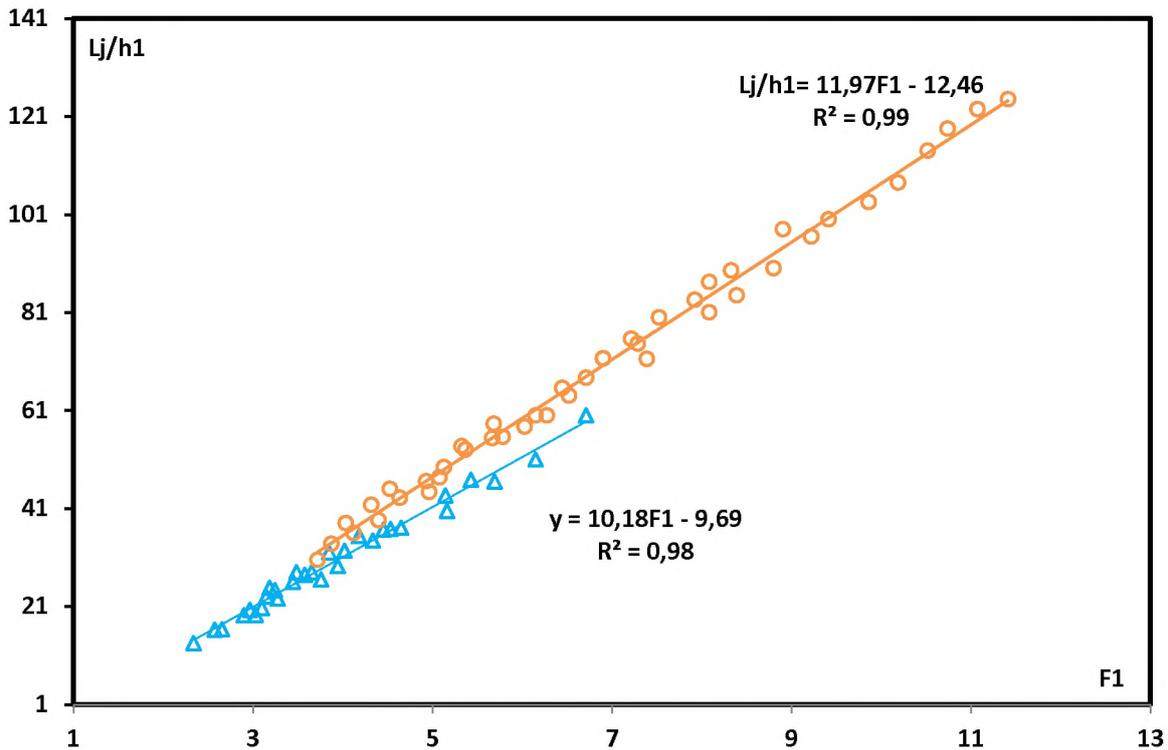


Figure 2.5 Variation du rapport L_j/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1

(Δ) pour $h_2 < h_0$.(O) pour $h_2 > h_0$

La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que les deux relations $L_j/h_1 = f(F_1)$ suivent deux courbes linéaires pour chaque configuration du ressaut. Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé de courbes $L_j/h_1 = f(F_1)$ pour chaque valeur de ($h_2 < h_0$ et $h_2 > h_0$) sont consignées dans le tableau (2.3) et (2.4)

En remarque aussi à partir de la figure (2.4) qu'il ya un petit décalage entre les deux courbes, cela est due à l'effet de la forme du canal, juste comme la courbe de rapport de la hauteur conjugué présidente.

Le rapport L_j/h_1 augment pour les valeurs données de nombre de Froude F_1 telle que

$$2,27 < F_1 < 11.41$$

L'ajustement des points expérimentaux à permis d'aboutir à deux relations linéaires.

La courbe (Δ) $Y = f(F_1) = 10,18F_1 - 9,69$ a une corrélation de $R^2 = 0,98$.

La courbe (O) $Y = f(F_1) = 11,97F_1 - 12,46$ avec une corrélation de $R^2 = 0,99$.

Tableau 2.4 : Les valeurs expérimentales de rapports de longueur relative L_j/h_1 du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 < h_0$.

F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1
3,10	20,67	3,45	26,00
3,25	24,33	3,95	29,20
3,65	28,00	4,34	34,40
4,02	32,33	4,53	36,80
4,18	35,33	5,15	43,60
4,46	36,67	5,43	46,80
3,15	23,00	2,66	16,29
3,76	26,50	2,90	19,14
4,65	37,00	3,28	22,57
5,17	40,50	3,58	27,43
5,70	46,50	3,85	32,00
6,15	51,00	2,34	13,50
6,71	60,00	2,58	16,25
3,03	19,2	2,97	20,25
3,19	24,75	3,49	28,00

Tableau 2.5 : Les valeurs expérimentales de rapports L_j/h_1 du ressaut de longueur relative pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 > h_0$.

F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1
4,96	44,33	11,42	124,50
5,08	47,33	5,79	55,60
5,37	53,00	6,15	60,00
5,67	55,33	6,45	65,60
6,03	57,67	6,90	71,60
6,28	60,00	7,21	75,60
6,52	64,00	7,53	80,00
6,71	67,67	7,93	83,60
6,90	71,67	8,09	87,20
7,29	74,67	8,33	89,60
7,39	71,5	8,91	98,00
8,09	81,00	9,41	100,00
8,39	84,50	4,12	36,00
8,80	90,00	4,40	38,57
9,22	96,50	4,64	43,14
9,86	103,50	4,93	46,57
10,19	107,50	5,13	49,43
10,52	114,00	5,33	53,71
10,74	118,50	5,68	58,29
11,08	122,50	3,72	30,50
4,32	41,75	3,88	33,75
4,53	45,00	4,04	38,00

2.6.3. Le rapport de L_r/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1

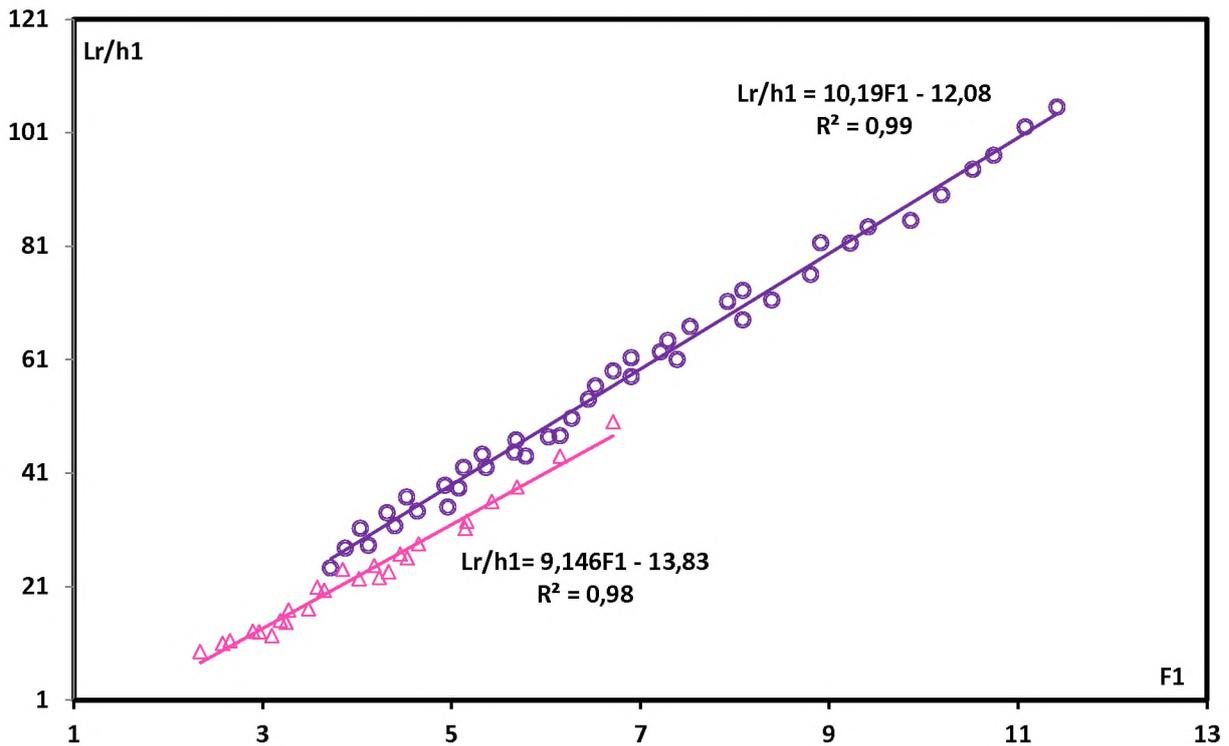


Figure 2.6 Variation du rapport L_r/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1

(Δ) pour $h_2 < h_0$, (O) pour $h_2 > h_0$

Les deux courbes au dessus représentent les points expérimentales des rapports de longueur de rouleau et h_1 en fonction de nombre de Froude F_1 ,

Le rapport et le nombre de Froude a une relation de corrélation directe, comme les autre courbes présidents, en tant que le nombre de Froude augment, le rapport également augment

Le petit décalage entre les deux courbes c'est à cause de le changement de la forme decanal.

L'ajustement des points expérimentaux à permis d'aboutir à deux relations linéaires.

La courbe (O) $f(F_1) = L_r/h_1 = 10,19F_1 - 12,08$ avec une corrélation de $R^2 = 0,99$.

La courbe (Δ) $f(F_1) = L_r/h_1 = 9,146 F_1 - 13,83$ avec une corrélation de $R^2 = 0,98$.

Tableau 2.6 : Les valeurs expérimentales de longueur relative L_r/h_1 du rouleau pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 < h_0$

F_1	L_r/h_1	F_1	L_r/h_1
3,10	12,33	4,34	23,6
3,25	14,67	4,53	26
3,65	20,33	5,15	31,2
4,02	22,33	5,43	36
4,18	24,67	2,66	11,43
4,46	26,67	2,90	13,14
4,24	22,5	3,28	16,86
4,65	28,5	3,58	20,86
5,17	32,5	3,85	24
5,70	38,5	2,34	9,5
6,15	44	2,58	11
6,71	50	2,97	13
3,49	17	3,19	15

Tableau 2.7: Les valeurs expérimentales de longueur relative L_r/h_1 du rouleau pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 > h_0$.

F_1	L_r/h_1	F_1	L_r/h_1	F_1	L_r/h_1
4,96	35	5,79	44	5,33	44,29
5,08	38,33	6,15	47,6	5,68	46,86
5,37	42	6,45	54	3,72	24,25
5,67	44,67	6,90	58	3,88	27,75
6,03	47,33	7,21	62,4	4,04	31,25
6,28	50,67	7,53	66,8	4,32	34
6,52	56,33	7,93	71,2	4,53	36,75
6,71	59	8,09	73,2	9,86	85,5
6,90	61,33	8,91	81,6	10,19	90
7,29	64,33	9,41	84,4	10,52	94,5
7,39	61	4,12	28,29	10,74	97
8,09	68	4,40	31,71	11,08	102
8,39	71,5	4,64	34,29	11,42	105,5
8,80	76	4,93	38,86	5,13	42
9,22	81,5				

2.6.4. Le rapport S/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1

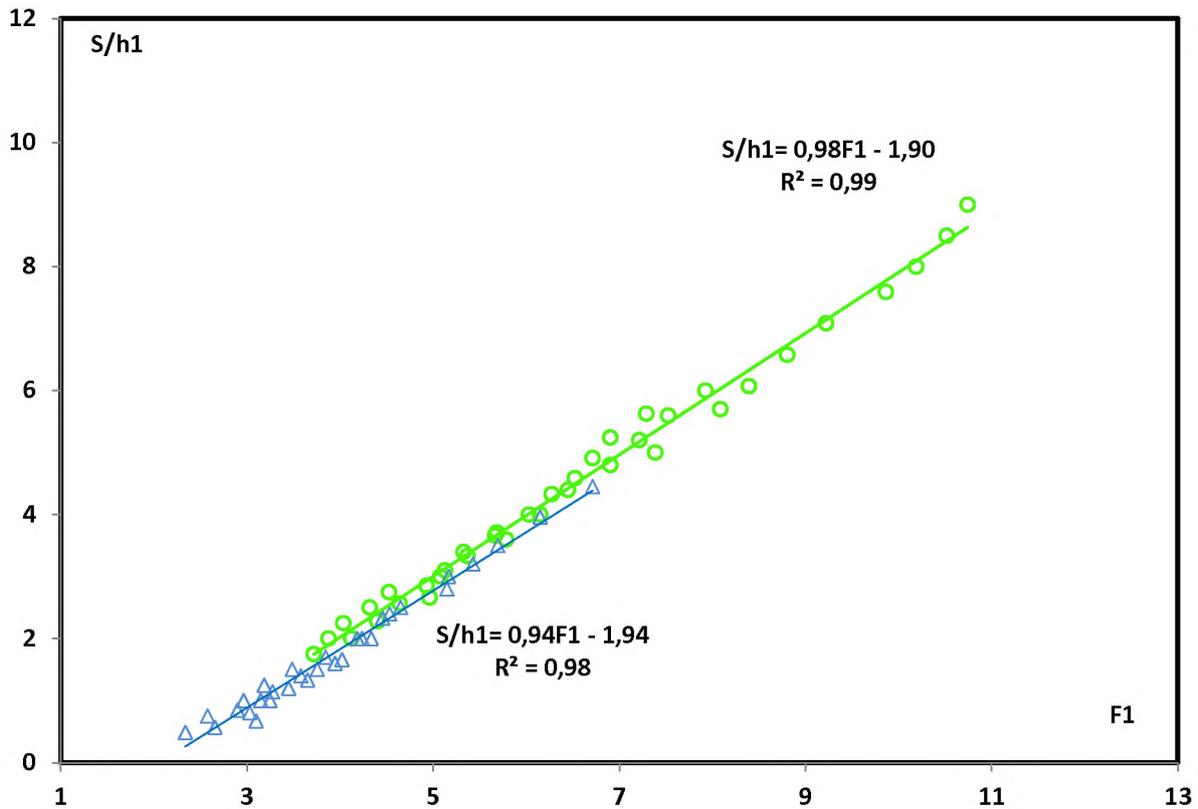


Figure 2.7 Variation du rapport S/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1

(Δ) pour $h_2 < h_0$, (\circ) pour $h_2 > h_0$

Comme les autres courbes précédents, les deux courbes représentent les points expérimentales des rapports de seuils S et h_1 en fonction de nombre de Froude F_1 ,

Le rapport et le nombre de Froude a une relation de corrélation directe, en tant que le nombre de Froude augment, le rapport également augment.

Le petit décalage entre les deux courbes c'est à cause de le changement de la forme de canal.

L'ajustement des points expérimentaux à permis d'aboutir à deux relations linéaires.

La courbe (\circ) $f(F_1) = S/h_1 = 0,98F_1 - 1,9$ avec une corrélation de $R^2 = 0,99$.

La courbe (Δ) $f(F_1) = S/h_1 = 0,94F_1 - 1,94$ avec une corrélation de $R^2 = 0,98$.

Tableau2.8 : Les valeurs expérimentales de rapports relatifs S/h_1 du seuils pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 < h_0$.

S/h1	F	S/h1	F
0,67	3,10	1,60	3,95
1,00	3,25	2,00	4,34
1,33	3,65	2,40	4,53
1,66	4,02	2,80	5,15
2,00	4,18	3,20	5,43
2,33	4,46	0,57	2,66
1,00	3,15	0,85	2,90
1,50	3,76	1,14	3,28
2,00	4,24	1,40	3,58
2,50	4,65	1,70	3,85
3,00	5,17	0,49	2,34
3,50	5,70	0,75	2,58
3,96	6,15	1,00	2,97
4,45	6,71	1,25	3,19
0,80	3,03	1,50	3,49
1,20	3,45		

Tableau2.9 : Les valeurs expérimentales de rapports relatifs S/h_1 du seuils pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 > h_0$.

S/h_1	F_1	S/h_1	F_1	S/h_1	F_1
2,660	4,9635224	3,600	5,7865365	6,578	8,8047581
3,000	5,0785047	4,000	6,1519365	7,085	9,2239893
3,330	5,3697715	4,400	6,4495794	7,592	9,8649002
3,660	5,6664032	4,800	6,9047424	8,000	10,190697
4,000	6,0293088	5,200	7,2138819	8,500	10,520004
4,330	6,2753845	5,600	7,5275021	9,000	10,741473
4,589	6,5247196	6,000	7,9257323	3,710	5,6835136
4,915	6,7138347	2,000	4,1220378	1,750	3,7193831
5,241	6,9047424	2,280	4,4019675	2,000	3,8765274
5,627	7,2918694	2,570	4,6398803	2,250	4,0358245
5,000	7,389746	2,850	4,9308319	2,500	4,319689
5,700	8,0869306	3,100	5,1280508	2,750	4,5263513
6,071	8,392078	3,400	5,3278312		

2.6.5. Le rendement

Comme s'est indiqué dans la première partie de cette étude, la perte de charge ΔH_{12} du ressaut est par définition la différence des charges initiale et final : $\Delta H_{12} = H_1 - H_2$.

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

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

D'après ce qu'on a vu dans la première partie :

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2}$$

$$H_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}$$

Mais ce canal est de forme composé (trapèze et rectangle) alors on a deux forme de section, pour la détermination de H_1 et H_2

Le 1^{er} cas : quand $h_2 < 0.2 m$, ici on est dans la base de canal (la hauteur de la base = 0.2m), donc la section va être une section rectangulaire .

$$A_1 = bh_1$$

$$A_2 = bh_2$$

Le 2^{ème} cas : quand $h_2 > 0.2m$, ici on est dans 2 section :

- La section rectangulaire (dans ce cas la section ne varié pas).
- La section trapézoïdale (la section varié pour chaque valeur de h_2)

$$A_1 = bh_1$$

$$A_2 = bh_2 + mh_2^2 + bh_0$$

$$A_2 = b(h_2 - 0,2) + m(h_2 - 0,2)^2 + b0,2$$

Et d'après ces deux cas, on détermine le rendement, nous avons tracé les deux courbes de rendement en fonction de nombre de Froude F_1 ensemble pour faire une comparaison (figure 2.8),

Pour comparer les deux rendements, en devise les deux courbes par deux parties.

La 1^{ère} partie (de 20% jusqu'à 50%) : la forme rectangulaire est plus rentable que la forme rectangulaire-trapézoïdale.

La 2^{ème} partie (de 50% jusqu'à 60%) : dans cette partie, Les deux courbes sont égales en termes de rendement.

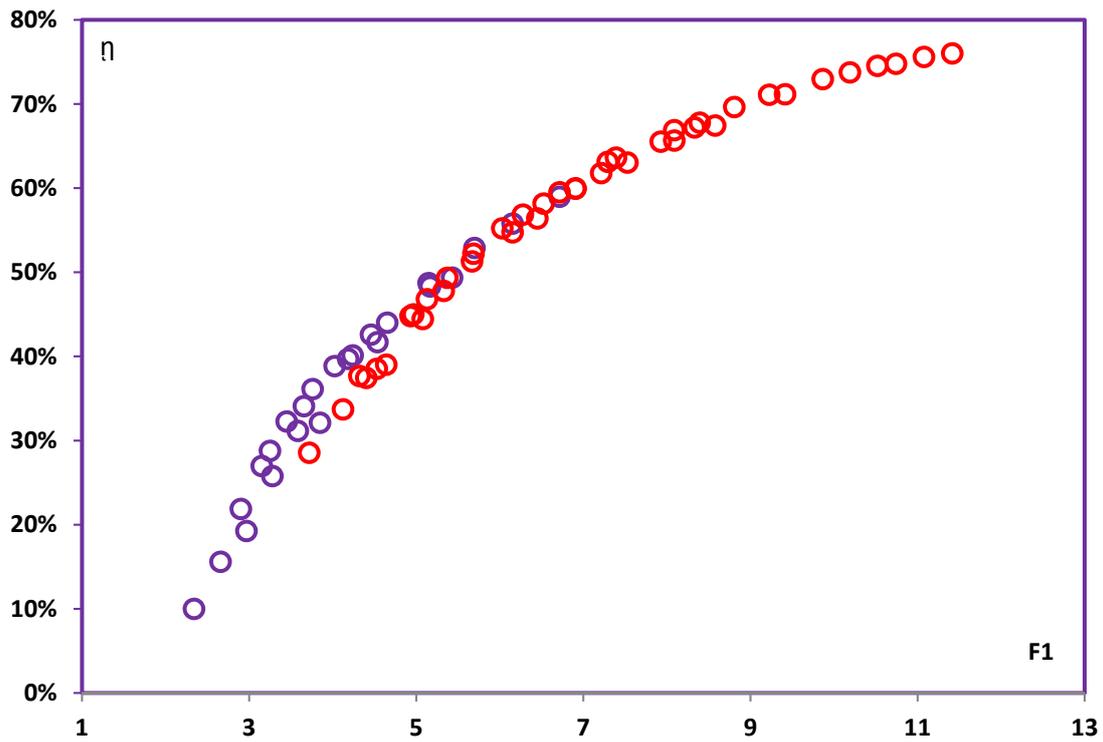


Figure 2.8 la variation expérimentale de rendement η en fonction de nombre de Froude F_1 en canal trapézoïdal composé à base rectangulaire

(○) la forme rectangulaire, (○) la forme rectangulaire-trapézoïdale

Tableau 2.10 : Les valeurs expérimentales de rendement du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

Forme rectangulaire		Forme rectangulaire-trapézoïdale	
F_1	η	η	F_1
3,15	0,27	0,64	7,39
3,76	0,36	0,67	8,09
4,24	0,40	0,68	8,39
4,65	0,44	0,70	8,80
5,17	0,48	0,71	9,22
5,70	0,53	0,73	9,86
6,15	0,56	0,74	10,19
6,71	0,59	0,75	10,52
3,45	0,32	0,75	10,74
4,53	0,42	0,76	11,08
5,15	0,49	0,76	11,42
5,43	0,49	0,55	6,15
3,25	0,29	0,56	6,45
3,65	0,34	0,60	6,90
4,02	0,39	0,62	7,21
4,18	0,40	0,63	7,53
4,46	0,43	0,66	7,93
2,66	0,16	0,66	8,09
2,90	0,22	0,67	8,33
3,28	0,26	0,67	8,58
3,58	0,31	0,71	9,41
3,85	0,32	0,45	4,96
2,34	0,10	0,44	5,08
2,97	0,19	0,49	5,37
		0,51	5,67
		0,55	6,03
		0,57	6,28
		0,58	6,52
		0,60	6,71
		0,60	6,90
		0,63	7,29
		0,34	4,12
		0,37	4,40
		0,39	4,64
		0,45	4,93
		0,47	5,13
		0,48	5,33
		0,52	5,68
		0,29	3,72
		0,38	4,32
		0,39	4,53

2.7 Conclusion

Ce présent chapitre a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique évaluant dans un canal de section trapézoïdale composée à base rectangulaire, contrôlé par seuil à paroi mince.

Dans un premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie pendant les essais. Passant en second temps aux résultats expérimentaux, cinq hauteurs initial h_1 ont été testées avec 19 seuils S , pour une seule position X . Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue. L'étude expérimentale s'est intéressée d'étudier le profil de surface généralisée du ressaut hydraulique, la variation de la hauteur conjuguée du ressaut, le rapport de longueur du ressaut L_j/h_1 , la longueur du rouleau L_1/h_1 , la hauteur relative de seuil S/h_1 , et en fin le rendement en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

D'après ces résultats, dans le cas de ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, on peut dire en fin que dans la forme rectangulaire plus rentable que la forme rectangulaire-trapézoïdale dans la gamme de $F_1 < 5,43$, pour la gamme $5,43 < F_1 < 6,52$, les deux sections sont presque égales en terme de rendement.

Conclusion de la deuxième partie

Conclusion de la deuxième partie

A travers cette deuxième partie nous avons abordé la partie expérimentale de l'étude du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil mince évaluant dans un canal trapézoïdal composé à base rectangulaire.

Deux chapitres étaient nécessaires :

- le premier a été consacré à la description du modèle expérimental, qui a servi de base à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique.
- Le deuxième chapitre a été consacré à l'exposition du problème et à l'analyse expérimentale des résultats obtenus. A travers cette analyse, nous avons proposé des relations fonctionnelles régissant le ressaut hydraulique provoqué par seuil mince,

Une étude comparative a été présentée à la fin de la deuxième partie de l'étude expérimentale, le but étant de déterminer le ressaut hydraulique le plus avantageux et le plus rentable. Dans le deuxième chapitre de l'étude expérimentale, nous avons étudié les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal composé à base rectangulaire, les rapports β , le profil de surface généralisée et en fin le rendement de canal, Les relations obtenues sont suffisantes pour dimensionner ce type de bassin d'amortissement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a été dédiée à l'analyse théorique et expérimentale du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, deux grandes parties ont été nécessaires : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels dans ce domaine, et une deuxième partie qui a concerné notre propre contribution.

La première partie a été divisée en trois chapitres :

- ✓ Le premier chapitre de cette partie bibliographique, a permis d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire.
- ✓ Le second chapitre de la partie bibliographique, s'est intéressé au ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section trapézoïdale.
- ✓ le dernier chapitre a été consacré aux travaux de Achour et Khataoui (2012) au ressaut hydraulique dans un canal de section rectangulaire composée.

Pour le premier chapitre de la partie bibliographie, nous avons passé, en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire (ressaut hydraulique classique). Nous avons présenté les différentes formes du ressaut, selon la classification de Bradley et Peterka (1957), qui dépendent de la variation du nombre de Froude F_1 , à l'amont du ressaut, d'après cette étude, nous avons remarqué que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement, afin de définir la relation reliant le rapport Y^* des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 . Bélanger (1828), a fait le premier pas sur cet objectif et a déterminé cette relation, par l'application du théorème d'Euler, entre les deux sections du ressaut, après ça on a abordé les travaux de Hager et al (1990), nous avons constaté que les caractéristiques géométriques du ressaut, par différents chercheurs. A la fin de ce premier chapitre, nous avons examiné, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, et nous avons cité les travaux de Forster et Skrinde (1950) concernant le seuil à paroi mince. Les auteurs ont défini, en premier lieu, la variation de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 et pour des valeurs données de x/h_2 .

Pour 2^{ème} chapitre de l'étude bibliographique, elle avait comme objectif de faire le point sur les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. La détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique, a été souvent

l'objectif principal des travaux entrepris par : Posey et Hsing (1938), Silvester (1964), et plus récemment ceux de Hager et Wanoschek (1989). Ainsi, nous avons déterminé la relation des hauteurs conjuguées, en fonction du nombre de Froude F_1 , par l'application du théorème de la quantité de mouvement, et nous avons constaté qu'à partir du canal de forme trapézoïdale, nous pouvons déduire le résultat concernant les canaux rectangulaires et triangulaires. Concernant la relation de la perte de charge relative, nous avons eu recours au théorème de Bernoulli pour la détermination de la charge totale en amont et en aval du ressaut ; nous pouvons donc déduire le résultat du canal rectangulaire et triangulaire, et nous avons présenté la relation approchée de Hager et Sinniger (1985). La représentation graphique de la relation du rendement du ressaut, en fonction du nombre de Froude F_1 en canal trapézoïdal, a montré que, c'est le canal triangulaire qui présente le plus grand intérêt du point de vue rendement.

Le dernier chapitre de la partie bibliographique a traité le ressaut hydraulique dans un canal de section composée. Ce chapitre a pour objectif de faire le point sur les principales caractéristiques du canal composé, et les travaux dans le domaine du ressaut hydraulique dans ce canal. Nous pouvons remarquer que le canal de lit composé produit une turbulence à l'intersection des lits, qui aide dans la dissipation d'énergie. Et aussi, la nouvelle approche est proposée en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du développement théorique mené par *Achour* (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans son développement, les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapprochées de la réalité. Afin de trouver l'expression définitive de cette force de résistance, étroitement liée au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures, sur un modèle réduit au laboratoire, sont indispensables.

La deuxième partie a concerné l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évaluant dans un canal trapézoïdal composé à base rectangulaire. Celle-ci a été divisée en deux chapitres.

- ✓ Le premier chapitre a été consacré à la description du modèle expérimental, utilisé. Il a été décrit en détail l'appareillage utilisé pour les essais. Ceci a été étayé par des illustrations.
- ✓ Le deuxième chapitre a traité l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évaluant dans un canal trapézoïdal composé à base rectangulaire.

Pour le premier chapitre, nous avons consacré à l'étude du modèle expérimental, qui a servi de base dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique évaluant dans un canal à section trapézoïdale composée à base rectangulaire, contrôlé par seuil mince. Dans ce chapitre, nous avons abordé les appareils de mesure utilisés dans ce travail de laboratoire, nous les avons illustré par des photographies, dans le but de prendre toutes les mesures nécessaires quant aux caractéristiques du ressaut hydraulique.

Le dernier chapitre a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal de section trapézoïdale composée à base rectangulaire, contrôlé par seuil à paroi mince. Dans un premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie pendant les essais. Passant en second temps aux résultats expérimentaux, cinq hauteurs initiaux ont été testés h_1 ont été testées et 19 seuils S des hauteurs pour une seule position X . Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue. L'étude expérimentale s'est intéressée à étudier le profil de surface généralisée du ressaut hydraulique, la variation de la hauteur conjuguée du ressaut, la longueur du ressaut L_j , la longueur du rouleau L_r , la hauteur relative du seuil S et en fin le rendement, en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

P rincipales notations

PRICIPALES NOTATIONS

A_1	L'aire de la section mouillée initiale	$[m^2]$
A_2	L'aire de la section mouillée finale	$[m^2]$
B	La grande base du canal trapézoïdal	$[m]$
b	La petite base du canal trapézoïdal	$[m]$
F_1	Nombre de <i>Froude</i> incident	$[-]$
f	Force de frottement	$[N/m^2]$
g	Accélération de la pesanteur	$[m/s^2]$
G	Poids de la tranche liquide	$[N]$
h	Hauteur du ressaut	$[m]$
h_1	Hauteur initiale du ressaut	$[m]$
h_2	Hauteur finale du ressaut	$[m]$
\bar{h}	Distance entre le centre de gravité de la section transversale et la surface libre de l'écoulement	$[m]$
$h(x)$	Profondeur d'eau à la distance x du pied du ressaut	$[m]$
H	Charge totale	$[m]$
ΔH	Perte de charge due au ressaut	$[m]$
K	Facteur de position	$[-]$
L_j	Longueur du ressaut	$[m]$
L_r	Longueur du rouleau de surface	$[m]$
M	La hauteur relative initiale du ressaut $M = (mh_1)/b$	$[-]$
m	Cotangente de l'angle d'inclinaison d'un talus	$[-]$
P_1	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	$[N]$
P_2	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	$[N]$
Q	Débit volume	$[m^3/s]$
q	Débit unitaire	$[m^2/s]$
s	Hauteur du seuil ou de la marche positive	$[m]$
S	Hauteur relative du seuil ou de la marche positive	$[-]$
V_1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	$[m/s]$
V_2	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	$[m/s]$
W	Rapport d'aspect $W = h_1/b$	$[-]$
x	Position de seuil ou de la marche	$[m]$

X	Position relative de seuil ou de la marche	[-]
x_{rf}	Position de la fin du rouleau de fond à l'aval	[m]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	[-]
Y*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
α	Facteur de correction de l'énergie cinétique	[-]
β	Facteur de correction de la quantité de mouvement	[-]
Θ	Angle d'inclinaison du canal	[-]
$\bar{\omega}$	Poids spécifique du liquide	[Kg/m ³]
η	Rendement du ressaut	[-]
b	Largeur de lit mineur (rectang composé)	[m]
B	Largeur de li majeur (rectang composé)	[m]
β	Rapport de l'élargissement	[-]
τ	Rapport des hauteurs	[-]
γ	facteur de compacité	[-]

Liste des tableaux

Liste des tableaux

2^{ème} Chapitre de 2^{ème} partie : l'étude expérimentale

Tableau 2.1: les valeurs expérimentales de X et de Y pour chaque valeurs de ressaut contrôlé.	58
Tableau 2.2 : Les valeurs expérimentales de rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour : $h_2 < h_0$.	60
Tableau 2.3 : Les valeurs expérimentales de rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour : $h_2 > h_0$.	61
Tableau 2.4 : Les valeurs expérimentales de rapports de longueur relative L_j/h_1 du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 < h_0$.	63
Tableau 2.5 : Les valeurs expérimentales de rapports L_j/h_1 du ressaut de longueur relative pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 > h_0$.	64
Tableau 2.6 : les valeurs expérimentales de longueur relative L_r/h_1 du rouleau pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 < h_0$.	66
Tableau 2.7: les valeurs expérimentales de longueur relative L_r/h_1 du rouleau pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 > h_0$.	66
Tableau 2.8 : Les valeurs expérimentales de rapports relatives S/h_1 du seuils pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 < h_0$.	68
Tableau 2.9 : Les valeurs expérimentales de rapports relatives S/h_1 du seuils pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $h_2 > h_0$.	69
Tableau 2.10 : les valeurs expérimentales de rendement du η ressaut pour des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.	72

Liste des figures

1^{re} Partie

Chapitre 01 : le ressaut hydraulique en canal rectangulaire

<i>Figure 1.1</i> Le ressaut hydraulique	7
<i>Figure 1.2.a</i> Ressaut ondulée	8
<i>Figure 1.2.b</i> Le pré ressaut	8
<i>Figure 1.2.c</i> Le ressaut de transition.	9
<i>Figure 1.2.d</i> Le ressaut stable	9
<i>Figure 1.2.e</i> Le ressaut clapoteux	9
<i>Figure 1.3.a</i> Impulsion – quantité de mouvement	10
<i>Figure 1.3.b</i> Énergie spécifique	10
<i>Figure 1.4</i> Relation entre F_1 et y_2/y_1 pour un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal. L'équation de Bélanger (1828)	11
<i>Figure 1.5</i> Schéma de charge totale le long de ressaut classique	12
<i>Figure 1.6</i> Efficacité du ressaut	13
<i>Figure 1.7</i> La hauteur de ressaut	14
<i>Figure 1.8.a.b</i> Aspect du ressaut classique	14
<i>Figure 1.9</i> Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.	16
<i>Figure 1.10</i> Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique.	18
<i>Figure 1.11</i> Variation expérimentale du nombre de Froude F en fonction de la hauteur relative du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation (1.30)	19

Chapitre 02 : Le ressaut Hydraulique en canal trapézoïdal

<i>Figure 2.1</i> Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M . $M \rightarrow 0$: profil rectangulaire. $0 < M < \infty$: profils trapézoïdaux.	22
<i>Figure 2.2</i> Rapport entre les hauteurs conjuguées du ressaut pour différents types de canaux (adapté de Silvester 1964).	25
<i>Figure 2.3</i> Schéma de ressaut en canal trapézoïdal, Hager et Wanoschek (1989)	26
<i>Figure 2.4</i> Caractéristique principale du rouleau de fond: a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximale.	26
<i>Figure 2.5</i> longueur relative λ_j du ressaut en fonction de F_1 .	27
<i>Figure 2.6</i> Représentation graphique de la relation (2.14) du rendement η en fonction	29

du nombre de Froude F_1 . $M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire.

Chapitre 03 : Le ressaut Hydraulique en composé

Figure 3.1 Image explicative du lit mineur et le lit majeur en cas d'inondation	32
Figure 3.2 Représentation d'un canal de forme composé	33
Figure 3.3 structure de l'écoulements générées en raison du canal principal-plaine inondable interaction sur une section droite composée (Knight and Shiono,1996).	36
Figure 3.4.1 canal de section rectangulaire composée: définitions et terminologie	36
Figure 3.4.2 canal de section trapézoïdal composé: définitions et terminologie	37
Figure 3.5 Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit rectangulaire	38
Figure 3.6 Variation de Y, calculé par (1), en fonction de F_1 . (---) : $\beta=1$	41
Figure 3.7 Variation de Y en fonction de F_1 . (0) : équation , (+) : équation 1	41
Figure 3.8 Variation de η en fonction de F_1 . (---) : $\beta=1$. Y est calculé par l'équation 3	42
Figure 3.9 Variation de η en fonction de F_1 . (0) : équation 2, (+) : équation 2	43

2^{ème} Partie

Chapitre 01 : Description de modèle

Figure 1.1 Schéma simplifié du canal de mesure de section trapézoïdal composé à une base rectangulaire, ayant servi à l'expérimentation.	47
Figure 1.2 Photographie du model expérimentale du canal.	47
Figure 1.3 Pompe centrifuge axiale (pompe principale).	48
Figure 1.4 Photographie d'une boîte en charge.	48
Figure 1.5 Photographie d'une série de convergent.	49
Figure 1.9 Photographie d'canal trapézoïdal composé à une base rectangulaire	49
Figure 1.10 a) Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit , b) limnimètre utiliser pour les mesures de h_2 .	50
Figure 1.11 Le limnimètre	51
Figure 1.12 Les seuils minces utilisés pour l'étude	52

Chapitre 02 : L'étude expérimentale

Figure 2.1 Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil évaluant dns un canal trapézoïdal composé à base rectangulaire.	54
Figure 2.2.a Trois schémas représentent trois configurations de ressaut hydraulique	56

contrôlé par seuil à parois mince dans un canal de forme trapézoïdale composée à base rectangulaire

Figure 2.2.b Formation du ressaut en canal trapézoïdal composé à base rectangulaire 57

Figure 2.3 Profile de surface généralisée du ressaut hydraulique évaluant dans un canal trapézoïdal composé à base rectangulaire pour $S=18\text{cm}$. 58

Figure 2.4 Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de nombre de Froude F_1 pour différentes valeurs de la hauteur. 59

Figure 2.5 Variation du rapport L_j/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1 62

Figure 2.6 Variation du rapport L_r/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1 65

Figure 2.7 Variation du rapport S/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1 67

Figure 2.8 La variation expérimentale de rondement η en fonction de nombre de Froude F_1 en canal trapézoïdal composé à base rectangulaire 71

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Achour, B., (1989). Jump flow meter in a channel of triangular cross-section without weir, *Journal of Hydraulic Research* 27(2), 205-214.
- Achour, B., (1997) Dissipation d'énergie par ressaut, thèse d'état, Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil.
- Achour, B., Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire. *Journal of Hydraulic Research* 41(3), 319-325.
- Andersen J, V. M., (1978). Undular hydraulic jump, *Proc, ASCE, j, Hydraulics Division*, Vol. 104, pp. 1185-1188.
- Bakhmeteff, B. A., Matzke, A E, (1936). The Hydraulic Jump terms of dynamic similarity, *Transactions, American society of civil engineers*, Vol.101, pp, 630-647.
- Belanger, J.B., (1828). Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes, Carilian-Goeury, Paris.
- Benmalek Ahmed, (2012). Etude de ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal. Mémoire de Magister, département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Biskra, Algérie.
- Bousmar D, Wilkin N, Jacquemart, J H, Zech Y. (2004) Overbank flow in symmetrically narrowing flood plains. *J H Eng* 2004; 130(4): 305-312.
- Bradley, J. N., Peterka, A. J., (1957). The hydraulic design of stilling basins, Hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I), paper 1401; High dams, earth dams, and large canal structures (Basins II), paper 1402; short stilling basins for canal structures, small outlet works, and small spillways (Basin III), paper 1403; stilling basin and wave suppressors for canal structures, outlet works and diversion dams (Basin IV), paper 1404; stilling basin with sloping; apron (Basin V), paper 1405; small basins for pipe or open channel outlets no tail water required (Basin VI), paper 1406, *Proceedings, American Society of Civil Engineers, J. hydraulics division*, vol. 83, No.HY5.
- Chow, V.T. (1959) *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Debabeche, M., Achour, B., (2006). Effet du seuil sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. *Journal of Hydraulic Research* (article accepté pour publication en 2007).

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

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

Hager, W. H., Wanoschek, R., (1987). Hydraulic jump in triangular channel, J. Hydraulic Research, Vol.25, n°5,549-564.

Hager, W., Bremen R., H., et Kawogoshi N. (1990). Classical hydraulic jump; length of roller,J.Hydraulic research 28(5), 591-608.

Hager, W.H., Bretz N.V. (1986). Hydraulic Jump at positive and negative step; J. hydraulic research 24(4), 237-253.

Hager, W.H., Sinniger, R., (1985). Flow characteristics of the Hydraulic jump in Stilling Channel with an abrupt bottom rise, J. Hydraulic Research Vol. 23, 1985, No. 2 pp. 101-113; Vol. 24(3), pp. 207-215.

Journal of Hydraulic Engineering 111(2): 357-361.

Kateb , S.,(2012).Etude théorique et expérimental de quelques types de ressauts hydraulique dans un canal trapézoïdal. Mémoire de doctorat. Département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

Knight, D.W. and M.E. Hamed (1984). "Boundary shear in symmetrical compound channels." Journal of Hydraulic Engineering 110(10): 1412-1430.

Knight, D.W. and Shiono, (1996), River channel and floodplain hydraulics, in Floodplain Processes, "Eds Anderson, Walling & Bates, Chapter 5", J Wiley, 139-181.

Magister, département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

mémoire de magistère en science hydrauliques, Département d'hydraulique, Université de

narrowing flood plains. J H Eng 2004; 130(4): 305-312.

Posey, C.J.,and Hsing, P.S., "Hydraulic jump in Trapezoidal Channels," Enginnering News-Record, Vol. 121,Dec, 22, 1938, pp, 797-798.

Rajaratnam, N. and R.M. Ahmadi (1979). "Interaction between main channel and floodplain flows." Journal of the Hydraulics Division 105(5): 573-588.

Sandover, J. A. & Holmes, P.(1962) "The Hydraulic Jump in Trapezoidal channel". 45-49.

Sellin, R. H. J. (1964)."A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain" La Houille Blanche (7): 793-802.

Silvester, R. (1964). Hydraulics Jump in all Shapes of Horizontal Channels, Proc.ASCE, J. Hydr.Divi., 90, 23-55.

Wanoschek, R., Hager, W. H., hydraulic jump in trapezoidal channel, j. hydr. Research, Vol. 27, 1989,429-446.

Wormleaton, P. R. and P. Hadjipanos (1985). "Flow distribution in compound channels."

Wormleaton, P. R., J. Allen, et al. (1982). "Discharge assessment in compound channel flow." Journal of the Hydraulics Division 108(9): 975-994.

Zaid, Z., (1967).effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. Mémoire de Mémoire de Magister, département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.