



Université Mohamed Khidher de Biskra
Faculté de science et de la technologie
Département de Génie Civil et Hydraulique

MEMOIRE DE MASTER

Science et Technologie Hydraulique

Hydraulique Urbaine

Réf : 01 HU/2020

Présenté et soutenu par :

Ghendous Seyfeddine

Etude expérimentale des hauteurs conjuguées des ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdale asymétrique à convergent trapézoïdale

Jury :

	Université de Biskra	Président
	Université de Biskra	Examineur
Charhabil Sonia	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2019-2020

Dédicas

Je dédie ce travail :

À ceux qui m'ont tout inculqués et indiqués la bonne voie en me rappelant sans cesse que la patience, la volonté et le travail ont toujours fait les grands hommes.

À mon père kamel

Et

A mon grand-père Abd Ennour

À celle qui m'a donné le goût du travail qui ne ménage aucun effort pour ma réussite et a su attendre avec patience les fruits de sa bonne éducation.

À ma mère Halima

À ceux et celles qui, de leur amour, leur respect et leur dévouement me bercent le coeur.

À mes frères

A ceux que j'aime beaucoup, Ilias , Abd Essamade , Dawed , Taha

À mes amis les plus chères

*Toufik , Sami , Youba , Salah , Raid , Moncef , Bilal , Islem , Riheb et a tous les gens qui connait **Ghendous Seyfeddine***

À toute ma famille

À toute la promotion de 2ème année master 2019/2020

Remerciement

Je remercie en premier lieu mon dieu de m'avoir donné la force, la volonté et le courage de terminer ce travail.

*Je tiens à remercier chaleureusement mon encadreuse, Madame **Cherhabil Sonia** qui a accepté de diriger ce travail et pour ses conseils et ses encouragements*

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des enseignants du département de génie civil et d'hydraulique, sans eux je ne serai jamais arrivé à ce jour.

Je tiens aussi à remercier les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, Je ne pourrais oublier de remercier mes amis et mes collègues

Résumés :

Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier, d'un point de vue théorique et expérimental, le ressaut hydraulique, dans un canal trapézoïdal non rectangulaire, cette étude était divisée en deux parties : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entreprise dans ce domaine ; une seconde partie à caractère expérimental.

Nous voulons ,par le biais de cette étude, trouver des relations fonctionnelles générales exprimant les longueurs caractéristique et le profil de surface de ce type de ressaut hydraulique , les équations obtenues sont représentées adimensionnels, afin de leur donner un caractère de validité générale .

ملخص

الغرض من هذه الأطروحة هو الدراسة من وجهة نظر نظرية التجريبية ، القفزة الهيدروليكية ، في قناة شبه منحرف غير مستطيلة ، تم تقسيم هذه الدراسة إلى جزئين: جزء ببليوغرافي أول استعرضنا من خلاله العمل الجاري في هذا المجال ؛ الجزء الثاني من طبيعة تجريبية.

نريد ، من خلال هذه الدراسة ، إيجاد علاقات وظيفية عامة تعبر عن الأطوال المميزة والمظهر الجانبي السطحي لهذا النوع من القفزة الهيدروليكية ، حيث يتم تمثيل المعادلات التي تم الحصول عليها بلا أبعاد ، من أجل منحها صفة الصلاحية العامة

Sommaire

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Première partie

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1

1. Ressaut hydraulique en canal rectangulaire	1
1.1. Introduction.....	1
I.2. Ressaut hydraulique	1
I.2.1. Définition.....	1
I.2.2. Description du phénomène.....	1
1.3. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE.....	2
I.3.2. Caractéristiques du ressaut hydraulique.....	2
I.3.1. Classification des ressauts.....	5
1.3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	5
1.3.2.1.1. Hauteurs du ressaut.....	6
1.3.2.2. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	6
1.3.2.2.1. Longueur du ressaut.....	6
1.3.2.2.2. Longueur du rouleau.....	7
1.3.2.3. Rendement du ressaut.....	8
1.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire.....	9
1.4.1. Approche de Forster et Skrinde (1950).....	9
1.4.1.2. Seuil continu à paroi épaisse.....	11
1.4.1.1. Seuil continu à paroi mince.....	12
1.5. Conclusion.....	12

Chapitre II

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOIDAL.

Partie 1 : Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique

II.1.1. Introduction.....	15
II.1.2. Caractéristique du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal.....	15
II.1.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	15

II.1.2.2. Longueur du ressaut.....	18
II.1.2.3. Perte de charge relative du ressaut hydraulique.....	19
II.1.2.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire.....	20
II.1.2.3.2. Cas particulier du canal triangulaire.....	20
II.1.3 conclusion.....	21

Partie 02 :Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique

II.2.1 Approche d’Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954	21
II.2.1.1 Analyse de la section totale.....	23
II.2.1.2 Analyse de bande longitudinale (volume de contrôle).....	23
II.2.1.3 Discussion des résultats.....	26
II.2.2 Approche d’Hubert Chanson.....	28
II.2.2.1. Propagation positive de ressaut dans un type non rectangulaire (Canal asymétrique).....	28
II.2.2.2 Installation expérimentale.....	30
II.2.3 Conclusion.....	31

Chapitre III

**INFLUENCE DU SEUIL SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE DANS QUELQUES PROFILES
DES CANEAUX**

III.1. Introduction.....	33
III.2 Canal triangulaire.....	33
III .2.1 Introduction.....	33
III 2.2 Hauteur relative du seuil.....	33
III 2.Canal rectangulaire (essais actuels pour $x \approx L_j$).....	34
III.3 Canal rectangulaire (cas de compacité).....	36
I.3.1 Introduction.....	36
III.3.2 Hauteur relative du seuil.....	36
III.4 Conclusion.....	38

Deuxième Partie

Chapitre I

I.1.Introduction.....	41
I.2. Description du dispositif.....	41
I.3.Appareillage des mesures.....	46
I.3.1 Mesure des débits	46
I.3.1.1. Méthodologie de mesure de débit.....	46
I.3.2. Mesure des hauteurs de la surface libre.....	49
I.3.2.1. Limnimétrie.....	49
I.4.Conclusion	50

Chapitre II :

II.1. Introduction	52
II.2.Procédure expérimentale.....	52
II.2.1.Variation de la hauteur h_1 en fonction du débit pour toute la gamme.....	53
II.2.2.Variation de la hauteur h_2 en fonction du débit pour toute la gamme	55
II.2.3.Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de Froude.....	56
II.3. Conclusion.....	59

CONCLUSION GENERAL

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIES.

PRINCIPALES NOTATIONS

Introduction général

Introduction générale

Introduction Générale

Dans le domaine des constructions hydrauliques, les ouvrages de dissipation d'énergie occupent une place prépondérante. Ces structures doivent permettre une restitution de l'eau à la rivière sans engendrer d'érosions. Pour permettre cette dissipation d'énergie, une des solutions envisageables consiste en la mise en place d'un bassin amortisseur. Le fonctionnement de ces bassins se base sur le phénomène du ressaut hydraulique permettant de dissiper une importante quantité de l'énergie cinétique de l'eau.

Ces dernières années le ressaut hydraulique a fait l'objet de plusieurs recherches fondamentales et appliquées. La bibliographie montre que 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, la rugosité du fond, ..etc) peut conduire à différentes configurations du ressaut.

L'étude des paramètres hydrauliques du ressaut, tels que, le rapport des profondeurs conjuguées, la perte d'énergie ainsi que la longueur du ressaut, a attiré l'attention de divers chercheurs. En effet, plusieurs auteurs ont abordé la question du ressaut hydraulique dans différents profils géométriques. Nous pouvons citer, entre autres, Hager et Sinniger (1990), Hager et Bretz (1987), Rajaratnam (1964, 1965, 1967 et 2002), Rajaratnam et Murahari (1971), Rajaratnam N, Subramania K (1967) et Rand (1957 et 1965) qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal. En outre, Hager et Wanoschek (1987), Achour et Debabeche (2003) et Debabeche et Achour (2007) ont étudié le ressaut hydraulique triangulaire horizontal.

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

Toutes les études sont effectuées dans le domaine du ressaut hydraulique, pour aboutir à une meilleure configuration du bassin d'amortissement, tel que : la forme géométrique et le type d'obstacles, qui servent dans la plus part des cas à dissiper une grande partie de l'énergie cinétique dans le bassin. Donc, le choix de tel ou tel type se fait à la base des études expérimentales effectuées au laboratoire.

Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier expérimentalement le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique.

Notre présent mémoire comporte deux parties :

Introduction générale

-La première partie est divisée en trois chapitres :

- Le premier chapitre consiste à passer en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique en canal rectangulaire, nous étudierons la classification effectuée par **Bradley et Peterka (1957)**. Nous citerons aussi les travaux de **Hager et Sinniger (1986)**, **Hager et al.(1990)** et ceux de **Forster et Skrinde (1950)** en deuxième lieu, nous examinerons les travaux les plus récents de **Debabeche (2003)** qui seront l'objet de base de notre étude bibliographique, sur le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal rectangulaire, et les travaux du **Rand (1957)** concernant le ressaut hydraulique forcé par seuil.
- Le deuxième chapitre concerne le ressaut hydraulique évoluant dans le canal de forme trapézoïdale autrement dit non rectangulaire. Ce chapitre sera divisé en deux sous chapitres. Le premier concerne le ressaut dans le canal trapézoïdal symétrique dont on exposera les travaux de **Hager et Wanochek (1989)** relatives à ce type de ressaut. Dans le deuxième sous-chapitre le ressaut hydraulique évoluant dans le canal trapézoïdal asymétrique sera exposé à travers les travaux de **José Vasquez Diaz(1954)** ainsi que ceux de **Chanson(2018)**.
- Le troisième chapitre traite l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique en quelques profils des canaux, nous examinerons les travaux les plus récents de Achour, B., Debabeche, M., (2003), Control of Hydraulic jump by sill in a triangular channel, ainsi que les travaux de Debabeche, M., (2003), (compacité de ressaut dans un canal rectangulaire).

- La deuxième partie de ce mémoire concerne notre étude expérimentale sur le ressaut hydraulique Dans un canal trapézoïdal asymétrique . notre objectif sera de déterminer expérimentalement des relations fonctionnelles permettant le calcul aisé des longueurs caractéristiques et la détermination du profil de surface de ce type des ressaut.

Première Partie

Etude Bibliographique

Chapitre I

Ressaut hydraulique en Canal Rectangulaire

1. Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

1.1. Introduction

Les premières investigations sur le domaine de ressaut hydraulique sont entretenues en canal rectangulaire, prismatique, presque horizontal et de rugosité nulle. Le ressaut évoluant dans ces conditions s'appelle le ressaut hydraulique classique. Dans ce chapitre nous allons passer en revue les travaux entretenus dans le domaine de ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire à savoir :

- Ressaut hydraulique classique : d'abord, en premier lieu, nous allons présenter la classification de Bradley et Peterka (1957) du ressaut hydraulique en canal rectangulaire. En deuxième lieu, on va aborder la démonstration faite par Bélanger (1928), qui prouve que le ressaut est régi par l'équation de la quantité de mouvement, suivi par la forme la plus simple du rapport des hauteurs conjuguées présenté par Hager et Sinniger (1986). En dernier lieu et afin de confirmer que l'effet de frottement sur les hauteurs conjuguées est généralement négligé à l'issue de l'application du théorème de la quantité de mouvement, nous allons présenter l'étude de Hager et Bremen (1989). Ensuite, nous allons aborder l'étude de Hager (1992) concernant le profil de surface, puis, de Hager et al (1990) sur les longueurs caractéristiques de ressaut, notamment la longueur de rouleau développé et non développé. Enfin, le rendement de ressaut classique sera exposé, en comparant la formule trouvée avec celle de Hager et Sinniger (1989).
- Ressaut hydraulique contrôlé : le ressaut hydraulique contrôlé fait l'objet de notre discussion. D'abord, la première investigation systématique de Forster et Skrinde (1950) concernant le ressaut contrôlé par seuil mince sera présentée, suivi par l'étude de Achour, Sedira et Debabeche (2002). Forster et Skrinde (1950) ont aussi étudié le contrôle du ressaut par seuil à paroi épaisse d'une part, et par marche positive d'autre part.

1.2. Ressaut hydraulique

1.2.1. Définition

Le ressaut hydraulique est un phénomène couramment observé lors d'écoulement hydrauliques ouvert représentés par une surélévation brusque (écoulement rapidement varié) brusque de la surface libre d'un écoulement permanent, qui se produit lors du passage du régime torrentielle (super-critique) au régime fluvial (sous-critique). Il est accompagné d'une agitation marquée et de grandes pertes d'énergie

1.2.2. Description du phénomène

D'après Frédéric Murzyn et Hubert Chanson (2009), lorsque le fluide subit une perte importante de vitesse, la surface de l'écoulement s'élève brusquement. L'énergie cinétique est transformée en énergie potentielle et en turbulence, qui se traduit par des pertes irréversibles de

charge. Le flot, qui était rapide, ralentit et s'empile sur lui-même à la manière d'une onde de choc supersonique.

Ce phénomène dépend de la vitesse initiale du fluide. Si cette vitesse est inférieure à la vitesse critique, aucun ressaut n'est possible. Lorsque la vitesse du liquide n'est pas nettement supérieure à la vitesse critique, la transition apparaît comme un système d'ondes. Si la vitesse du flot devient plus grande, la transition est de plus en plus abrupte, jusqu'à ce que la zone de transition se brise et s'enroule sur elle-même. Lorsque ce phénomène se produit, le ressaut apparaît, en conjonction avec une violente turbulence, la formation de rouleaux et de vagues.

Nous passerons donc d'une profondeur $h < h_c$ à une profondeur $h > h_c$ où h_c est la hauteur critique au niveau du ressaut comme le démontre la figure I.3.

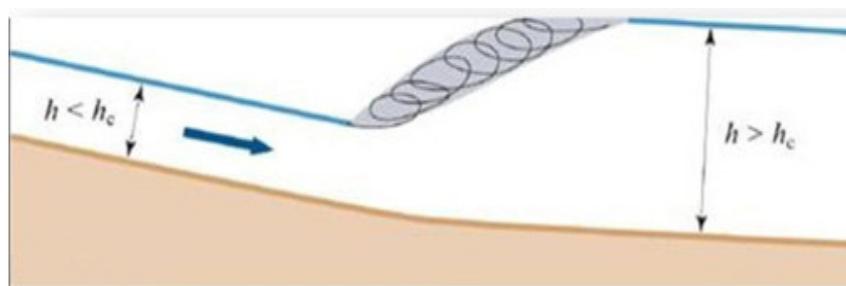


Figure I.1 : Description du ressaut

1.3.RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

Le ressaut hydraulique désigne le passage de l'écoulement torrentiel (ou supercritique) à l'écoulement fluvial (sub-critique). Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur L_r appelée longueur du rouleau.

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

I.3.1. Classification des ressauts :

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

Pour les valeurs de $F_1 = 1$, le régime est lent, ou critique, et il n'y a pas de ressaut.

D'après Andersen (1978), Pour des valeurs du nombre de Froude compris entre 1 et 1.7, 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, ce type de ressaut est dit ondulé.

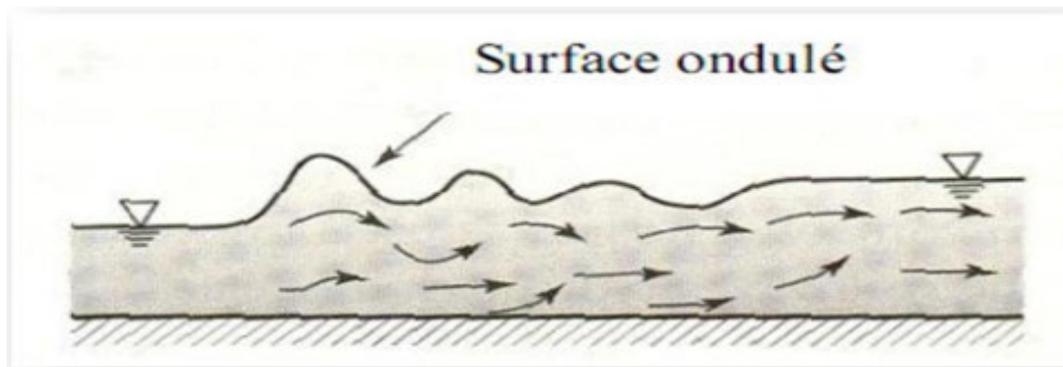


Figure I.2 : Ressaut nodule

Selon Armando Lencastre, le ressaut hydraulique peut prendre plusieurs formes et approuve la classification de Bradly et Peterka (1957) qui préconisent quatre formes du ressaut hydraulique selon le même principe d'Andersen (1978)

a. Le Pré-ressaut ou le ressaut faible

Il sévit lorsque $1,7 < F1 < 2,5$. Pour un nombre de Froude avoisinant les 1.7, La surface du Ressaut est alors composé d'une série de petits rouleaux, ces derniers s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude $F1$ augmente.

La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement de dissipation obtenu est très faible.

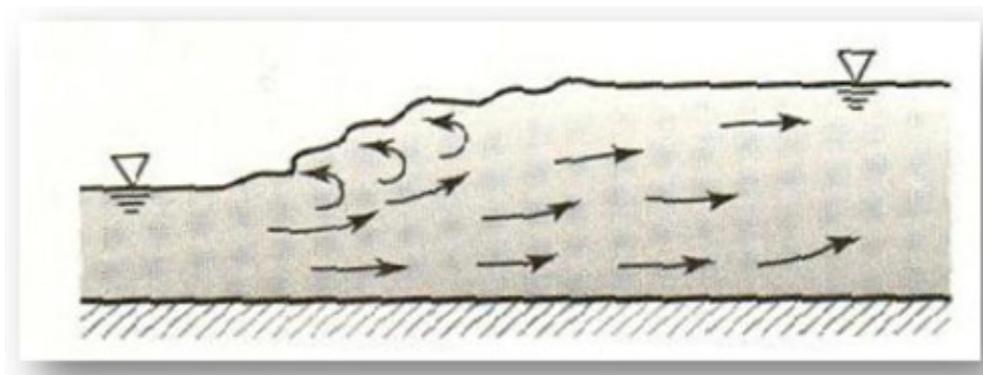


Figure I.3 : Le Pré-ressaut

b. Le ressaut de transition ou oscillatoire :

Il est remarqué pour $2,5 < F1 < 4,5$, Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

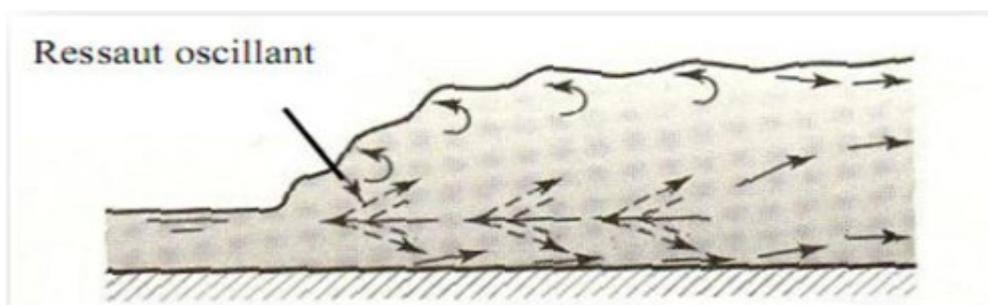


Figure I.4 : Le ressaut de transition

c. Le ressaut stable ou établie :

Obtenu pour $4,5 < F1 < 9$, Ce type de ressaut est dit établi et est souvent utilisé dans les bassins de dissipation et ce pour plusieurs raisons, entre autres :

Pour son rendement élevé lors de la dissipation d'énergie et qui peut atteindre les 70 %. Pour la Compacité de sa forme et pour sa stabilité.

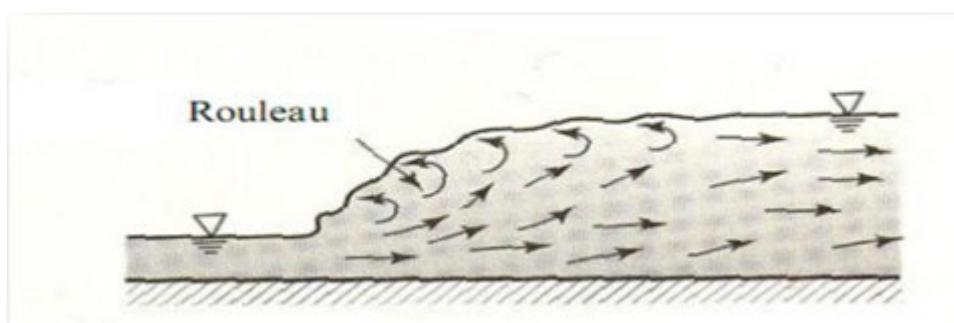


Figure I.5 : Le ressaut stable

d. Le ressaut agité (Fort) :

Il sévit pour $F1 > 9$, Il est caractérisé par un écoulement amont ayant une très faible profondeur et une vitesse relativement élevée. Il présente une instabilité verticale du moment qu'il ne peut pas adhérer constamment au fond du canal ainsi qu'une surface libre irrégulière et très écumeuse.

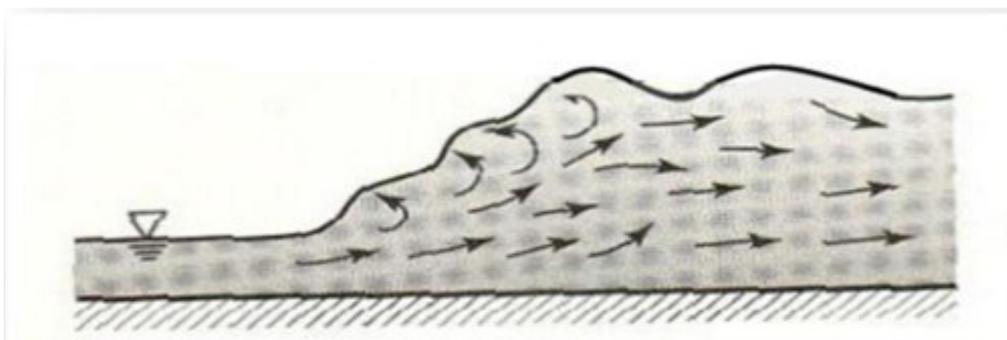


Figure I.6 : Ressaut agité

Remarque

Le ressaut considéré dans cette étude est le ressaut dit classique, celui étudié dans un canal horizontal rectangulaire ayant un fond lisse et dont le débit et la rugosité demeurent constants.

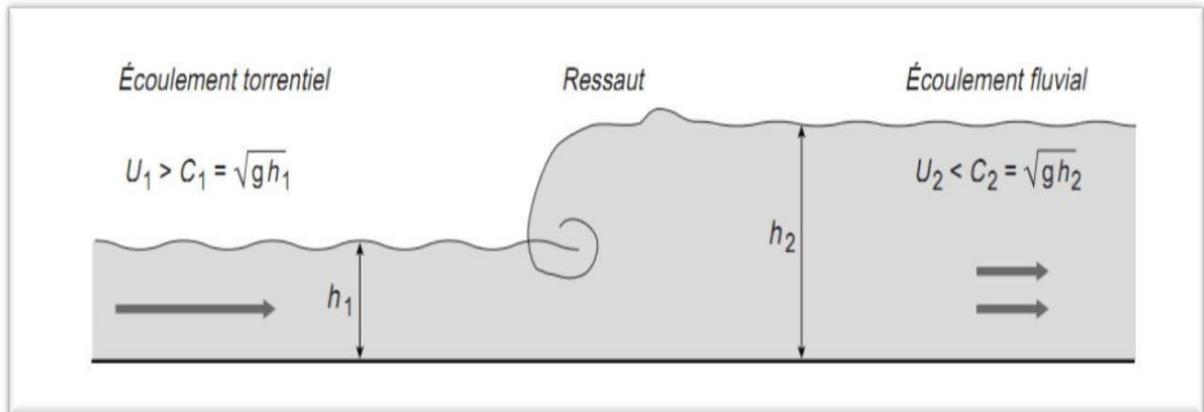


Figure I.7 : Schéma d'un ressaut classique

I.3.2. Caractéristiques du ressaut hydraulique

Le ressaut hydraulique est caractérisé par trois (03) paramètres à savoir :

- Ses hauteurs conjuguées.
- Sa longueur.
- Sa capacité de dissipation d'énergie

1.3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :

Le canal de section droite rectangulaire constante est un cas particulier du canal

Trapézoïdal pour lequel l'angle d'inclinaison du talus par rapport à l'horizontal est de 90° ; ceci correspond donc à $m = \cotg 90^\circ = 0$, ou bien à $M = 0$.

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

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

La relation (1.2) est connue sous le nom d'équation de Bélanger et permet d'évaluer le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 . Hager et

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

Sinniger(1985) proposent une relation approchée applicable pour le nombre de Froude $F_1 > 2$:

1.3.2.2. Longueurs caractéristiques du ressaut :

Le ressaut hydraulique est caractérisé par la longueur L_r^* du rouleau ainsi que par la longueur L_j^* sur laquelle il s'étend. Ces caractéristiques n'ont pu être évaluées que par la voie de l'expérimentation.

1.3.2.2.1. Longueur du ressaut :

La première caractéristique du ressaut est la longueur L_j^* sur laquelle il s'étend, ceci n'a pas pu être quantifiée que par voie expérimentale et sa définition varie d'un auteur à un autre. En effet, on estime que la longueur L_j^* doit être mesurée toujours entre le pied du Ressaut et la section aval de sorte que :

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

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

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

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

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

$$L_j^* / h_2^* = 6$$

1.3.2.1.1. Hauteurs du ressaut

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

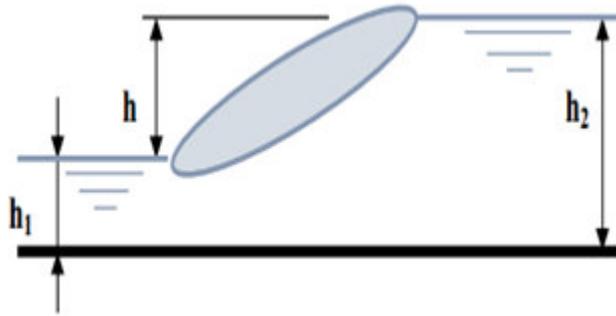


Figure I.8 : hauteur du ressaut (Hager et al 1990).

1.3.2.2.2. Longueur du rouleau :

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

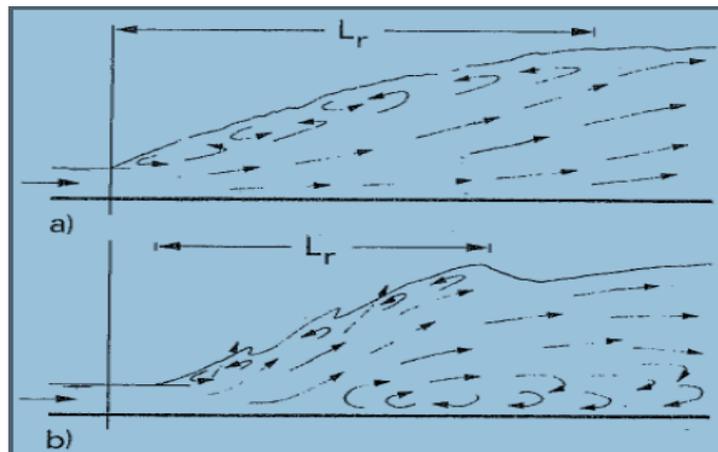


Figure I.9: Aspect du ressaut classique.

a) rouleau développé. b) rouleau non développé.

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

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

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

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

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

« Tgh » désigne la tangente hyperbolique.

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

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

1.3.2.3. Rendement du ressaut

Pour le cas du canal rectangulaire

$$\eta^* = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}}$$

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

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

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

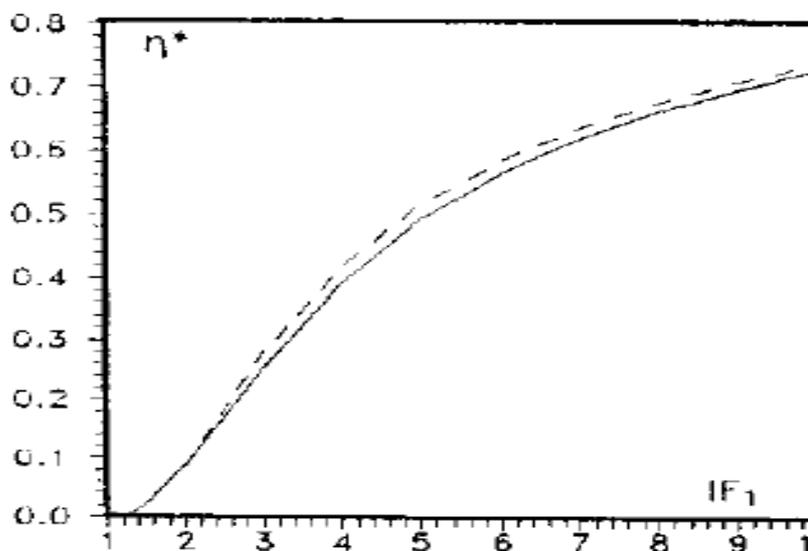


Figure I.10 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbe tracée selon la relation (2.9). (---) Courbe Tracée selon la relation (2.10).

La figure 1.3 montre d'une part que le rendement η^* du ressaut classique est supérieur à 50%

Pour $F_1 \geq 5,1$ et que les rendements calculés en application de la relation approchée (1.10) Sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.9) d'autre part; l'écart Maximum observé peut atteindre les 2%.

1.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire

1.4.1. Approche de Forster et Skrinde (1950)

1.4.1.1. Seuil continu à paroi mince

La première tentative systématique d'étudier le ressaut contrôlé par seuil a paroi mince est certainement celle Forster et Skrinde (1950), ils ont développé un diagramme, liant les trois paramètres adimensionnels suivants :

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

Le seuil constitué la limite aval du ressaut ($x=L_r$), il est dénoyé et fonctionne alors comme un déversoir. Trois valeurs de la position relative du seuil ont été considéré ($x/h_2=3 ; 5$ et 10), (figure 1.12)

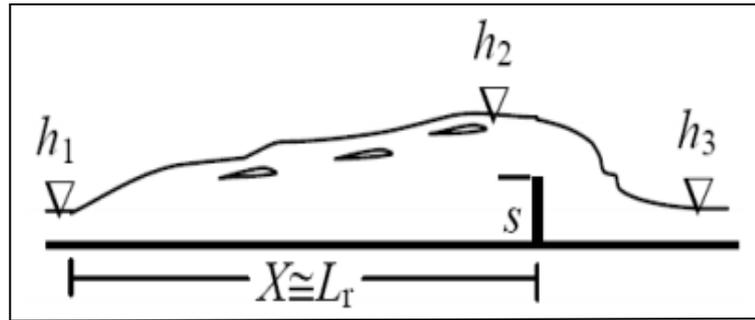


Figure 1.11 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

La profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval n'a ainsi aucune influence sur le débit franchissant le seuil. Cette condition est satisfaite lorsque :

$$h_3 < h_2 - 0,75 \cdot s$$

La figure 1.13 montre la variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les valeurs 3, 5 et 10 de la position relative x/h_2 du seuil.

Ce diagramme permet l'analyse de l'effet d'un seuil donné pour des conditions amont et aval connus.

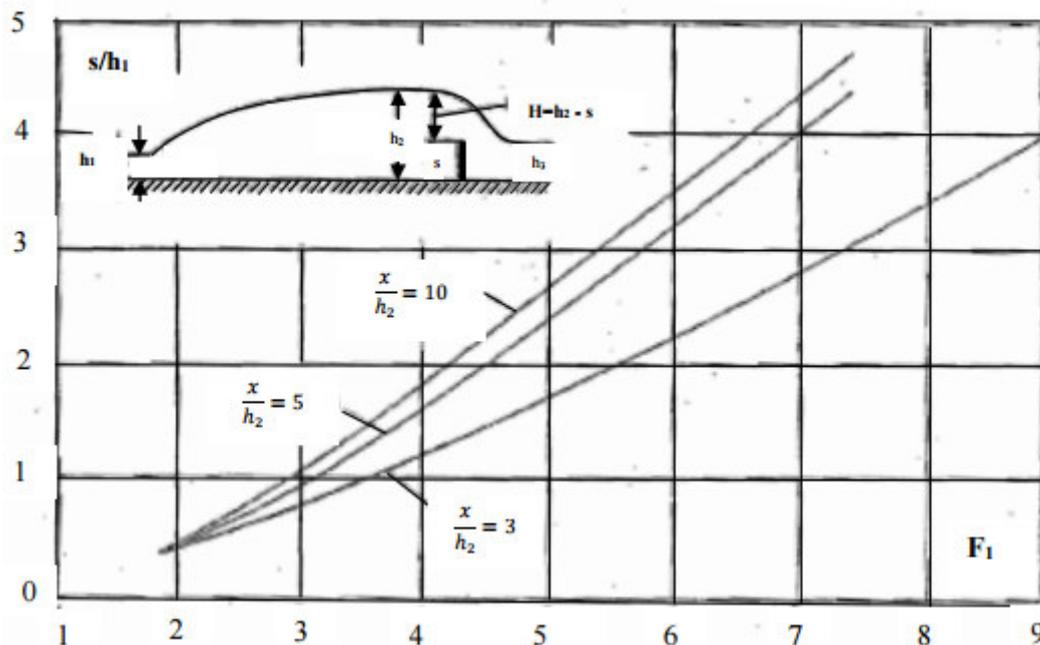


Figure 1.12 : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince pour quelques valeurs de x/h_2 , selon Forster et Skrinde (1950)

Dans le diagramme (figure 1.13), chaque point est représenté par la paire de coordonnées $(F1, s/h1)$. Si le point se situe entre deux courbes, le ressaut se produit dans une position relative $(x/h2)$ indiqué par une valeur interpolée. Les points qui se situent au-dessus de l'une des courbes représentent les conditions sous lesquelles le seuil est trop haut et le ressaut se déplace vers l'amont. Les points qui se situent en dessous de l'une des courbes représentent les conditions sous lesquelles le seuil est trop bas, donc le ressaut se déplace vers l'aval. Le dimensionnement des bassins d'amortissement contrôlé par seuil à paroi mince est basé sur le diagramme représenté sur la figure 1.13. Hors, cette méthode graphique nécessitent des interpolations et seules trois courbes sont proposées. Ces considérations ont motivé Achour et al (2002) a conduit une étude expérimentale dans le but de compléter les essais de Forster et Skrinde (1950), et ainsi de définir une relations explicite $f(F1, S, x/h2) = 0$.

1.4.1.2. Seuil continu à paroi épaisse

Pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse illustré dans figure (1.15), l'écoulement dans la section 2 est en régime fluvial de profondeur h_2 . Comme le débit déverse librement par-dessus le seuil, l'écoulement est en régime critique de profondeur h_c , il devient de nouveau torrentiel à l'extrémité aval dont la profondeur finale h_m est minimale (section m).

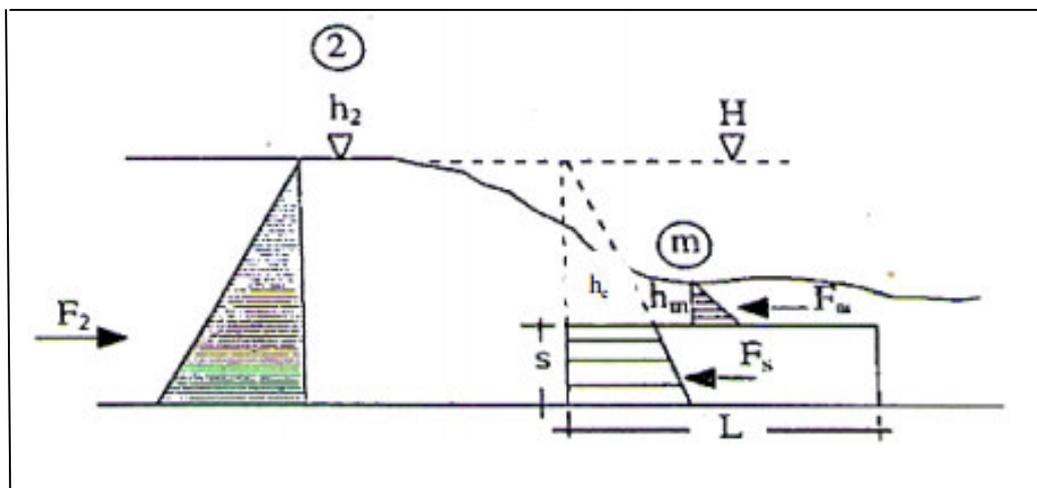


Figure 1.13 : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions

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 $s / h1$ du seuil et le nombre de Froude $F1$. Le paramètre $x / h2$ n'a ainsi théoriquement aucune influence sur le contrôle du ressaut.

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

Cette équation donne la relation entre s/h_1 et F_1 , elle peut être représentée par la courbe indiquée dans la figure 1.16. Cette courbe peut servir de guide pour le design d'un bassin d'amortissement en utilisant un seuil à paroi épaisse comme un accessoire de contrôle du ressaut, à condition que :

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

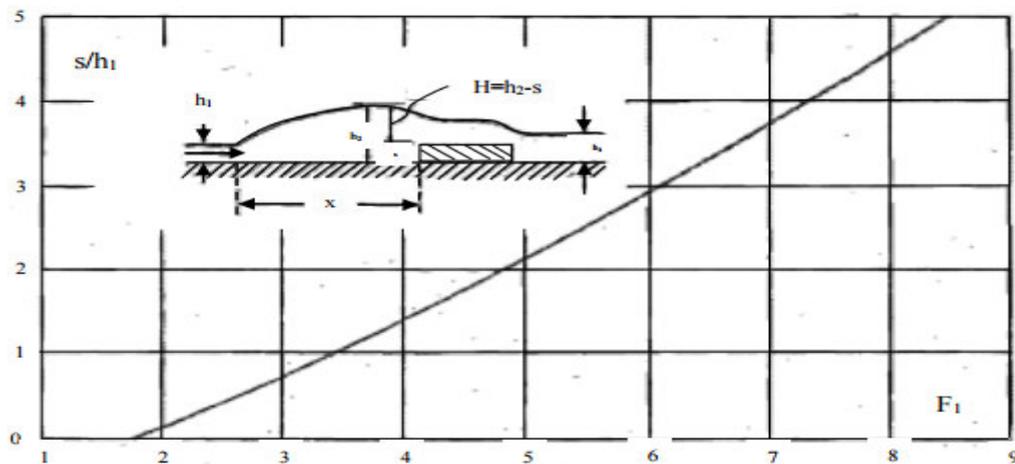


Figure 1.14 : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation (1.37)

1.5.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'abord, nous avons constaté 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, et que plusieurs formules ont été proposées, par différents chercheurs.

Par la suite, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince et épais a été examiné par Forster et Skrinde (1950). Pour 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 .

Enfin, le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse, Forster et Skrinde (1950) ont pu présenter une courbe issue de l'application de la théorie de quantité de mouvement. Cette courbe illustre la variation de la hauteur relative du seuil S en fonction de nombre du Froude F_1 de l'écoulement incid

Chapter II

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOIDAL

Partie 01 : ressaut hydraulique en canal trapézoïdal symétrique.

II.1.1. Introduction

Le ressaut hydraulique évoluant dans des canaux non-rectangulaire a reçu une véritable attention, notamment en canal trapézoïdal, la performance du ressaut dans ce type de canal présente un intérêt considérable pour des applications pratique, étant donné que le profil trapézoïdal présente des avantages économiques pour des petites angles d'inclinaison des parois en comparant avec des paroi verticaux dans un canal rectangulaire.

II.1.2 Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

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

II.1.2..1. Rapport des hauteurs conjuguées

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

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

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

Les centres de gravité des sections initiales et finales sont :

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

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

Les forces de pressions des sections initiales et finales sont :

$$P_1 = w \cdot h_1 \cdot A_1$$

$$P_2 = w \cdot h_2 \cdot A_2$$

L'application de cette équation donne :

$$\frac{bh_1^2}{2} + \frac{mh_1^2}{3} + \frac{Q^2}{gA_1} = \frac{bh_2^2}{2} + \frac{mh_2^2}{3} + \frac{Q^2}{gA_2} \quad (2.2)$$

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_1^2)^3} \quad (2.3)$$

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

$$F_1^2 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} = \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (2.4)$$

Tels que : $Y = \frac{h_2}{h_1}$ et $M = \frac{mh_1}{b}$

Hager et wonoschek (1987) ont étudié la relation (2.4), la figure (2.1) représente la variation de rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de nombre de Froude amont F_1 et de rapport de forme M .

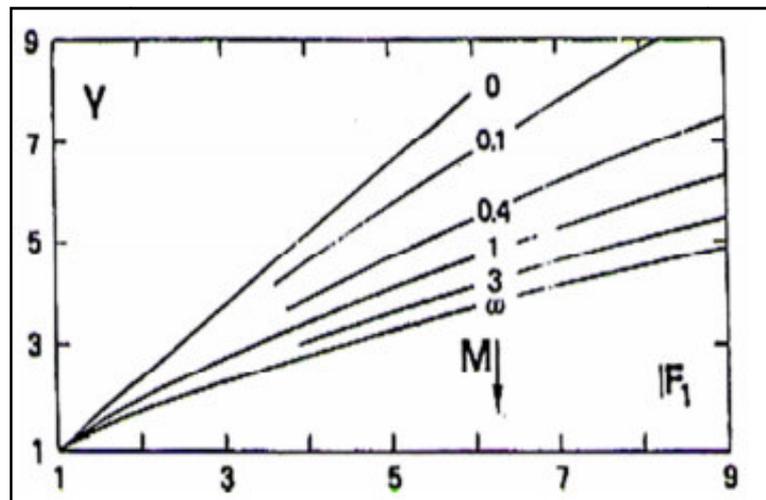


Figure (2.1) : hauteur conjuguées $Y = h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M = mh_1/b$. Hager et wonoschek (1987)

Pour F_1 fixe, Y diminue avec l'augmentation de M . Il est à noter que, pour le même débit, la même charge et la même quantité de mouvement dans deux canaux de forme différentes, F_1 n'est pas égal.

Les deux courbes limites respectives sont données par $M=0$ (canal rectangulaire) $M \rightarrow \infty$ (canal triangulaire), pour les quelles :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad M=0$$

(2.5)

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

$$1/M=0$$

Des solutions approximatives pour $Y(F_1)$ ont été présentées :

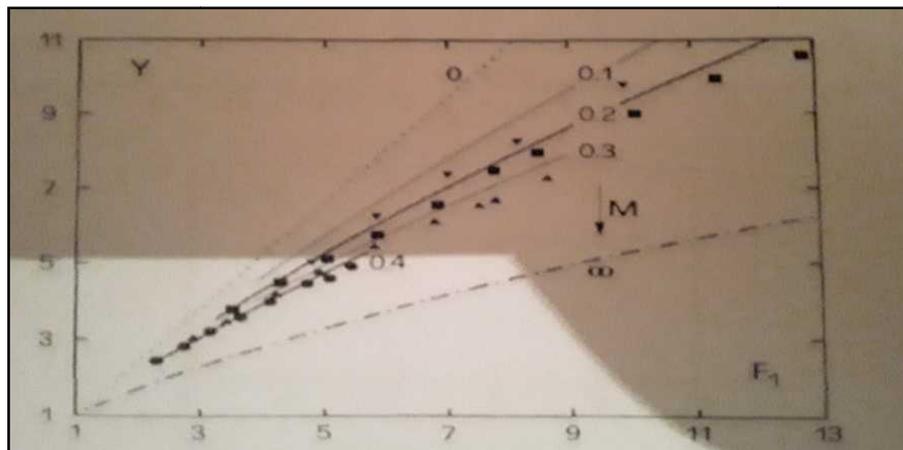
$$Y = \sqrt{2} F_1 - \frac{1}{2} \quad M=0$$

$$Y = \left(\frac{3}{2} F_1^2 - 1 \right)^{1/3} \quad 1/M=0$$

Noter que $Y \sim F_1$ pour le canal rectangulaire, mais $Y \sim F_1^{(2/3)}$ pour le canal triangulaire .

Les chercheurs ont réétudié le ressaut en canal trapézoïdale en 1989, cette fois ils ont conduit l'expérimentation aussi dans le profil trapézoïdal, toutefois la figure (2.2) représente la comparaison des valeurs du rapport des hauteurs conjuguées en fonctions de F_1 et de M issues de la relation (2.4) et les données expérimentales. Une concordance générale est notée, les valeurs expérimentales de Y sont toujours en dessous de celles issues de la relation théorique.

Cela est attribué à la négligence des forces de frottement avec les parois et il est clairement reflété par l'augmentation de la déviation avec l'accroissement de F_1 .



Figure(2.2) : Hauteur conjuguée $Y = h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M = mh_1/b$, (—) équation : (2.4) ; (...)

$M=0$; (◯) $M=0.1$; (◼) $M=0.2$; (◴) $M=0.3$; (.) $M=0.4$; (- - -) $M=\infty$.

II.1.2.2. Longueurs du ressaut

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

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

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

Où : $W = b + 2mh$ avec W : largeur de la surface d'eau L'erreur sur λ_j est estimée par : $\lambda_j = \lambda_j \pm 5$.

Une autre formule de la longueur du ressaut a été analysée par *Silvester (1964)*, *Wanoschek* et *Hager (1979)* c'est la relation (2.1) :

$$\frac{L_j}{(h_2 - h_1)} = 7.1(1 + 10M)$$

Où : $\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_i}$ est la perte d'énergie relative à travers le ressaut,

ΔH : la perte d'énergie du ressaut.

H_i : la charge totale d'eau.

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

- L_u : distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau du fond.
- L_b : longueur du rouleau du fond.
- h_b : hauteur maximale du rouleau du fond (figure 3.2).

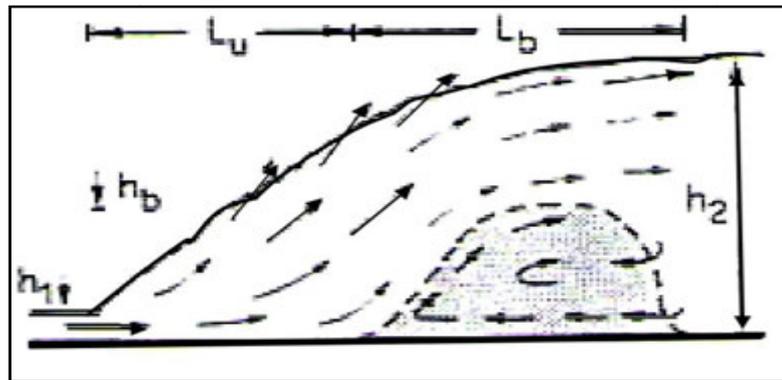


Figure (2.3) : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale. *Hager et Wanoschek (1989)*

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

II.1.2.3. Perte de charge relative du ressaut hydraulique

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

$\Delta H = H_1 - H_2$ (figure 2.4).

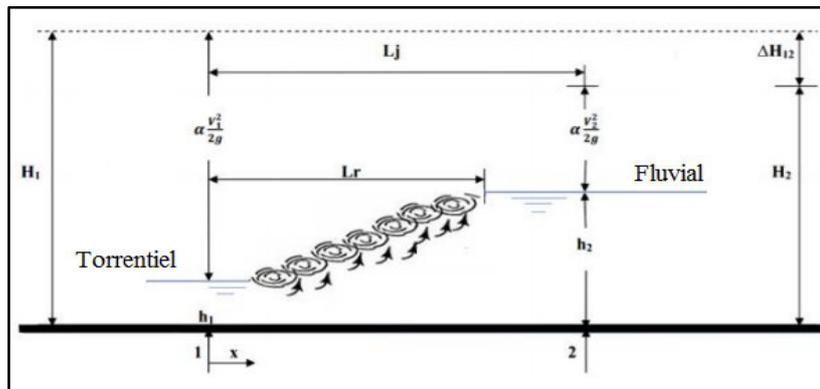


Figure (2.4) : Schéma de définition du ressaut hydraulique.

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

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

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \\ H_2 &= h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \end{aligned} \right\} (2.8)$$

En tenant compte des relations donnant le rapport des hauteurs conjuguées, le rapport de forme et de nombre de Froude amont F_1 .

$$Y = \frac{h_2}{h_1}; M = \frac{mh_1}{b} \text{ et } F_1 \text{ tel que :}$$

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

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

II.1.2.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire

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

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

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

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2 \quad (2.11)$$

II.1.2.3.2. Cas particulier du canal rectangulaire

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

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}} \quad (2.12)$$

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

$$\eta = \left[\left(1 - \frac{12}{F_1^4} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \quad (2.13)$$

La représentation graphique (figure 2.5) de la relation générale (3.12), montre que pour même nombre de Froude F_1 , le rendement du ressaut triangulaire est plus élevé que celui du rectangulaire.

Ou du trapézoïdale. Comparé au rendement du ressaut rectangulaire, le rendement du ressaut trapézoïdal est environ 10 % plus important.

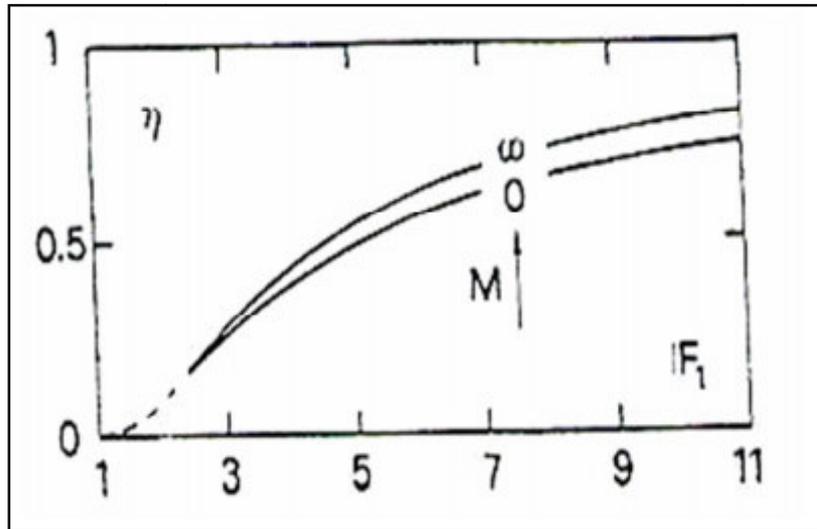


Figure (2.5) : Représentation graphique de la relation (3.12) du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . $M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire Hager et Sinniger (1985).

II.1.3 conclusion

Cette partie bibliographie 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 entreprise par : *Silvester (1964)*, Posey et Hsing (1938), et plus récemment ceux de *Hager et Wanoschek(1989)*.

Partie 02 : ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique.

II.2.1. Approche d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954 :

Dans cette approche, Alberto José et Rodriguez-Diaz ont étudié le ressaut dans un canal trapézoïdal dans lequel les parois latérales sont verticales, la surface de l'eau et le canal inférieur ne sont pas parallèles. La section non rectangulaire à étudier est présentée en coupe transversale dans la figure (2.6).

Cette étude a pour but de déterminer :

- Les caractéristiques de la vague déferlante du ressaut hydraulique, dans un canal non rectangulaire particulier.
- Le critère de l'existence du ressaut hydraulique de toute forme et distribution de vitesse.

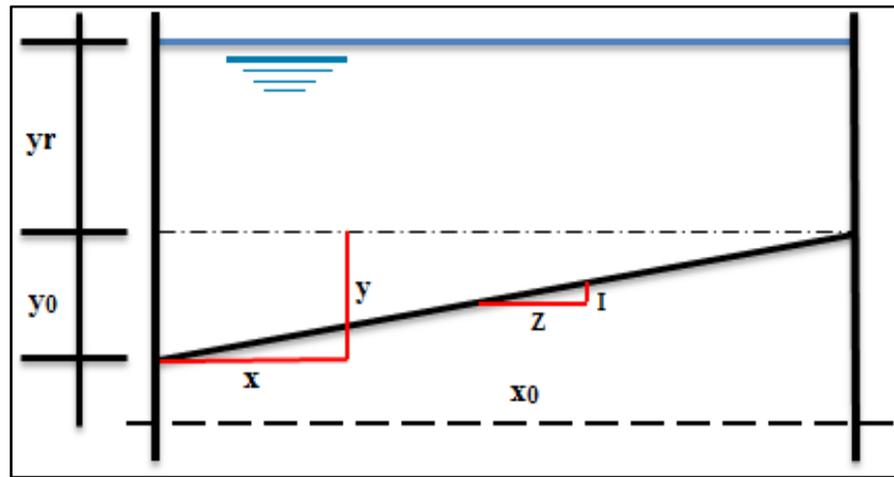


Figure (2.6) : Section transversale du canal .Approche d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, (1954).

x_0 : Largeur de la section transversale.

y_0 : Différence entre la profondeur de l'eau dans le fond et les côtés peu profonds.

Y : Profondeur de l'eau dans le côté peu profond.

Y are : Profondeur moyenne.

X_s : Longueur du retour latéral sur le côté peu profond du canal

X_d : Longueur de retour latéral sur le côté profond du canal.

Y : Vitesse.

Q : Débit.

$P+M$: Force de pression + quantité de mouvement.

G : Rapport de la force de pression et de l'écoulement amont et aval.

$$\Psi = P + M / At \cdot \frac{y_0}{2}$$

$$At = \frac{y_0 x_0}{2} \text{ Surface du triangle (Air d'apparition du ressaut).}$$

$$\Phi = y_r / y_0$$

$$\Theta = \frac{(Q \cdot At)^2}{g \cdot y_0}$$

F_1 = Nombre de Froude.

γ : Poids spécifique de l'eau.

Φ : Densité de la masse.

g : Accélération de la gravité.

L'indice 1 est utilisé pour noter la section en amont du front d'onde, et 2 pour la section en aval du front d'onde. L'indice S signifie la bande.

II.2.1.2 Analyse de la section totale

L'expression de la force de pression plus l'équation de quantité de mouvement d'écoulement dans la section est comme suit :

$$P+M = \frac{1}{2} \times 0 \text{ yr}^2 \gamma + \frac{1}{2} \times 0 \text{ y0} \gamma (\text{yr} + \text{y0}/3) + \Phi Q^2 / x0 \text{ yr} + (\frac{1}{2} \times 0 \text{ y0}). \quad (2.14)$$

La forme adimensionnelle :

$$\Psi = \phi^2 + \phi + \frac{1}{3} + \Theta / (1+2\phi). \quad (2.15)$$

D'après l'équation de la quantité de mouvement, $\Psi_1(\text{amont}) = \Psi_2(\text{aval})$:

$$\phi_1^2 + \phi_1 + \frac{1}{3} + \Theta / (1+2\phi_1) = \phi_2^2 + \phi_2 + \frac{1}{3} + \Theta / (1+2\phi_2). \quad (2.16)$$

D'après le développement de l'expression de Θ , d'après l'équation de continuité, on peut constater que Θ reste constante à l'amont et à l'aval du ressaut.

La solution de Φ_2 pour des valeurs données de Φ_1 et Θ a été réalisée graphiquement en traçant ψ par rapport à ϕ pour une valeur donnée de Θ .

Une série de courbes de ψ par rapport ϕ a été construite, chaque courbe représente une valeur différente de Θ .

D'après ces courbes, la valeur correcte de ψ peut être déterminée pour donner la valeur de ϕ et de Θ , puisque la valeur est la même pour les sections amont et aval.

II.2.1.3. Analyse de bande longitudinale (volume de contrôle)

La somme de la force de pression et de la quantité de mouvement dans la bande de la section amont de l'onde n'est pas nécessairement la même qu'en aval, en raison de la possibilité de retour latéral de la quantité de mouvement du côté profond au côté peu profond du canal.

L'augmentation de la quantité de mouvement sur le côté profond du canal et également une diminution sur le côté peu profond. Cette condition exige que la quantité de mouvement doive être transférée latéralement à travers le canal. Si le retour latéral de la quantité de mouvement est très grand, le retour physique sera impossible. Les critères de l'existence du

ressaut hydraulique sont basés sur l'ampleur (magnitude) du retour latéral de la quantité de mouvement

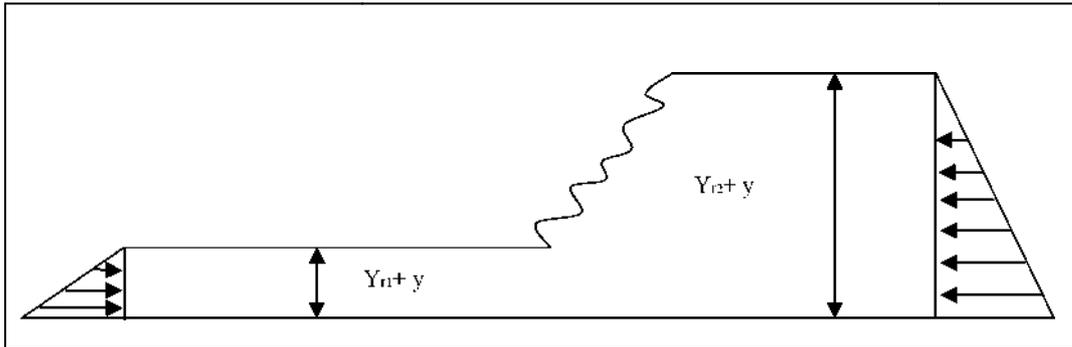


Figure (2.7) : Section de la bande longitudinale d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, (1954).

L'équation de la quantité de mouvement pour une bande est présentée sous la forme suivante :

$$\frac{1}{2} \gamma (y_{r1}+y)^2 + v_1^2 (y+y_{r1}) = \frac{1}{2} \gamma (y_{r2}+y)^2 + v_2^2 (y+y_{r2}). \quad (2.17)$$

On a: $V = Q/At (1+2\phi)$, divisant par γy_o^2 , l'expression suivante est obtenue pour la bande.

$$P + M/\gamma y_o^2 = \frac{1}{2} (y/y_o + \phi_1)^2 + \Theta (y/y_o + \phi_1) / (1+2\phi_1)^2 = \frac{1}{2} (y/y_o + \phi_2)^2 + \Theta (y/y_o + \phi_2) / (1+2\phi_2)^2 \quad (2.18)$$

Pour l'équilibre $(P+M) s_1 = (P+M) s_2 \quad (2.19)$

On a: $G = (P+M) s_2 / (P+M) s_1 \quad (2.20)$

$M=1$ pour l'équilibre

$M>1$ pour P+M déficience en amont

$M<1$ pour P+M surplus en amont

De la géométrie :

$$y/y_o = 1 - x/x_o \quad (2.21)$$

Remplaçant (2.21) dans (2.18) :

$$\frac{1}{2} (1-x/x_o + \phi_1)^2 + \Theta (1-x/x_o + \phi_1) / (1+2\phi_1)^2 = \frac{1}{2} (1-x/x_o + \phi_2)^2 + \Theta (1-x/x_o + \phi_2) / (1+2\phi_2)^2 \quad (2.22)$$

Remplaçant (2.22) dans (2.20) :

$$G = \frac{\frac{1}{2}(1-x/x_o + \phi_2)^2(1-x/x_o + \phi_2) / (1+2\phi_2)^2}{\frac{1}{2}(1-x/x_o + \phi_1)^2 + \Theta (1-x/x_o + \phi_1) / (1+2\phi_1)^2} \quad (2.23)$$

Le paramètre G ressemble au paramètre de forme H utilisé dans les études de la couche limite. La valeur de G est une mesure approchée de la quantité de mouvement à toute la bande longitudinale,

et la valeur de H représente la mesure approchée de la quantité de mouvement dans la couche limite. Autrement, le critère de séparation de la couche limite est souvent exprimé par le taux de changement de H plutôt que la valeur communément utilisée de H . La valeur de G ou $dG/d(x_0-x)$ peuvent être des mesures valables si le ressaut hydraulique est possible.

La valeur maximale de G se produit au fond le peu profond, où $x/x_0=1$

$$G_m = \frac{\frac{1}{2} \phi_2^2 + \Theta \phi_2 / (1+2\phi_2)^2}{\frac{1}{2} \phi_1^2 + \Theta \phi_1 / (1+2\phi_1)^2} \quad (2.24)$$

Les valeurs de G par rapport à ϕ pour les différentes valeurs de Θ sont illustrées dans la figure (2.8).

D'une manière similaire

$$\frac{dG/d(x/x_0)}{x/x_0} = 1 = G (\phi_2 - \phi_1) / \phi_1 \phi_2 \quad (2.25)$$

Les valeurs $\frac{dG/d(x/x_0)}{x/x_0} = 1$ sont tracés en fonction de ϕ_1 pour les différentes valeurs de Θ (Figure 2.6).

Le diagramme de G_m et $\frac{dG/d(x/x_0)}{x/x_0} = 1$ montre les valeurs correspondant aux essais. Les essais sont effectués à cinq largeurs différentes de canal ou à cinq valeurs différentes de $y_1/y_1 + y_0$.

La valeur du paramètre $Y_1/Y_1 + Y_0$ pour la section transversale rectangulaire est égale à l'unité. Dans ce cas, le ressaut est toujours possible et le rapport G c'est 1, il y a la force de pression plus l'équilibre de la quantité de mouvement dans chaque bande longitudinale. Dans une section triangulaire, la valeur de $Y_1/Y_1 + Y_0$ est égale à zéro, la formation du ressaut est impossible et les vagues ondulantes et rouleaux sur le côté peu profond sont présents ; la valeur maximale correspondante de G est infinie, ce qui signifie qu'il y a une force de pression plus une diminution de la quantité de mouvement en aval et qui ne peut pas être fournie, rendant impossible la formation du ressaut hydraulique.

Les valeurs théoriques calculées pour le rapport G_m et tracées dans la figure (2.8) sont toujours plus grandes que l'unité, ce qui veut dire qu'il y a une augmentation de la quantité de mouvement sur le côté profond du canal et une diminution sur le côté le peu profond.

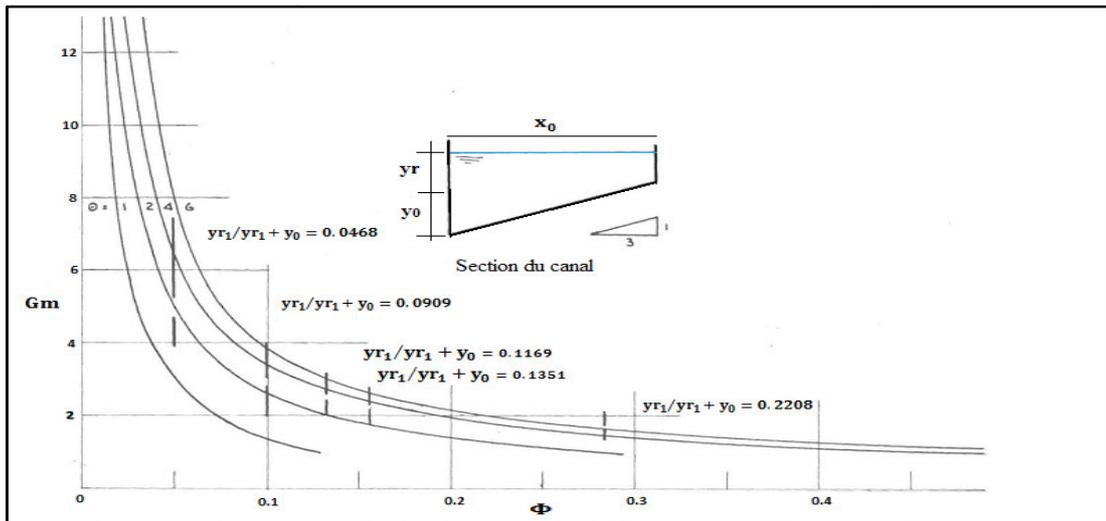


Figure (2.8): Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté peu profond. d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, (1954).

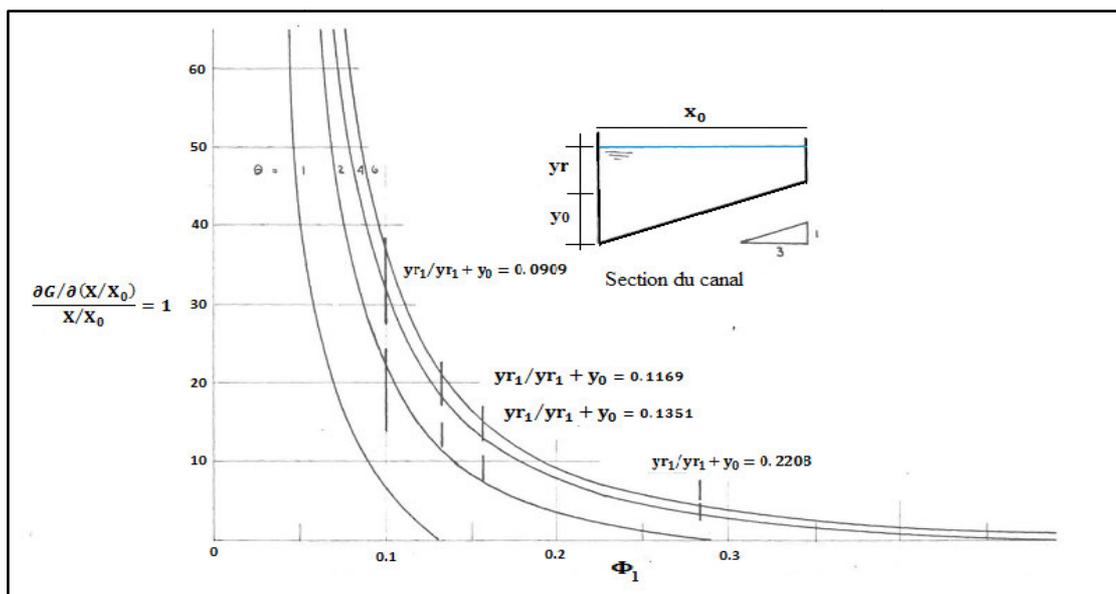


Figure (2.9) : Diagramme adimensionnel du taux de changement de M sur le côté peu profond. d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, (1954).

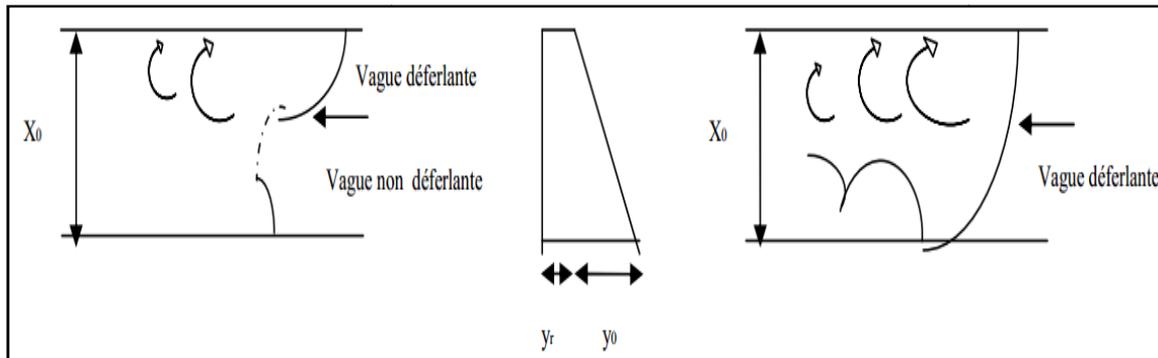
II.2.1.4. Discussion des résultats

Il existe deux types différents d'écoulement :

- Le premier type se compose d'ondes ondulantes à travers le canal et des rouleaux sur le côté peu profond. Une seconde vague bien définie a toujours été observée avec ce type d'écoulement. Un modèle de ce type d'écoulement est représenté sur les figures (3.5a et 3.5b).

- Le deuxième type consiste en une onde perpendiculaire à la section transversale qui peut être appelée ressaut hydraulique ; aucune seconde vague n'a été observée. Ce type d'écoulement est également esquissé dans les figures (3.5c et 3.5d).

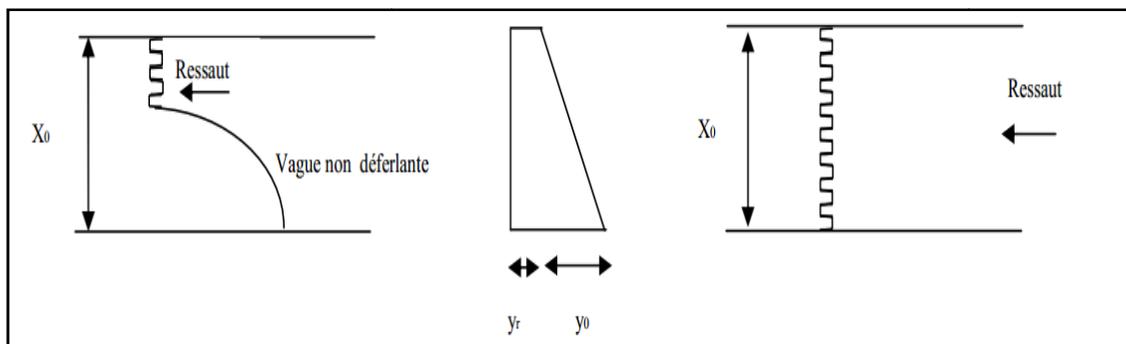
Les critères utilisés pour analyser les deux types de l'écoulement observés sont qu'un certain transfert latéral de la quantité de mouvement est nécessaire pour obtenir une onde perpendiculaire ; dans le cas où ce retour latéral de la quantité de mouvement ne peut pas être fourni, aucun ressaut hydraulique n'est possible.



a-Vague déferlante partielle

b- Vague

Premier type d'écoulement (série n°1 et n°4)



c-Ressaut partiel

d- Ressaut

Deuxième type d'écoulement (série n°2 et n°3)

Figure 2.10: Schéma général d'écoulement. d'Alberto José et Rodriguez- Diaz, (1954).

Dans la fin, l'étude expérimentale d'Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954) ont permis de déterminer les paramètres suivants:

1. En fonction de la valeur du nombre de Froude, l'écoulement est divisé en deux types. Si le nombre de Froude est inférieur à 1.83, des vagues déferlantes partielles sont obtenues ; et si le nombre de Froude est supérieur à 1.83, des vagues déferlantes sur toute la section du canal sont observées.

2. la valeur limite théorique de $F1 = 1.73$ pour les conditions de ressaut irrégulier et direct dans le canal rectangulaire sont très proches de la valeur de $F1 = 1.83$ obtenu pour ce canal. Par conséquent, la valeur du nombre de Froude un peu inférieur à 2 peut être considérée comme la limite entre les vagues déferlantes et non déferlantes indépendamment de la forme du canal.
3. Dans un canal rectangulaire, le nombre de Froude est suffisant pour décrire le type de l'onde, puisque seulement deux types sont possibles ; le ressaut irrégulier et direct. Dans un canal non rectangulaire une division supplémentaire est nécessaire, puisque deux phénomènes complètement différents sont possibles ; le type de l'écoulement constitué des vagues ondulantes et des tourbillons dans le côté peu profond, c'est le ressaut hydraulique. la ligne de démarcation entre ces deux types d'écoulement est donnée soit par la valeur de G ou la valeur de $dG/d(x/x_0)$ du côté peu profond. La condition de formation du ressaut est : $G_m < 2.8$ ou $dG/d(x/x_0) = 1 < 18.4$
4. Dans le cas de G_m est supérieur à 2.8, la longueur de retour latéral sur le côté peu profond augmente rapidement (si il ya une déviation par rapport à la forme rectangulaire) ; et elle devient infinie (si le canal est triangulaire).
5. La longueur du retour latéral sur le côté profond est toujours plus petite que celle sur le côté peu profond, elle augmente également par la diminution de la largeur du canal. Donc, la condition limite dans le canal rectangulaire est obtenue si la longueur des deux côtés du canal est la même.
6. La longueur du retour latéral sur le côté peu profond pour un ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire ($F1 > 1.83$ et $G_m < 2.8$) est plus petite que la longueur du ressaut dans un canal rectangulaire
7. Les conclusions 5 et 6 indiquent que le ressaut hydraulique dans une section non rectangulaire est plus efficace en tant que dissipateur d'énergie que dans une section rectangulaire.

II.2.2 Approche d'Hubert Chanson

II.2.2.1. Propagation positive de ressaut dans un type non rectangulaire (Canal asymétrique)

Dans un canal ouvert, le ressaut positif est le mouvement instable de l'écoulement, caractérisé par une augmentation soudaine de l'élévation de l'eau.

Les applications peuvent inclure les ressauts dans les canaux hydroélectriques et les ressauts induits par l'opération de vanne rapide. Alors, la littérature se concentre sur la propagation positive du ressaut dans les canaux rectangulaires, cette étude a examiné la propagation positive amont du

ressaut dans un canal asymétrique prismatique non rectangulaire. Des expériences détaillées sont réalisées dans un canal de 0,7 m de largeur et de 19 m de longueur, équipé d'une pente de lit transversal 1V: 5H. Des mesures non stationnaires sont effectuées à l'aide de compteurs de déplacement acoustique, ADV Profiler et ADV vélocimétrie. Une caractéristique clé était le mouvement d'écoulement non stationnaire en trois dimensions. Cela a engendré un mouvement secondaire transitoire compliqué et un mélange transversal amélioré par rapport à la propagation positive des ondes dans les canaux rectangulaires, Alors que le mouvement secondaire n'était pas différent du mouvement secondaire à débits continus dans les canaux composés prismatiques, les résultats présents ont souligné la nature transitoire et l'intensité extrême du mouvement secondaire dans les ondes positives.

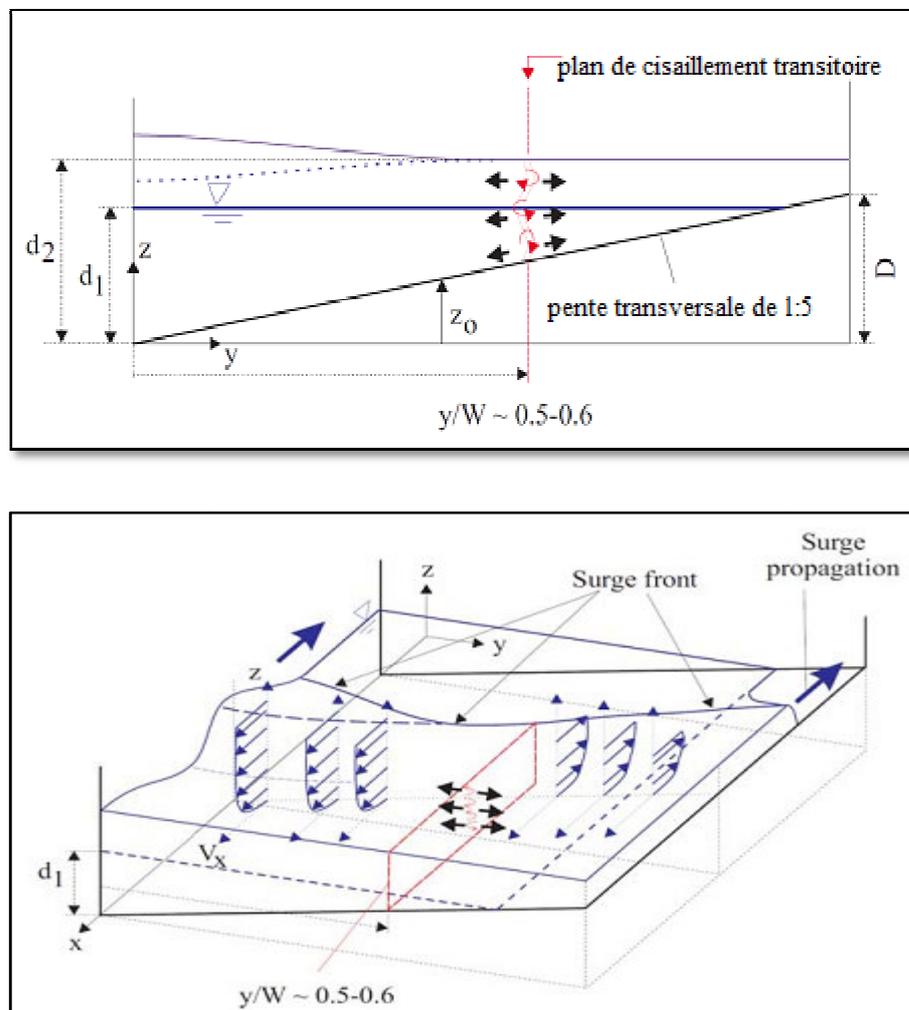


Figure (2.11): Modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la propagation positive du ressaut dans un canal composé prismatique ($d_1/D < 1$).

Hubert Chanson(2018).

II.2.2.2 Installation expérimentale:

Les expériences ont été menées dans le laboratoire d'ingénierie hydraulique avancée de l'Université du Queensland. Le canal incliné rectangulaire de 19 m de long et 0,7 m de large était équipé de parois latérales en verre de 0,52 m de hauteur. L'installation est auparavant utilisée par **LENG** et **CHANSON** (2015, 2016,2017). Avec une section transversale rectangulaire. Le lit du canal est modifié avec l'installation d'une pente transversale 1V:5H, en PVC (Fig. 2.12 et 2.13). L'écoulement d'eau est permanent, et il est alimenté par un réservoir d'eau en amont, suivi d'une série de stabilisateurs d'écoulement et d'une convergente lisse tridimensionnelle pour assurer une entrée régulière. Une vanne à fermeture rapide est située à l'extrémité aval du canal ($x = 18.1$ m) et sa fermeture rapide a généré une surtension positive se propageant en amont. Ici x est la distance longitudinale depuis le début du canal. La pente du canal est constante pour toutes les expériences ($S_o = 0,002216$). La figure (2.3) montre le canal en aval. Dans la suite, y est la distance transversale horizontale mesurée à partir de la paroi droite en verre et z est la distance verticale mesurée à partir du point le plus bas du canal, c'est-à-dire du côté de la paroi latérale droite (figure 2.12).

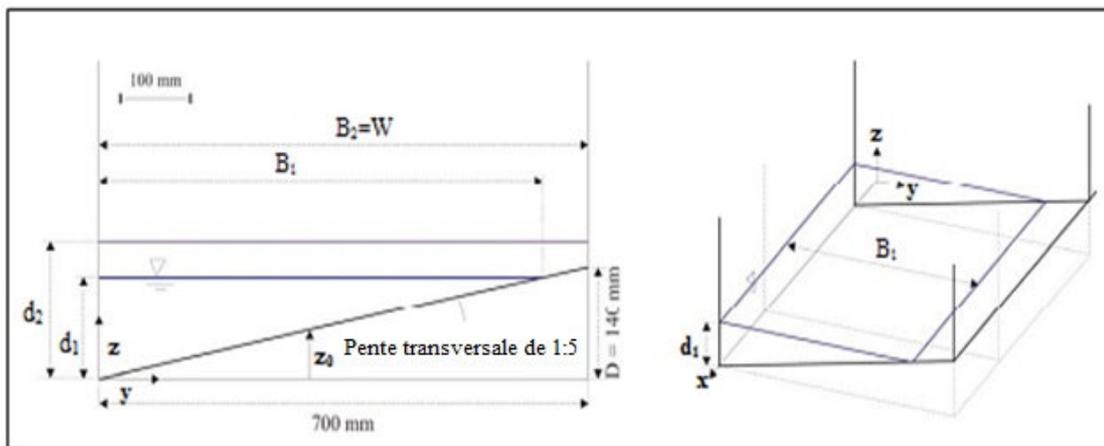


Figure (2.12):Modèle de la section transversale du canal - A gauche: en regardant vers l'amont.

Hubert Chanson(2018).



Figure (2.13): Photographie de l'installation expérimentale en aval Hubert Chanson(2018).

Globalement, le champ turbulent instable présentait des différences marquées par rapport aux observations dans les canaux rectangulaires. Ceci implique que les résultats quantitatifs obtenus dans les canaux rectangulaires pourraient ne pas être directement applicables aux canaux asymétriques non rectangulaires. Par exemple, pour le jet, une surtension sur les pentes de glissement des canaux trapézoïdaux artificiels; pour les courants de marée, des interactions le long des rives du fleuve dans les estuaires naturels. Dans les sections asymétriques non rectangulaires, il faut s'attendre à un mouvement secondaire transitoire important, associé à des niveaux de contrainte de cisaillement turbulents plus élevés. En outre, les résultats peuvent être directement pertinents pour la propagation de surtensions dans les voies navigables trapézoïdales artificielles et les canaux naturels de forme irrégulière en termes de modélisation numérique. Les modèles numériques classiques avec profondeur moyenne, par ex. basés sur les équations de St Venant et de Boussinesq, ne permettent pas de modéliser le mouvement turbulent tridimensionnel complexe sous les surtensions dans les canaux irréguliers. Un modèle complet de dynamique des fluides informatique tridimensionnelle (CFD 3D) basé sur les équations de Navier-Stokes est requis, Bien qu'une validation appropriée soit essentielle et nécessite des données de modélisation physique appropriées et de haute qualité (LENG et al. 2017, LUBIN et CHANSON 2017).

II.2.3 Conclusion

Cette partie bibliographie a pour objectif de faire le point sur les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique. Une étude a été proposée qui est celle d'Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954) et Hubert chanson (2018).

Chapitre III

INFLUENCE DU SEUIL SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE DANS QUELQUES PROFILES DES CANAUX

III.1. Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de trouver des relations empiriques exprimant la variation de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil et rapport $Y=h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées, ainsi que celle du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident.

III.2 Canal triangulaire

III .2.1 Introduction

Les essais effectués sur le ressaut contrôlé par seuil dans le canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° , permettent de faire une étude comparative, d'une part, entre le ressaut contrôlé par seuil mince et par seuil épais, et d'autre part entre le ressaut contrôlé et le ressaut forcé de type B-min.

III 2.2 Hauteur relative du seuil

Il ressort des relations (3.2) et (3.3) que la hauteur relative S du seuil peut s'écrire pour les trois cas de figures comme suit :

$$S = \gamma \cdot \text{Ln} [(IF_1+4)/5] \quad (3.1)$$

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

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

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

$$Y = 1 + \alpha \cdot \text{Ln} [(IF_1+4)/5] \quad (3.2)$$

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

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

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

$$Y = 1 + \beta \cdot S \quad (3.3)$$

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

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

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

L'expérimentation a d'ailleurs montré la validité de la relation (3.1) pour les trois types de ressauts testés. Nous présenterons sur la figure (3.1) les résultats obtenus

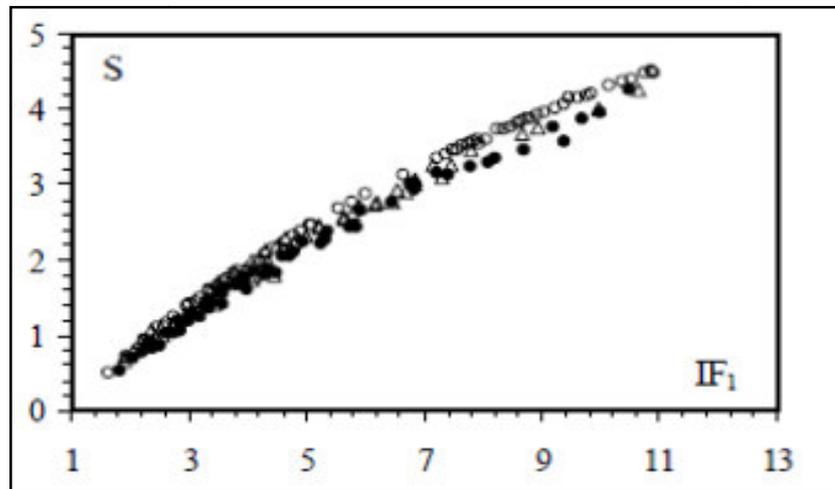


Figure (3.1) : Variation expérimentale la hauteur relative $S=s/h$

Froude IF_1 , pour un ressaut évoluant dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m=1$: (o) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (•) ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) ressaut forcé par seuil à paroi mince. M. Debabeche & B.Achour (2003).

III 2.Canal rectangulaire (essais actuels pour $x \approx L_j$).

Cette partie de notre étude s'intéresse au ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince placé à une distance x environ égale à la longueur L_j , du ressaut (figure Les essais ont été effectués sous une large gamme de valeurs du nombre de tel que $1,5 < F_1 < 25$, mais nous limiterons delà de la valeur 9 du nombre de Froude considéré comme étant fort et le rapport Y des hauteurs conjuguées ne satisfait pas l'équation de Bélanger. Les valeurs mesurées de Y sont en effet inférieures à celles calculées et ceci peut être dû au changement des caractéristiques du ressaut et au frottement .Aux valeurs élevées de F_1 la répartition de la pression n'est plus hydrostatique notamment à l'aval du ressaut et la distribution de la vitesse n'est plus uniforme comme le suppose le développement théorique qui a servi de base à l'établissement de l'équation de Belanger, applicable au ressaut classique.

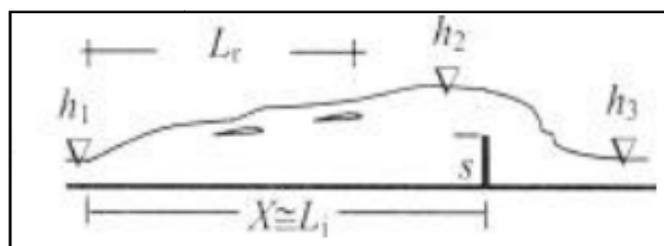


Figure (3.2) : contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour $X=L_j$

Dans la gamme de valeurs $3 < F1 < 9$, les essais n'ont montré aucun effet de frottement et le rapport $Y=h2/h1$ des hauteurs conjuguées peut donc être évalué par application de la relation :

$$Y = (1/2) [(1 + 8F1^2)^{1/2} - 1] \quad (3.4)$$

Dans un premier temps, notre étude s'est intéressée à la détermination de la hauteur relative $s/h1$ du seuil nécessaire à la formation du ressaut tel qu'il est représenté sur la figure (3.3) et pour la gamme pratique ci-dessus indiquée de $F1$. Les mesures expérimentales sont représentées graphiquement sur les figures (3.3) et (2.4) montrant respectivement la variation de $\xi (Y, s/h1) = 0$ et $\xi (F1, s/h1) = 0$. Ainsi, des courbes uniques sont obtenues et un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés a permis de corrélérer avec une excellente approximation les paramètres Y , $s/h1$ et $F1$:

$$Y = 2,37(s/h1)^{0.8} + 1, R^2 = 0,996 \quad (3.5)$$

$$s/h1 = 0,562(F1 - 1)^{1,225}, R^2 = 0,993 \quad (3.6)$$

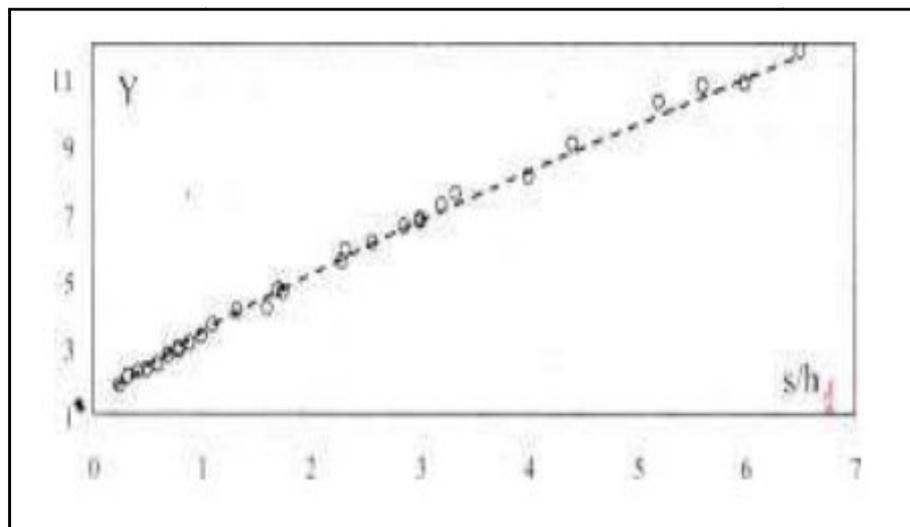


Figure (3.3): Variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de la hauteur relative $s/h1$ du seuil à paroi mince ($x \approx Lj$). (----) courbe tracée selon la relation (3.5).

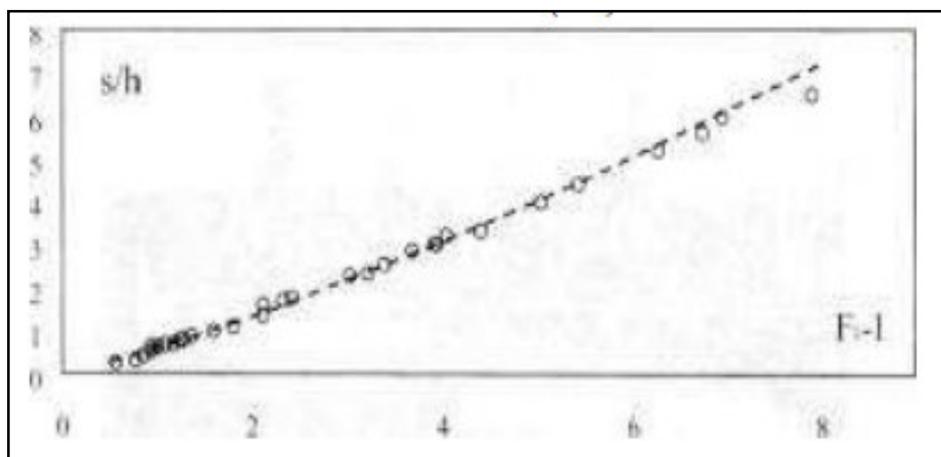


Figure (3.4): Variation expérimentale de la hauteur relative du seuil à parois mince s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident ($x \approx L_j$). (----) courbe tracée selon la relation (3.6). M. Debabeche & B.Achour (2003).

III.3 Canal rectangulaire (cas de compacité)

III.3.1 Introduction

Le déplacement du seuil vers l'amont ($L_j/x > 1$) provoque la compacité du ressaut, le facteur de compacité γ défini comme le rapport de la longueur du rouleau L_r^* (ou L_j^*) et de la position x du seuil.

III.3.2 Hauteur relative du seuil

La figure (3.5) montre la variation de la hauteur relative nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident

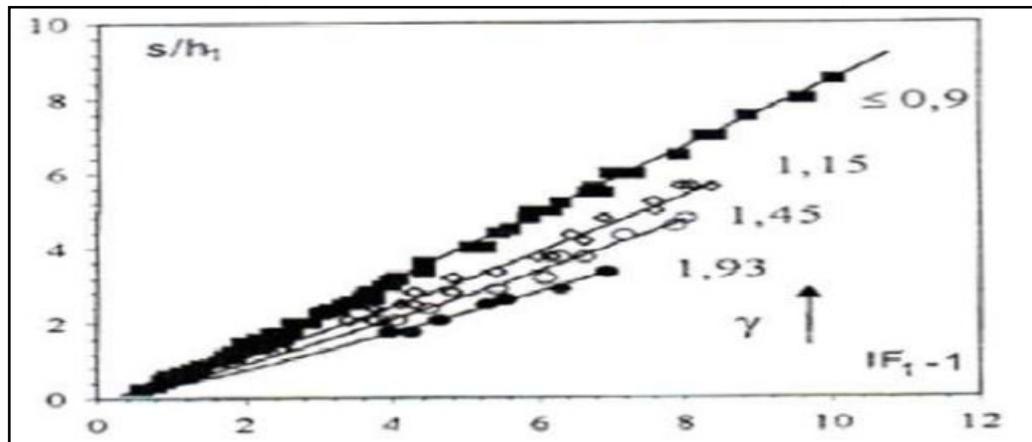


Figure (3.5) : Variation de s/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1 et pour différent de valeur du rapport moyenne de compacité γ : (■) 0,9, (◇) 1,15, (○) 1,45, (●) 1,93. (—) Courbes d'ajustements. Debabeche (2003),

La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que la relation $S = f(F_1)$ est quasi Par ailleurs-linéaire pour chaque configuration du ressaut.

Par ailleurs, pour une valeur donnée du nombre de Froude F_1 incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augment.

L'auteur a établi une autre relation linéaire traduisant la variation de s/h_1 en fonction de F_1 et de rapport γ de compacité :

$$S = (1,07 - 0,29 \gamma) \cdot (F_1 - 1) - 0,48 \quad \text{pour } 2,5 < F_1 < 12 \quad (3.7)$$

La représentation graphique des points de mesures de coordonnées $(F_1 - 1, \zeta(S, \gamma))$, ou $\zeta(S, \gamma) = (S + 0,48) / (1,07 - 0,29 \gamma)$ et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure (3.6).

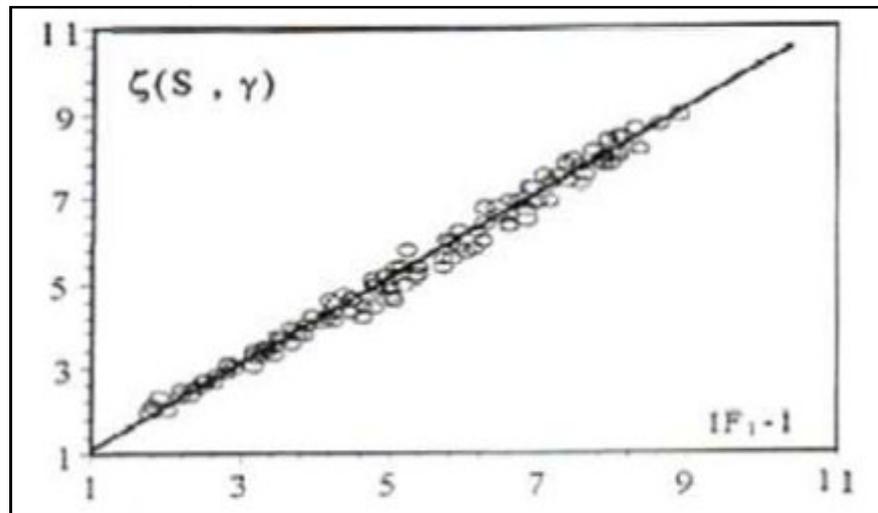


Figure (3.6): Variation de $\zeta(S, \gamma)$ en fonction de F_1-1 . (o) points expérimentaux. (—) Droite d'équation : $(S + 0,48) / (1,07 - 0,29 \gamma) = F_1-1$. Debabeche (2003).

III.4 Conclusion

Le chapitre précédent, a permis de présenter l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique en quelque type des canaux. Nous avons présenté dans un premier temps l'étude de M. Debabeche & B.Achour, cette étude se propose d'examiner, par la voie de l'expérimentation au laboratoire, l'influence d'un seuil sur les caractéristiques du ressaut hydraulique en canal de section droite symétrique triangulaire. Une étude comparative entre les caractéristiques du ressaut contrôlé et forcé par seuil. Nous avons présenté dans un second temps, une partie d'étude de M. Debabeche & B.Achour & A.Bedjoui & M. Khattoui, cette partie d'étude s'intéresse au ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince placé à une distance x environ égale à la longueur L_j , du ressaut dans un canal rectangulaire. Dans un troisième temps nous avons présenté, l'étude de Debabeche (2003), cette étude se propose d'examiner, par la voie de l'expérimentation au laboratoire, l'influence d'un seuil sur les caractéristiques du ressaut hydraulique en canal de section droite symétrique rectangulaire.

Deuxième Partie

ÉTUDE EXPERIMENTALE

Chapitre I :

Description du processus expérimentale

I. Description du processus expérimentale:

I.1.Introduction

Avant d'aborder les résultats expérimentaux, nous allons exposer une description détaillée du modèle expérimental, et faire la description des différents appareillages des mesures utilisées.

I.2.Description du dispositif :

. Nous disposons d'un canal d'essai qui se trouve au laboratoire d'hydraulique (**laboratoire LARGHYDE**), de l'université de **Biskra**. C'est un dispositif utilisé pour des essais d'envergure sur le thème de l'écoulement dans les canaux ouverts.

Ce dernier possède une section d'écoulement non rectangulaire d'une largeur de « **29.3 cm** » par « **7m** » de longueur avec un circuit d'eau fermé. Il est constitué d'une série de « **7** » panneaux transparent en verre permettant les prises de vue et observations. Ces panneaux sont reliés entre eux par collage au chloroforme. Le tout est fixé par boulonnage à une structure métallique rigide. L'étanchéité est assurée par des joints en caoutchouc et par la **silicone** Figure (1.1) et Figure (1.2).

Le fond est incliné transversalement d'une pente de $\frac{1}{3}$, Figure (1.3) et Figure (1.4). Un bassin d'alimentation Figure (1.5) et Figure (1.6), est relié à une pompe centrifuge Figure (1.7) et Figure (1.8). Celle-ci aspire de l'eau d'un réservoir ouvert de récupération et la refoule dans un bassin, également ouvert, alimentant le canal. Le système bassin de récupération-pompe-canal est relié par une conduite circulaire en PVC d'un diamètre de **115mm**.

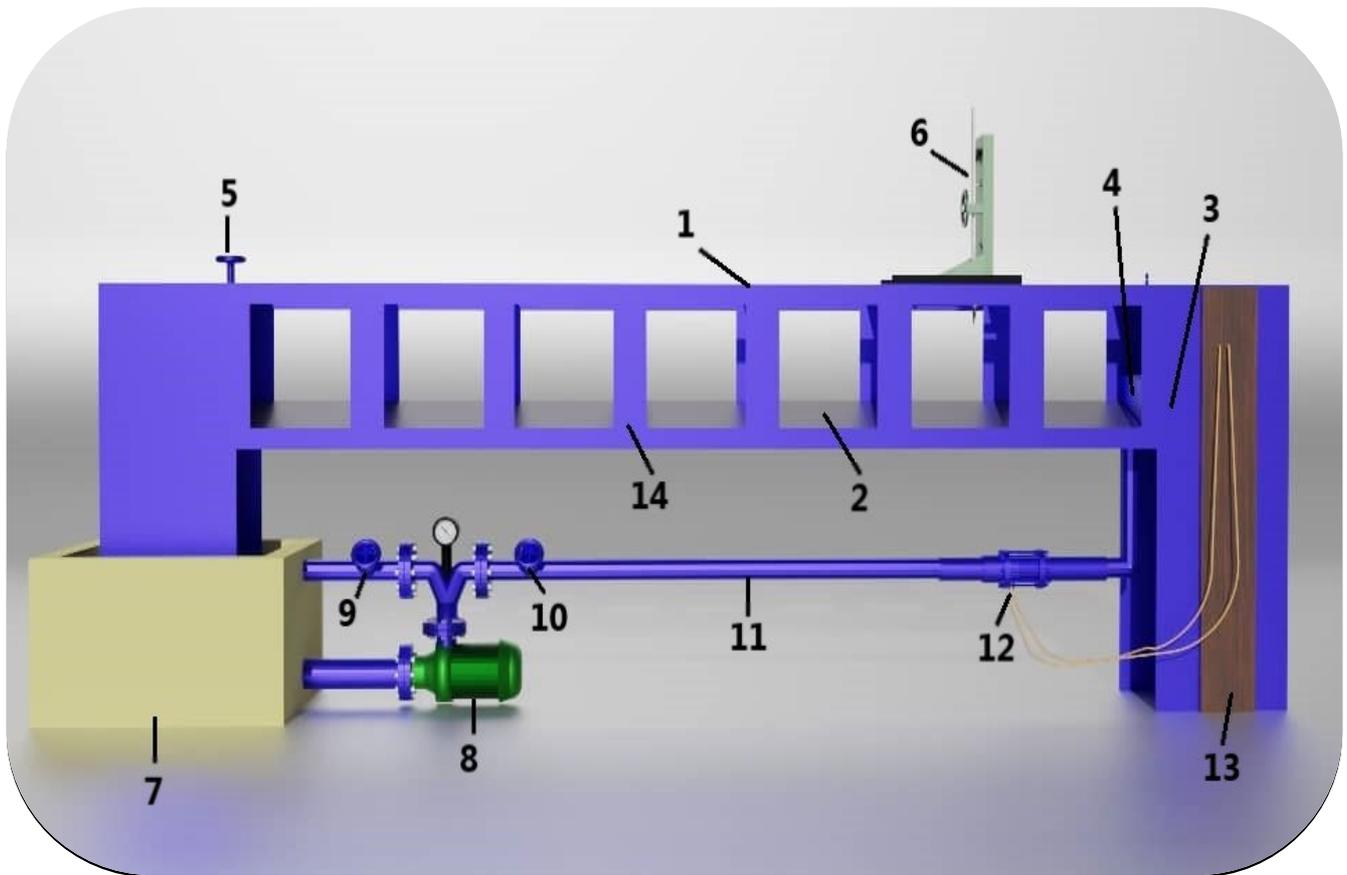


Figure (1.1): Schématisation 3D du modèle expérimentale du canal non rectangulaire.

La légende :

- | | |
|--|---|
| 1_Canal non rectangulaire de 7m ; | 2_Fond incliné du canal ($\frac{1}{3}$) |
| 3_Convergent triangulaire ; | 4_Vanne de fond mobile en amont ; |
| 5_Vanne levante en aval ; | 6_Limnimètre |
| 7_Bassin d'accumulation avec un tranquillisateur | 8_Pompe centrifuge axiale ; |
| 9_Vanne de régulation de débit | 10_Vanne de refoulement ; |
| 11_Conduite en PVC | 12_Diaphragme et Prise de pression |
| 13_Manomètre différentiel ; | 14_Baromètre |



Figure (1.2): Photographie du modèle expérimentale du canal non rectangulaire



Figure (1.1): Photographie du fond du canal non rectangulaire.



Figure (1.4): Photographie du bassin d'alimentation



Figure (1.5): Photographie de pompe centrifuge axiale.

Le canal non rectangulaire est relié, dans sa partie amont à une vanne réglable reliés à un convergent, l'ouverture est de forme trapézoïdale. La hauteur de l'ouverture se varie entre **8cm et 11cm**. Figure (1.6),

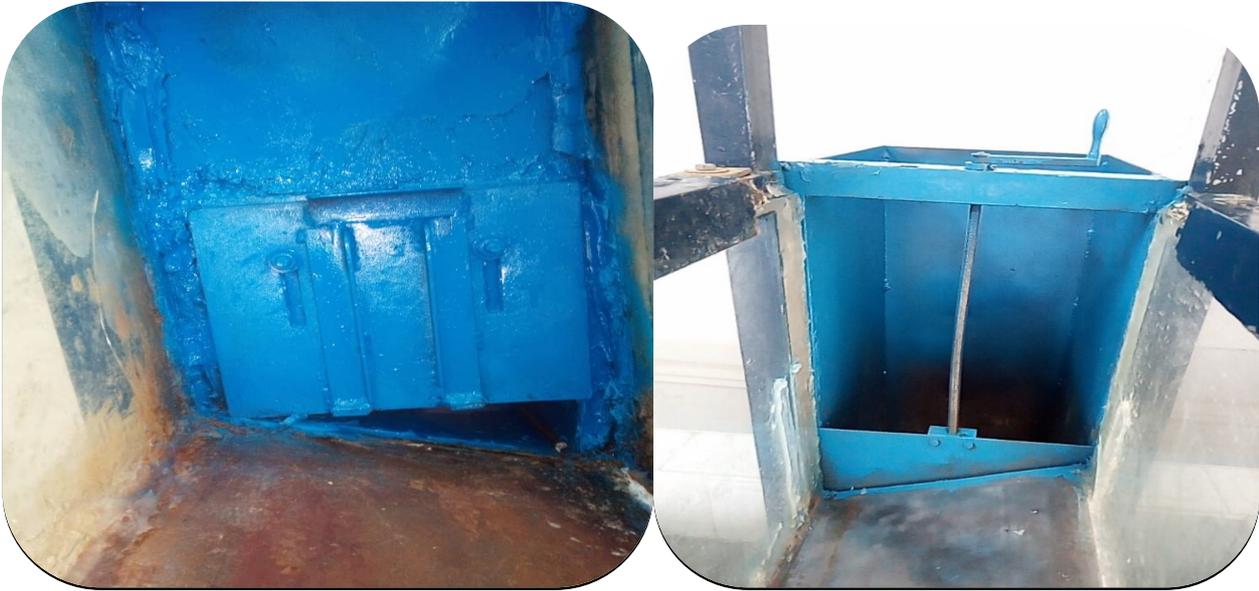


Figure (1.6): Photographie du convergent.

Le canal est relié dans sa partie aval à une vanne mobile métallique, le rôle de cette vanne est de régler la hauteur d'eau dans le canal et de positionner le ressaut hydraulique à l'abscisse voulue.



Figure (1.7): Vannes du régulations du débit

Le réglage des débits volume s'effectue par une deux vanne Figure (1.7)

I.3.Appareillage des mesures :

Afin de réaliser nos essais expérimentaux, un appareillage de mesures a été utilisé, dont un débitmètre à diaphragme, pour mesurer les différents débits pris, et un limnimétrie pour mesurer la hauteur de l'eau.

I.3.1 Mesure des débits :

Les débits ont été mesurés à l'aide d'un débitmètre à diaphragme, qui est considéré comme un dispositif destiné à la mesure des débits dans les conduites en charge.

Sur la conduite d'alimentation, un débitmètre à diaphragme a été installé Figure (1.15), ce dernier se compose de deux ménisques (a), qui sont reliés par deux tubes piézométriques (manomètre différentiel) et fixés sur un plan verticale, entre ces deux tubes une règle graduée a été fixée, afin de nous permettre de lire la différence de niveau Δh dans les tubes (b).

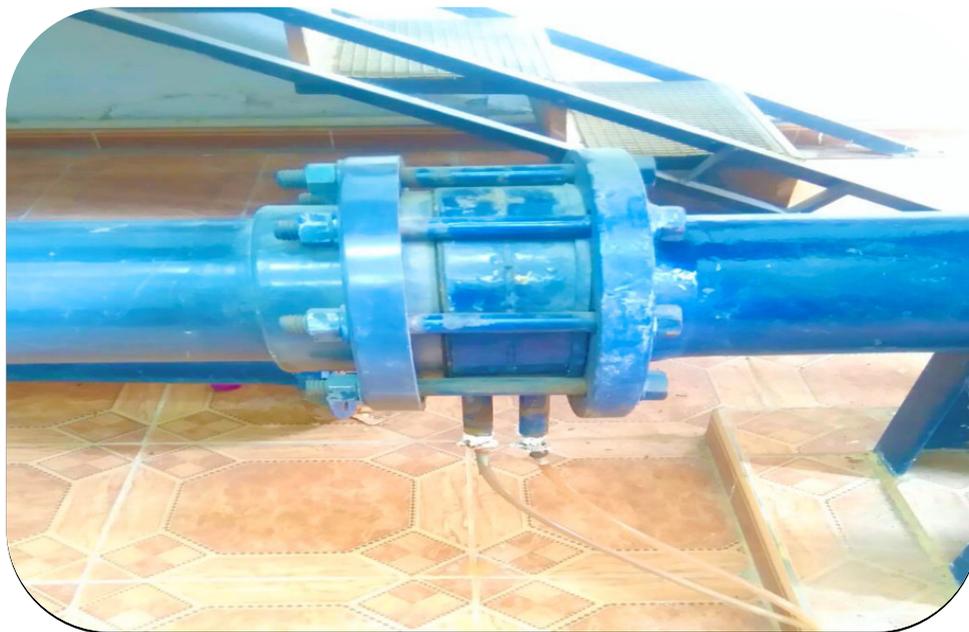


Figure (1.8): Débitmètre à diaphragme

I.3.1.1 Méthodologie de mesure de débit :

Les mesures de débit sont effectuées à deux étapes parallèles :

1_ Première étape : mesurer le débit volume par la méthode volumétrique (récipient et chronomètre).

2_ Deuxième étape : lire simultanément la différence « Δh » des côtes des deux ménisques dans les tubes manométriques, puis on augmente le débit par la vanne de régulation, et on répète la même procédure. Les résultats sont présentés et détaillés dans le tableau suivant :

Essais N°	Δh (cm)	Δh (m)	t_{moy} (s)	V (l)	V (m ³)	Q (l/s)	Q (m ³ /s)
1	0.6	0.006	20.52	33	0.033	1.608	0.001608
2	0.7	0.007	17.66	33	0.033	1.869	0.001869
3	1.4	0.014	13.41	33	0.033	2.461	0.002461
4	2.2	0.022	9.39	33	0.033	3.514	0.003514
5	4.1	0.041	8.56	33	0.033	3.855	0.003855
6	7.7	0.077	12.49	85	0.085	6.805	0.006805
7	11.4	0.114	11.99	85	0.085	7.089	0.007089
8	14.5	0.145	10.02	85	0.085	8.483	0.008483
9	19	0.19	10.48	100	0.1	9.542	0.009542
10	23.1	0.231	9.23	100	0.1	10.834	0.010834
11	31.1	0.311	8.41	100	0.1	11.981	0.011891
12	42.5	0.425	6.22	100	0.1	16.077	0.016077

Tableau (1.1): Valeurs des mesures du débit par l'étalonnage.

L'étalonnage du débitmètre a été effectué pour des débits volumes tel que : $1.608 \leq Q \leq 16.077$.

Ces considérations montrent que pour un diaphragme donné, le débit volume Q peut s'écrire $Q = a * \Delta h^b$, où a et b sont des constantes, en notant que cette dernière est théoriquement égale à

0.6 à chaque débit volume passant par le diaphragme correspond une différence de cotes Δh . Les débits volumes Q ont été mesurés par la méthode volumétrique.

Les couples des valeurs $(Q, \Delta h)$ obtenus ont fait l'objet d'un ajustement puissance par la méthode des moindres carrés non linéaire Figure (1.16).

La courbe d'étalonnage issue des mesures expérimentales répond à la formule :

$$Q = 0.02218 * \Delta h^{0.5082} \quad (1.1)$$

avec : * Q : Le débit en (m^3/s).

* Δh :La différence de niveau en(m).

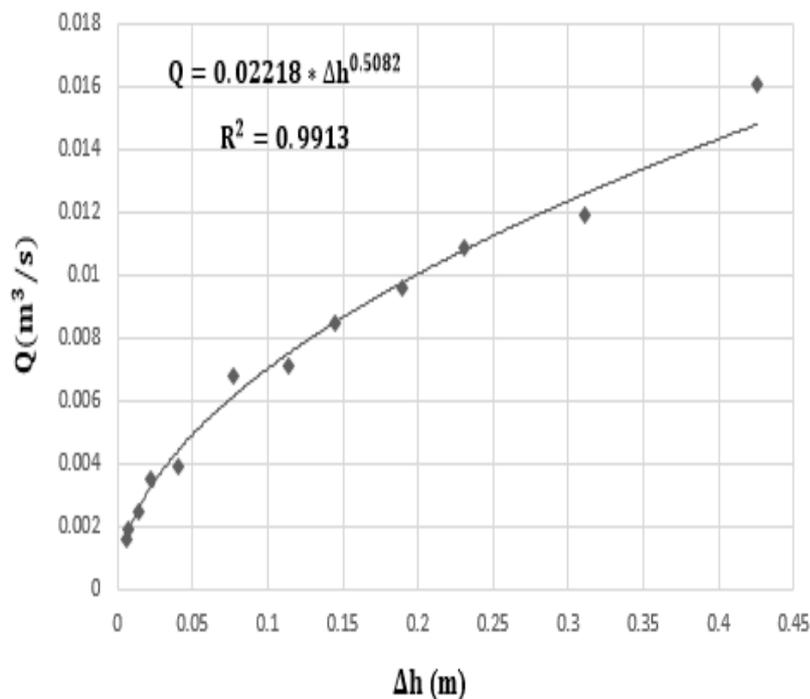


Figure (1.2): Courbe expérimentale de la relation en $Q(m^3/s)$ fonction de Δh (m).

Expérimentalement et dans le laboratoire : Nous ouvrons les deux vannes : la vanne de régulation de débit et la vanne de refoulement, sachant que la vanne de débit reste ouverte et celle de refoulement change d'instant (ouverture approximative). A l'aide du manomètre, on lit les hauteurs h_1 et h_2 , la différence entre elles présente Δh .

Le débit donc sera calculée à partir de l'équation (1.1), en remplaçant la valeur de Δh dans cette équation.

I.3.2. Mesure des hauteurs de la surface libre :

Comme nous l'avons souligné dans l'introduction, les profondeurs de la surface libre sont mesurées à l'aide d'un limnimétrie à vernier à double précision Figure (1.17), Figure (1.18).



Figure (1.3): Photographie du limnimétrie à vernier

I.3.2.1. Limnimétrie :

Le limnimétrie, Figure (1.17) est l'élément de base des dispositifs de lecture et d'enregistrement du niveau de l'eau ; l'instrument est formé d'une règle métallique profilée en « U » et graduée sur une seule face. Elle est munie, à sa partie inférieure d'une pointe verticale est appelée de pointe **limnométrique**, dont le rôle est d'effleurer la surface de l'eau.

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

La hauteur de l'eau sur le canal a été calculée par la relation suivante :

$$h = L \text{ surface libre} - L \text{ profondeur de l'eau}$$

Où,

h, Hauteur de la surface libre sur le canal en (mm) ;

L profondeur de l'eau, Lecture sur le limnimètre de la profondeur du canal ;

L surface libre, Lecture sur le limnimètre de la surface libre.

Vu que le canal d'étude est de forme non rectangulaire, cela signifie qu'il y a un côté plus profond et un autre moins profond, le limnimétrie a été placé au milieu du canal (entre les deux côtés).

Les mesures de la hauteur de la surface libre ont été prise sur plusieurs points (**1m,1.5m,2m,2.5m, 3m, 3.5m,4m, 4.5m, 5m, 5.5m, 6m**), le début du ressaut hydraulique a été toujours fixé à **2 m** en aval de la vanne en amont Figure (1.4):

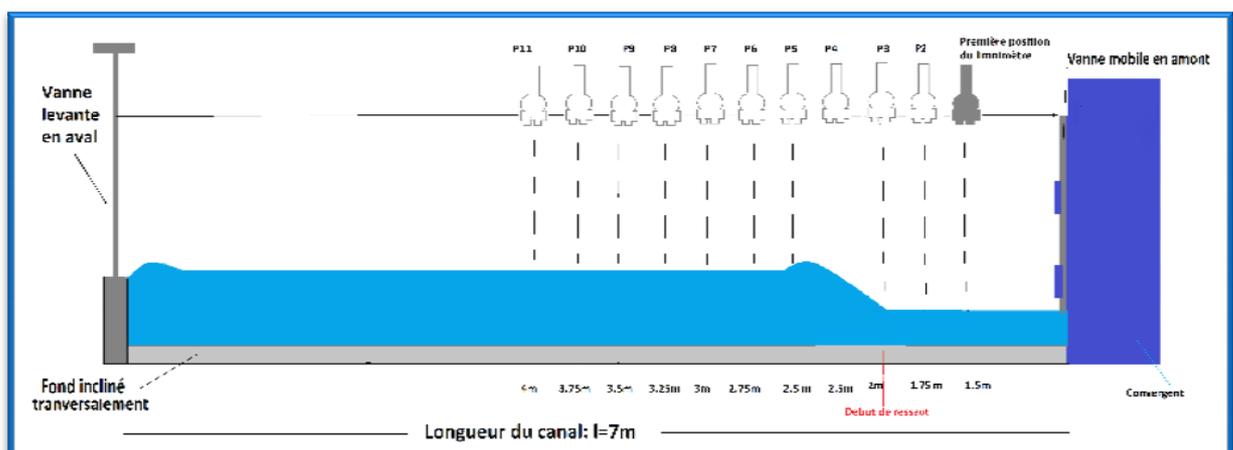


Figure (1.5): Positions du limnimétrie sur le canal non rectangulaire.

I.4.Conclusion :

Un dispositif expérimental permettant de mener les essais sur le ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire est expliqué dans ce chapitre.

Ce dernier a été consacré à la description du modèle expérimental, de l'appareillage de mesure utilisé et de la description des essais.

En premier lieu, on a présenté le modèle expérimental et son fonctionnement en détail, et l'aide des schémas et des photographies.

Chapitre II :

Etude expérimentale

II.1. Introduction :

Ce chapitre a pour déterminer expérimentalement le profil de la surface du ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire asymétrique pour différentes ouvertures. La formation du ressaut est conditionnée par la rotation de la vanne en aval du canal.

II.2.Procédure expérimentale :

L'objet de notre étude expérimentale est l'analyse, le ressaut hydraulique évoluant dans un canal non-rectangulaire asymétrique. L'expérimentation a été menée sur six ouvertures (**8cm, 8.5cm, 9cm, 9.5cm, 10cm,10.5cm**), figure (2.1), la formation du ressaut a été menée par quatre « 04 » débits par ouverture, une fois la position du ressaut obtenue on mesure les hauteurs à chaque position, figure (1.9).

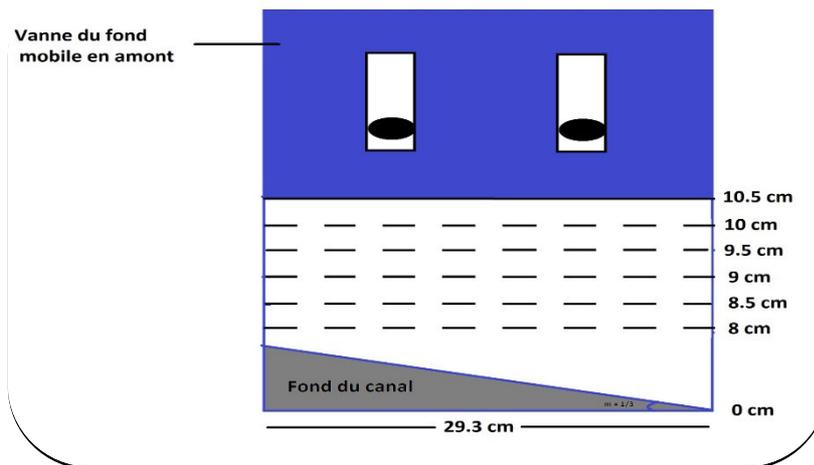


Figure (2.1) : Hauteur des ouvertures sur le canal non-rectangulaire

II.2.1.Variation de la hauteur h_1 en fonction du débit pour toute la gamme

Tableau (2.1) : Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h_1 = f(Q)$

Ouvertures	Débits (l/s)	h_1 (m)
8 cm	21	0,043
	22	0,044
	23	0,046
	24	0,048
8.5 cm	24	0,042
	25	0,0426
	26	0,044
	27	0,0455
9 cm	26	0,055
	28	0,05812
	30	0,06
	32	0,06548
9.5 cm	32	0,059
	33	0,063
	34	0,07
	35	0,074
10 cm	32	0,067
	33	0,069
	34	0,075
	35	0,079
10.5 cm	32	0,068
	33	0,07
	34	0,078
	35	0,08

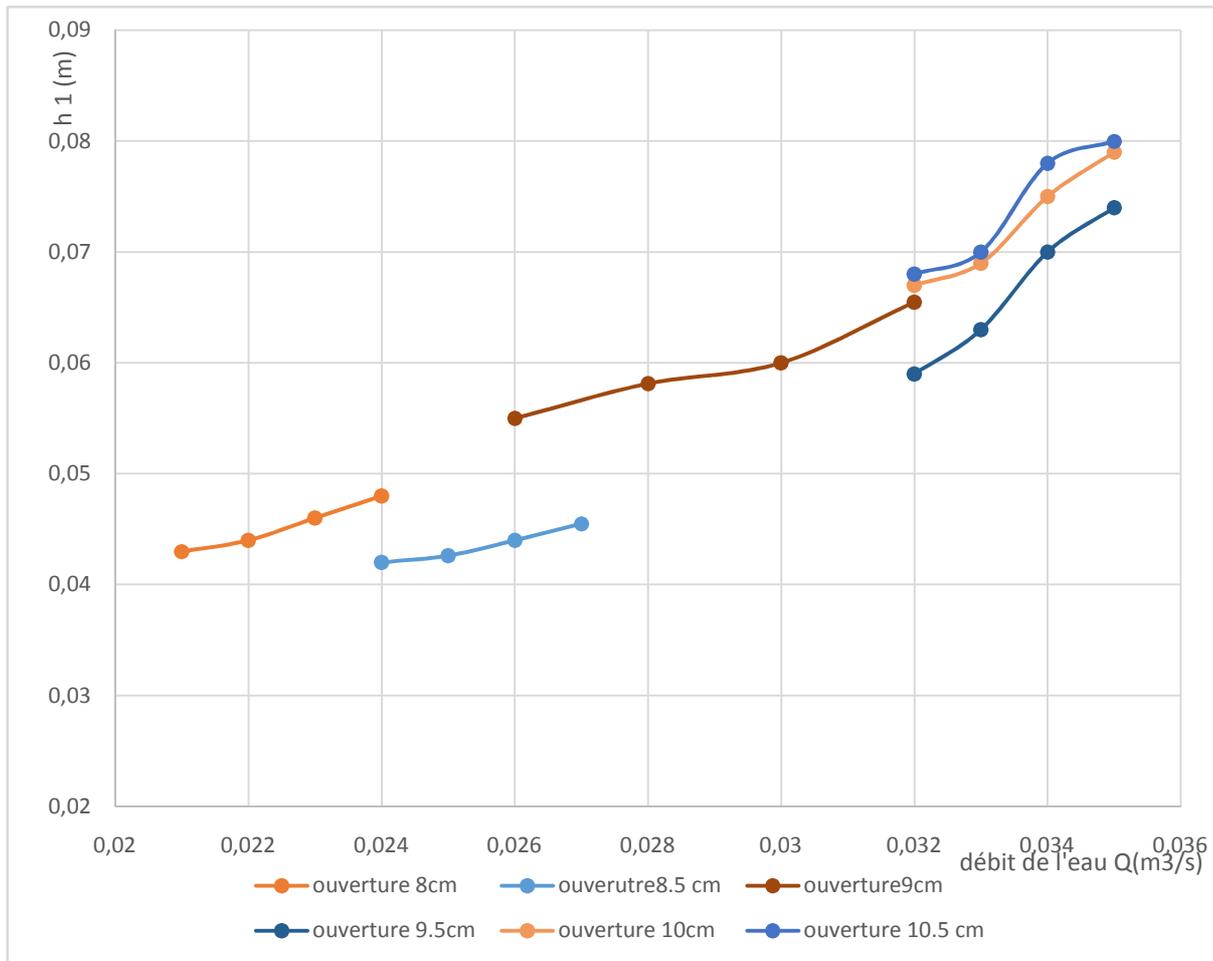


Figure (2.2): Variation de la hauteur h_1 en fonction du débit pour toute la gamme

La figure (2.2) représente les hauteurs de la surface libre au pied du ressaut hydraulique (h_1) soit les hauteurs initiales conjuguées en fonction du débit. On observe que pour chaque ouverture, les valeurs de h_1 mesurées augmentent avec l'augmentation du débit.

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la courbe $h_1 = f(Q)$ est donné par le tableau(2.1)

II.2.2. Variation de la hauteur h_2 en fonction du débit pour toute la gamme

Tableau (2.2) : Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h_2 = f(Q)$

Ouvertures	Débits (l/s)	h_2 (m)
8 cm	21	0,147
	22	0,151
	23	0,153
	24	0,157
8.5 cm	24	0,172
	25	0,17988
	26	0,18788
	27	0,193
9 cm	26	0,17588
	28	0,193
	30	0,20088
	32	0,21
9.5 cm	32	0,2
	33	0,22
	34	0,229
	35	0,25988
10 cm	32	0,192
	33	0,21388
	34	0,229
	35	0,242
10.5 cm	32	0,197
	33	0,228
	34	0,241
	35	0,261

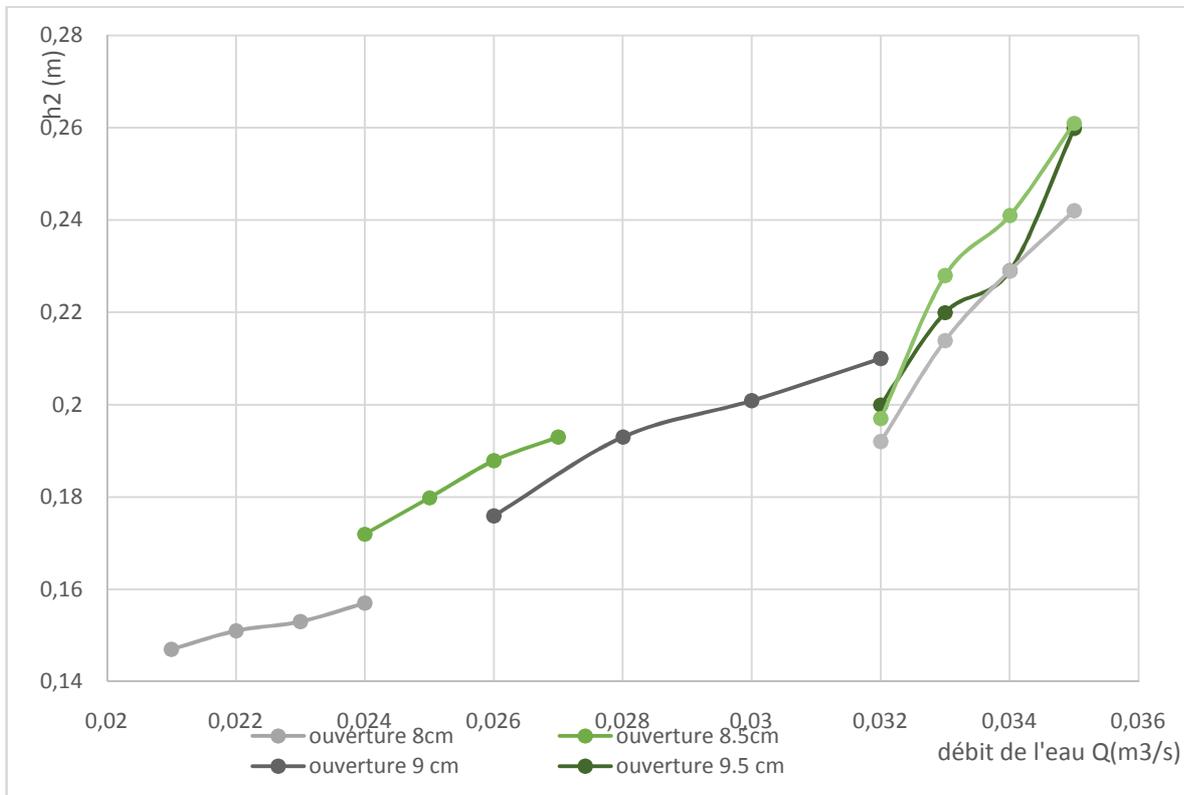


Figure (2.3): Variation de la hauteur h_2 en fonction du débit pour toute la gamme

La figure (2.3) représente les hauteurs de la surface libre h_2 (à la fin du ressaut) en fonction du débit, pour toute la gamme des ouvertures étudiées. On observe que pour chaque ouverture étudiée, la hauteur de l'eau à la fin du ressaut (h_2) s'accroît avec l'accroissement du débit.

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la courbe $h_2 = f(Q)$ est donné par le tableau(2.2)

II.2.3.Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de Froude :

A la base de l'analyse bibliographique, on peut conclure que le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire dépend en particulier du nombre de Froude F_1 .

La représentation graphique des résultats expérimentaux des paramètres de la fonction $Y = f(F_1)$ est donnée par la figure (...). Cette figure évoque la variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident F_1 .

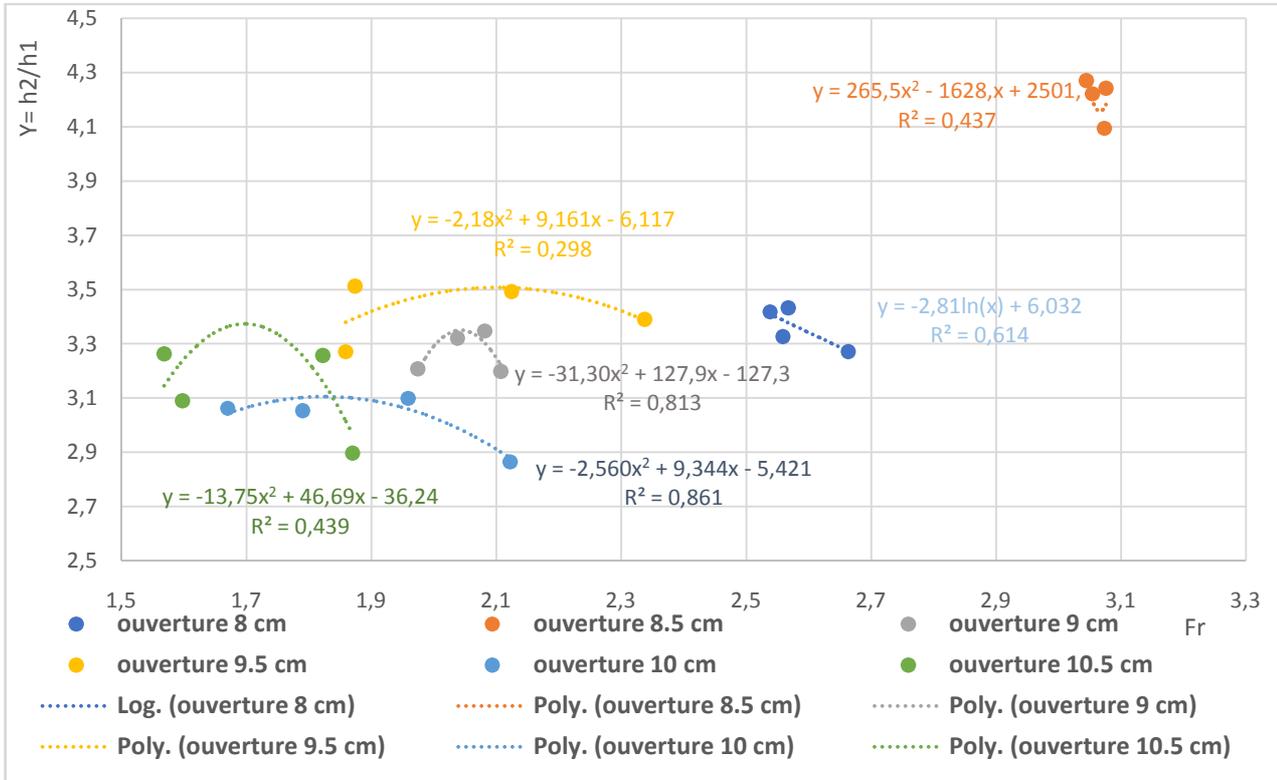


Figure (2.4) : Variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre du Froude F_1

La figure (2.4) montre que la variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude pour toutes les ouvertures.

L'analyse des résultats obtenus par notre étude expérimentales ont montré qu'il y a une 8 relations (pour 8 ouvertures) entre le rapport $Y = h_2/h_1$ du ressaut et le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident figure (2.4).

Pour l'ouverture 8 cm, l'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $Y = f(Fr)$ est logarithmique dont l'équation est donnée ci-dessous :

$$Y = -2,816 \ln(Fr) + 6,0323$$

Le coefficient de corrélation R^2 est 0,6147

Pour $2,53774 \leq F_1 \leq 2,663045$

Pour l'ouverture 8.5 cm, l'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $Y = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous :

$$Y = 265,55 Fr^2 - 1628,6 Fr + 2501,3$$

Le coefficient de corrélation R^2 est 0,4376

$$\text{Pour } 3,044791 \leq F1 \leq 3,076212$$

Pour l'ouverture 9 cm, l'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $Y = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous :

$$Y = -31,303 Fr^2 + 127,9Fr - 127,3$$

Le coefficient de corrélation R^2 est 0,813

$$\text{Pour } 1,974042 \leq F1 \leq 2,107163$$

Pour l'ouverture 9.5 cm, l'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $Y = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous :

$$Y = -2,18 Fr^2 + 9,1614Fr - 6,1177$$

Le coefficient de corrélation R^2 est 0,2981

$$\text{Pour } 1,858703 \leq F1 \leq 2,337564$$

Pour l'ouverture 10 cm, l'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $Y = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous :

$$Y = -2,5603 Fr^2 + 9,3447Fr - 5,4218$$

Le coefficient de corrélation R^2 est 0,8619

$$\text{Pour } 1,669176 \leq F1 \leq 2,121866$$

Pour l'ouverture 10.5 cm, l'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $Y = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous :

$$Y = -13,758 Fr^2 + 46,694 Fr - 36,246$$

Le coefficient de corrélation R^2 0,4395

$$\text{Pour } 1,567982 \leq F1 \leq 1,869133$$

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la courbe

$Y = f(F_1)$ est donné par le tableau(2.3) :

Tableau (2.3) : Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $Y = f(F_1)$

Ouvertures	Débits (l/s)	$Y = h_2/h_1$	F_1
8 cm	21	3,418605	2,53774
	22	3,431818	2,567502
	23	3,326087	2,558332
	24	3,270833	2,663045
8.5 cm	24	4,095238	3,073475
	25	4,222535	3,054606
	26	4,27	3,044791
	27	4,241758	3,076212
9 cm	26	3,197818	2,107163
	28	3,320716	2,037246
	30	3,348	2,081421
	32	3,207086	1,974042
9.5 cm	32	3,389831	2,337564
	33	3,492063	2,123826
	34	3,271429	1,858703
	35	3,511892	1,873421
10 cm	32	2,865672	2,121866
	33	3,09971	1,958513
	34	3,053333	1,789391
	35	3,063291	1,669176
10.5 cm	32	2,897059	1,869133
	33	3,257143	1,822148
	34	3,089744	1,597427
	35	3,2625	1,567982

Conclusion :

A travers ce chapitre nous avons étudié et analysé les résultats expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en canal trapézoïdale asymétrique.

En premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie pendant les essais. Passant en second temps aux résultats expérimentaux, quatre (04) débits ont été testés

en six(06)ouverture (**8cm, 8.5cm, 9cm, 9.5cm, 10cm, 10.5cm**). L'étude expérimentale s'intéressée à la variation des profondeurs conjuguées du ressaut hydraulique

CONCLUSION GENERAL

Conclusion général

Notre étude présente une analyse expérimentale du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique avec convergent triangulaire. L'étude a pour but de déterminer expérimentalement l'effet du seuil mince du ressaut hydraulique étudié. Cette étude se divise en deux grandes parties qui ont été nécessaires.

La première partie est la partie bibliographique qui se divise en trois chapitres :

-Le premier chapitre, en premier lieu est consacré au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire. On a commencé par l'équation de base, démontrée par Bélanger (1928) ; cette dernière est obtenue par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut classique, et elle exprime la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique, et le facteur adimensionnel connu par le nombre de Froude F_1 . La détermination de la valeur du nombre de Froude F_1 de l'écoulement à l'amont du ressaut hydraulique, a permis à Bradley et Peterka (1957), de donner les classifications des différentes formes du ressaut. A travers les études de Hager et al (1990), sur le ressaut hydraulique, les auteurs ont montré que l'estimation des caractéristiques géométriques du ressaut, telle que la longueur du ressaut L_j et la longueur L_r du rouleau, n'est possible que par la voie expérimentale. Le deuxième lieu a traité l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire (compacité du ressaut), nous examinerons les travaux les plus récents de Debabeche (2003) qui seront l'objet de base de notre étude bibliographique, sur le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal rectangulaire. Pour le ressaut forcé par seuil évoluant dans un canal rectangulaire, les travaux de Rand (1957) ont fait l'objet de notre étude bibliographique. L'auteur a élaboré une relation entre la hauteur du seuil et de sa position pour faire la classification du ressaut forcé en 10 cas typiques. A la base des résultats expérimentaux Rand (1965), a représenté, sur un diagramme, la relation entre la hauteur conjuguée et la fonction $f(S, K)$, où K est un facteur de position.

Le deuxième chapitre en premier lieu est consacré au ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique. Les caractéristiques du ressaut sont déterminées par les travaux entrepris par Silvester (1964) et Hager et Wanoschek (1989). Le cas du canal trapézoïdal est le plus général; par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut, nous avons déterminé la relation des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 , nous avons ensuite déduit le cas du canal rectangulaire et triangulaire. Même procédé pour la détermination du rendement du ressaut, mais pour ce cas nous avons eu recours au théorème de Bernoulli pour la détermination de la charge totale en amont et en aval du ressaut, et nous avons présenté la relation approchée de Hager et Sinniger (1985).

En deuxième lieu nous avons exposé les travaux relatifs au ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire. L'étude d'Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954) a été évoquée.

Cette étude a été consacrée à l'évaluation par la voie de l'expérimentation des caractéristiques de la longueur et la profondeur du ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire.

L'expérimentation s'est intéressée, également, à évaluer le transfert de la quantité du mouvement latéral. Un paramètre généralisé pour mesurer le retour de cette quantité de mouvement est le rapport de la force de pression plus le débit de la quantité de mouvement aval dans une large bande de l'unité à celle en amont de la transition. Alberto José Rodriguez-Diaz (1954) a montré que lorsque le ressaut hydraulique est formé, la valeur de ce paramètre ne dépasse pas 2,8. Dans un second temps les travaux de Chanson 2018 sur ce type de ressaut ont été présentés.

Le troisième chapitre de notre étude bibliographique, a eu pour but de présenter les principaux travaux sur l'effet du seuil en quelque types des canaux, on s'intéressée dans un premier temps l'influence du seuil dans un canal triangulaire et à travers cette étude nous avons présenté la variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 pour des différents types des ressauts (ressaut contrôlé par seuil à paroi mince et épaisse, ressaut forcé par seuil à paroi mince), dans le second temps nous avons examiné une partie d'étude de M. Debabeche & B.Achour & A.Bedjoui & M. Khattoui, cette étude a pour but de présenter graphiquement la variation expérimentale du rapport Y des hauteur conjuguées du ressaut en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil ainsi que la variation expérimentale de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 dans un canal rectangulaire pour $x \approx L_j$, en troisième lieu de notre second chapitre nous avons présenté l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire (compacité du ressaut) l'étude de Debabeche (2003).

La deuxième partie est la partie expérimentale qui se divise en deux chapitres :

Le premier chapitre a été consacré à la description du modèle expérimental, utilisé dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique. Une description détaillée de l'appareillage utilisé pour les essais.

Le deuxième chapitre a été consacré à la position du problème et à la description des essais et à l'analyse expérimentale des résultats obtenus

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIES.

Alberto, J., Rodriguez-D. (1954), The hydraulic jump in non rectangular open channel. Thesis of master of science in civil engineering. Faculty of the graduate division, Georgia institute of technologie.

Achour, B., Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire. Journal of Hydraulic Research 41(3), 319-325.

Achour B. Debabèche M. (2007). Effect of sill in a triangular channel, J. Hydr. Research, 45(1), 135-139.

Bradley, J. N., Peterka, A. J., (1957). The hydraulic design of stilling basins, Hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I), paper 1401; High dams, earth dams, and large canal structures (Basins II), paper 1402; short stilling basins for canal structures, small outlet works, and small spillways (Basin III), paper 1403; stilling basin and wave suppressors for canal structures, outlet works and diversion dams (Basin IV), paper 1404; stilling basin with sloping; apron (Basin V), paper 1405; small basins for pipe or open channel outlets no tailwater required (Basin VI), paper 1406, Proceedings, American Society of Civil Engineers, J. hydraulics division, vol. 83, No.HY5.

Belanger, J.B., (1828). Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes, Carilian-Goeury, Paris.

Chow V.T. Open channel hydraulics, Mc Graw-hill book company New York, 1959.

Carlier, M., (1980). Hydraulique Générale et Appliquée 1er édition.

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., Skrinde R.A. (1950). Control of hydraulic jump by sills, Trans. ASCE, 115, 973-1022.

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.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUES.

- Hager, W., Bremen R., H., et Kawogoshi N. (1990).* Classical hydraulic jump; length of roller, J. Hydraulic research 28(5), 591-608.
- Hager W.H., Li D. (1992).* Dissipateurs d'énergie contrôlés par seuil, J. Hydr. Research, 30(2), 165-181.
- Hager, W. H., Li, D., (1992).* Sill-controlled Energy Dissipator, J. Hydraulic research, vol.30, n°2,165-181.
- Hubert Chanson (2018)* Positive Surge Propagation in a Non-Rectangular Asymmetrical Channel, the University of Queensland.
- Hagain .A.(2016)* L'étude expérimentale de l'effet du seuil mince sur le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire.Mémoire de master.
- Mansri, N., (2006).* Ressaut Hydraulique Contrôlé par Marche Positive Dans un Canal Triangulaire, Mémoire de Magistère, Université de Biskra.
- Posey, C.J., Hsing, P.S. (1938).*The hydraulic jump in trapezoidal channel. Engineering News Record 121, 797-798.
- Rao N.S.G., Muralidhar D. (1963).* Discharge characteristics of weirs of limit crest width, La houille Blanche, Vol. 18,537-545.
- Rand W., (1957).* An approach to generalized design of stilling basin. Trans. New York academy of Sciences. 1957. 20(2), 173-191.
- Rajaratnam, N., (1964),* Discussion to Silvester (1964) Journal of Hydraulic Division, ASCE 90(HY4), 341-350.
- Rajaratnam, N., (1967).* Hydraulique jumps, Advances in hydroscience, 4: 197-280, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York, N.Y.
- Rao N.S.G., Muralidhar D. (1963).* Discharge characteristics of weirs of limit crest width, La houille Blanche, Vol. 18,537-545.
- Rand W., (1957).* An approach to generalized design of stilling basin. Trans. New York academy of Sciences. 1957. 20(2), 173-191.
- Silvester, R. (1964).* Hydraulics Jump in all Shapes of Horizontal Channels, Proc.ASCE, J. Hydr.Divi., 90, 23-55.é
- Said. R (2018)* ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal brusquement élargie Mémoire de doctorat, département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIES.

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

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

LISTE DES FIGURES

Première partie

Chapitre I :

Figure 1.1 : Description du ressaut	2
Figure 1.2 : Ressaut nodule	3
Figure 1.3 : Le Pré-ressaut	3
Figure (1.4) : Le ressaut de transition.....	4
Figure 1.5 : Le ressaut stable	4
Figure 1.6 : Ressaut agité	4
Figure 1.7 : Schéma d'un ressaut classique.....	7
Figure 1.8 : hauteur du ressaut (<i>Hager et al 1990</i>).....	7
Figure 1.9 : Aspect du ressaut classique. a) rouleau développé. b) rouleau non développé	7
Figure 1.10 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbe tracée selon la relation (2.9). (---) Courbe Tracée selon la relation.....	9
Figure 1.11 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.....	10
Figure 1.12 : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince pour quelques valeurs de x/h_2 , selon Forster et Skrinde (1950).....	10
Figure 1.13 : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.....	11
Figure 1.14 : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation.....	12
<u>Chapitre II</u>	
Figure 2.1 : hauteur conjuguées $Y=h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M=mh_1/b$	16

LISTE DES FIGURES

Figure 2.2 :Hauteur conjuguais $Y = h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M = mh_1/b$, (—) équation : (2.4) ; (...) $M=0$; (▼) $M=0.1$; (■) $M=0.2$;(▲) $M=0.3$;(.) $M=0.4$; (---) $M=\infty$	17
Figure 2.3 : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale.....	19
Figure 2.4 :Schéma de définition du ressaut hydraulique.....	19
Figure 2.5 : Représentation graphique de la relation (3.12) du rendement η en fonction nombre de Froude F_1 . $M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire = 0 : Cas du canal rectangulaire.....	21
Figure 2.6 :Section transversale du canal.....	22
Figure 2.7 : Section de la bande longitudinale.....	24
Figure 2.8 : Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté profond	26
Figure 2.9 : Diagramme adimensionnel du taux de changement de M sur le côté peu profond	26
Figure 2.10 : Schéma général d'écoulement.	27
Figure 2.11 : Modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la propagation positive du ressaut dans un canal composé prismatique ($d1/D < 1$	29
Figure 2.12 :Modèle de la section transversale du canal - A gauche: en regardant vers l'amont.....	30
Figure 2.13 : Photographie de l'installation expérimentale en aval.....	31
 <u>Chapitre III</u>	
Figure 3.1 : Variation expérimentale la hauteur relative $S=s/h$ Froude F_1 , pour un ressaut évoluant dans un canal triangulaire Points. Expérimentaux pour $m=1$:(o) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (•) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épais. (Δ) ressaut forcé par seuil à paroi mince.....	34
Figure 3.2 :contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour $X=Lj$	34

LISTE DES FIGURES

Figure 3.3: Variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince ($x \approx L_j$). (----) courbe tracée selon la relation (3.5)..... 35

Figure 3.4: Variation expérimentale de la hauteur relative du seuil à parois mince s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident ($x \approx L_j$). (----) courbe tracée selon la relation (3.6)..... 36

Figure 3.5 : Variation de s/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1 et pour différent de valeur du rapport moyenne de compacité γ :: (■) 0,9, (◇) 1,15, (o) 1,45, (●) 1,93. (—) Courbes d'ajustements..... 37

Figure 3.6: Variation de $\zeta(S, \gamma)$ en fonction de F_1-1 . (o) points expérimentaux. Droite d'équation : $(S + 0,48)/(1,07 - 0,29 \gamma) = F_1-1$ 38

Deuxième partie

Chapitre I :

Figure 1.1: Schématisation 3D du modèle expérimentale du canal non rectangulaire... 42

Figure 1.2: Photographie du modèle expérimentale du canal non rectangulaire..... 43

Figure 1.3: Photographie du fond du canal non rectangulaire..... 43

Figure 1.4 : Photographie du bassin d'alimentation..... 44

Figure (1.5): Photographie de pompe centrifuge axiale..... 44

Figure (1.6): Photographie du convergent..... 45

Figure (1.7): Vannes du régulations du débit..... 45

Figure (1.8): Débitmètre à diaphragme..... 46

Figure (1.6): Photographie du limnimétrie à vernier..... 49

Figure (1.7): Positions du limnimétrie sur le canal non rectangulaire..... 50

Chapitre II

Figure (2.2) : Hauteur des ouvertures sur le canal non-rectangulaire..... 52

Figure (2.2): Variation de la hauteur h_1 en fonction du débit pour toute la gamme..... 54

LISTE DES FIGURES

Figure (2.3): Variation de la hauteur h_2 en fonction du débit pour toute la gamme..... 56

Figure (2.4) : Variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre du Froude F_1 57

PRINCIPALES NOTATIONS

PRINCIPALES NOTATIONS

A1	L'aire de la section mouillée initiale	[m ²]
A2	L'aire de la section mouillée finale	[m ²]
A(x)	L'aire de la section mouillée correspondant à x	[m ²]
b1	Base du canal trapézoïdal en amont	[m]
F1	Nombre de Froude incident	[-]
P1	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	[N]
P2	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	[N]
G	Accélération de la pesanteur	[m.s ⁻²]
h1	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h2	Hauteur finale du ressaut	[m]
h2*	Hauteur finale du ressaut classique rectangulaire	[m]
h(x)	Profondeur de l'eau à la distance x du pied du ressaut	[m]
hb	Hauteur maximale du rouleau de fond	[m]
k	Coefficient de correction du volume du ressaut	[-]
Lr	Longueur du rouleau	[m]
Lj	Longueur du ressaut	[m]
Lr*	Longueur du rouleau classique rectangulaire	[m]
Lj*	Longueur du ressaut classique rectangulaire	[m]
Lu	La distance du pied du ressaut au début du rouleau de fond	[m]
Lb	Longueur du rouleau de fond	[m]
m	Cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale	[-]
M1	Coefficient de forme	[-]
Q	Débit volume	[m ³ .s ⁻¹]

PRINCIPALES NOTATIONS

Re	Nombre de Reynolds	[-]
Rh	Rayon hydraulique correspondant au profil triangulaire	[-]
s	Hauteur du seuil	[m]
S	Hauteur relative du seuil	[-]
Sf	Gradient de perte de charge	[-]
W _x	Force de frottement agissant sur le volume de liquide	[N]
V	Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiale et finale	[m ³]
v ₁	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m.s ⁻¹]
v ₂	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	[m.s ⁻¹]
x	Position de seuil	[m]
X	Position relative de seuil	[-]
Y*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
Y _s	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil	[-]
v	Viscosité cinématique	[m ² .s ⁻¹]
λ _j	Longueur relative du ressaut	[-]
λ _r	Longueur relative du rouleau	[-]
λ _b	Longueur relative du rouleau de fond	[-]
λ _u	Longueur relative du distance d'approche	[-]
ω	Poids spécifique du liquide	[N.m ⁻³]
ρ	Masse volumique du liquide	[kg.m ⁻³]
η	Rendement du ressaut	[-]