

Université Mohamed khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique
Référence :...../ 2018

جامعة محمد خيضر- بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع:...../ 2018



Mémoire de Master

2^{ème} année

Spécialité : Hydraulique

Option : Hydraulique urbaine

Thème :

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EFFET DU SEUIL MINCE SUR LES
CARACTERISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL
TRAPEZOIDAL ASYMETRIQUE A CONVERGENT TRIANGULAIRE.

Etudiante :Khebli Abdeslam

Encadreur :Cherhabil Sonia

Promotion: Juin 2019



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, sans oublier de remercier **Sadrati Walid** qui nous a aidé
beaucoup dans la restauration du canal.*

*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.

Dédicace

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 Hocine

Et

A mon grand-père Ahmed

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 Zohra

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

*À mes frères et sœurs A ceux que j'aime beaucoup, mes amis les plus chères **abdellah, Badis, Soufiane, Ayoub, Hocine, Sadik, Aymen** et a tous les gens qui connaît **Khebli abdeslam**.*

À toute ma famille

À toute la promotion de 2ème année master 2018/2019

Résumé

Cette étude se propose d'examiner, par la voie de l'expérimentation au laboratoire, l'effet du seuil mince sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique.

Deux parties se sont avérées nécessaires: une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine ; une seconde partie à caractère expérimental a permis d'obtenir avec de bonnes corrélations des relations empiriques, montrant l'effet du seuil sur les caractéristiques de ce type de ressaut.

Mots clés : ressaut hydraulique, canal trapézoïdal asymétrique, seuil mince, Bassin de dissipation.

ملخص

هذه الدراسة تقترح فحص بالطريقة التجريبية في المختبر لتأثير العتبة على خصائص القفزة المائية داخل قناة مفتوحة شبه منحرفة الشكل غير متمائل.

جزئت هذه الدراسة إلى قسمين : يختص القسم الأول بالأبحاث المتعلقة بالأعمال المنجزة في هذا المجال أما القسم الثاني ذو طابع تجريبي حيث سمح لنا بإيجاد علاقات تجريبية جيدة تظهر اثر العتبة على خصائص القفزة المائية المعادلات التي تم الحصول عليها هي بدون أبعاد و ذلك لاستعمالها في الواقع

الكلمات المفتاحية : القفزة المائية - قناة شبه منحرف غير متناظرة - عتبة رقيقة - حوض التبديد.

SOMMAIRE

Introduction général

Première Partie

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction a la première partie..... 1

Chapitre I

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

I.1.Introduction..... 2

I.2.Définition..... 2

I.3. Ressaut hydraulique classique..... 3

I.4. Classification du ressaut classique..... 3

I.5. Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut..... 4

I.6. Caractéristique géométriques du ressaut..... 7

I.6.1. Hauteur du ressaut..... 7

I.6.2. Longueur du rouleau..... 7

I.6.3. Longueur du ressaut..... 8

I.6.4. Rendement du ressaut..... 9

I.7. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire..... 12

I.7.1. Approche de Forster et Skrinde (1950)..... 12

I.7.1.1. Seuil continue à paroi mince..... 12

I.7.1.2. Seuil continue à paroi épaisse..... 13

I.8. Ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire..... 15

I.8.1. Approche de Rand (1957)..... 15

I.9. Conclusion..... 18

Chapitre II

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOÏDAL.

Partie 1 : Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique

II.1.1 Introduction.....	19
II.1.2 Caractéristique du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal.....	19
II.1.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	19
II.1.2.2. Longueur du ressaut.....	22
II.1.2.3. Perte de charge relative du ressaut hydraulique.....	23
II.1.2.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire.....	24
II.1.2.3.2 Cas particulier du canal triangulaire.....	24
II.1.3 Conclusion.....	25

Partie II : Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique

II.2.1 Approche d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954	26
II.2.1.1 Analyse de la section totale.....	27
II.2.1.2 Analyse de bande longitudinale (volume de contrôle).....	28
II.2.1.3 Discussion des résultats.....	31
II.2.2 Approche d'Hubert Chanson.....	33
II.2.2.1. Propagation positive de ressaut dans un type non rectangulaire (Canal asymétrique).....	33
II.2.2.2 Installation expérimentale.....	35
II.2.3 Conclusion.....	36

Chapitre III

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

III.1. Introduction.....	37
III 2. Canal triangulaire.....	37
III 2.1. Introduction.....	37

III.2.2 Hauteur relative du seuil.....	37
III.3. Canal rectangulaire (essais actuels pour $X \approx L_j$).....	38
III.4. Canal rectangulaire (cas de compacité).....	40
III.4.1 Introduction.....	40
III.4.2 Hauteur relative du seuil.....	40
III.5. Conclusion.....	41
Conclusion a la première partie.....	43

Deuxième Partie

ÉTUDE EXPERIMENTALE

Introduction de la deuxième partie.....	45
---	----

Chapitre I

DESCRIPTION DU MODELE.

I.1. Introduction.....	46
I.2. Description du canal.....	46
I.3. Seuils mince.....	50
I.4 Appareillage de mesures.....	51
I.4.1limnimètre (Mesure des hauteurs).....	51
I.4.2. Débitmètre à diaphragme.....	52
I.4.2.1 Technique de mesure de débit.....	53
I.4.1.2 Vérification de la validité de la relation (1.1).....	54
I.5 Conclusion.....	54

ChapitreII

ETUDE EXPERIMENTALE

II.1. Introduction.....	55
-------------------------	----

II.2 Position de problème.....	55
II.3 Procédure expérimentale.....	55
II.4. Analyse des résultats expérimentaux.....	57
II.4.1. Etude expérimentale de l'effet du seuil mince du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique.....	57
II.4.1.1. Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident (au niveau du centre du canal).....	57
II.4.1.2. Variation de la Position relative du seuil $X= x/h_2$ en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident (au niveau du Centre du canal).....	62
II.4.1.3. Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident (coté plus profond du canal).....	67
II.5 Conclusion.....	71
Conclusion a la deuxième partie.....	72

Conclusion général

LISTE DES FIGURE

LISTE DES PHOTOGRAPHIE

LISTE DES TABLEAU

NOTATION PRINCIPAL

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

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 :

-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 notre étude sera, cependant, entièrement consacrée à notre propre contribution dans l'étude du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique, en examinant l'influence du paramètre seuil sur les autres caractéristiques. L'étude sera abordée d'une manière expérimentale.

Première partie :

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction à la première partie

Cette partie de notre étude bibliographique a pour but principal, de passer en revue les travaux les plus intéressants, ayant abordé le ressaut hydraulique en canal rectangulaire, trapézoïdal et trapézoïdal asymétrique.

Cette partie est scindée en trois chapitres.

- Le premier chapitre. En premier lieu, définir les caractéristiques du ressaut hydraulique classique, évoluant en canal de section droite rectangulaire, de pente faible ou nulle, où nous avons présenté l'équation de Bélanger (1828), qui donne la relation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident. Ainsi les travaux de Hager et al (1990) et ceux de Hager et Sinniger (1986) font l'objet de la détermination des caractéristiques géométriques du ressaut. En deuxième lieu, nous avons abordé l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique, à travers les travaux de Forster et Skrinde (1950). En troisième lieu, nous avons cité les travaux de Rand (1957) concernant le ressaut hydraulique forcé par seuil.
- Le deuxième chapitre sera consacré aux travaux effectués par Wanoschek et Hager (1989), Posey et Hsing (1938) et Silvester (1964) sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal et les travaux de Chanson (2018), d'Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954), sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique.
- Le troisième chapitre sera consacré aux travaux effectués par Debabeche & B.Achour & A.Bedjaoui & M. Khattoui et M. Debabeche (2003), M. Debabeche & B.Achour (2001), sur l'effet du seuil en quelques types de canaux,

Chapitre I :

*RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN
CANAL RECTANGULAIRE.*

Chapitre I:

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire.

I.1. Introduction

Le ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire a été pendant plusieurs années le profil le plus souvent utilisé dans la pratique. La facilité de la mise en œuvre de ce profil a encouragé les chercheurs à intensifier les recherches expérimentales qui ont conduit sans aucun doute à une meilleure compréhension du phénomène, tant du point de vue de sa structure interne que de son comportement externe.

I.2. Définition

Le **ressaut hydraulique** est un phénomène couramment observé lors d'écoulement hydrauliques ouverts 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. (Figure 1.1).

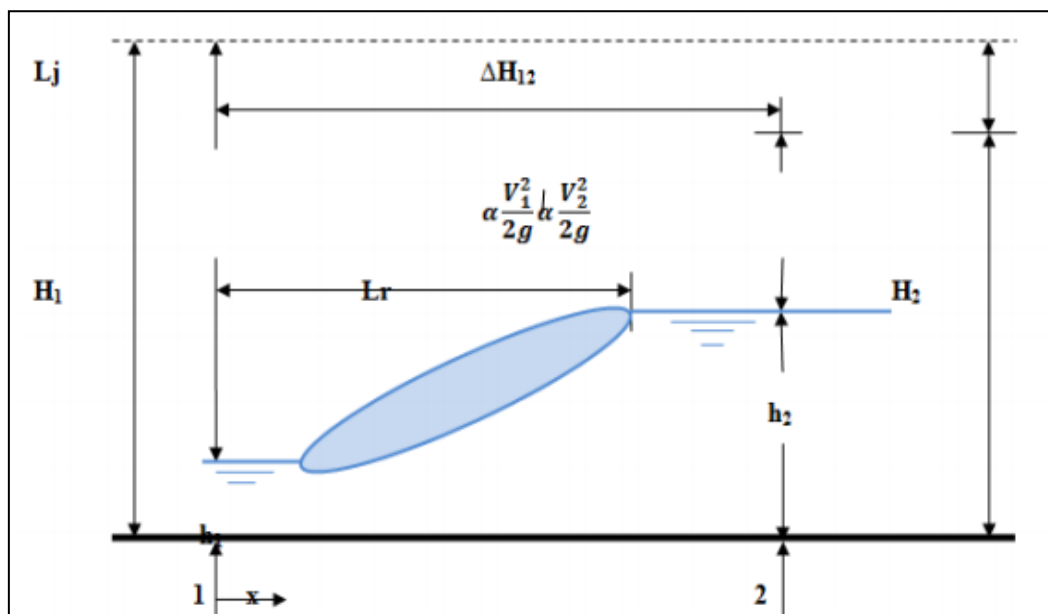


Figure (1.1) : ressaut hydraulique.

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

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ces sections initiales et finales à la charge totale dans sa section initiale. L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un coefficient cinétique (ou nombre de Froude $Fr_1 > 1$) et représente la relation entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation des petites perturbations.

I.3. Ressaut hydraulique classique

Le ressaut classique est défini comme la transition d'un écoulement torrentiel à un écoulement fluvial dans un canal prismatique presque horizontal de section rectangulaire sans obstacle ni chicane.

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

1.4 Classification du ressaut classique

Selon la valeur du nombre de Froude amont, $F_1 = \frac{v_1}{(gh_1)^{1/2}}$, un ressaut peut correspondre à différents type d'écoulement. La figure (1.2) permet d'établir une classification selon l'allure générale de la surface libre.

Pour $1 < F_1 < 1,7$, un ressaut ondulé apparaît. La transition entre l'écoulement torrentiel et l'écoulement fluvial est graduellement variée, les pertes de charge étant essentiellement dues au frottement sur les parois du canal. (Chow 1959).

Pour $1,7 < F_1 < 2,5$, l'apparition du ressaut est encore ondulé, mais avec des zones de séparation à la surface. La dissipation d'énergie est encore faible et c'est la raison pour laquelle le domaine $1 < F_1 < 2,5$ est normalement exclu pour les ressauts hydrauliques proprement dits. (Bradly et Peterka 1957).

Pour $2,5 < F_1 < 4,5$, le ressaut oscillant se présente sous la forme typique. Pourtant le domaine l'application du ressaut dans les constructions hydraulique se situé entre $3,7 < F_1 < 9$. Pour $F_1 > 9$ le ressaut est si fort qu'il devient presque impossible de protéger le dissipateur contre les force libérées. De plus, l'écoulement prend plutôt l'allure de mousse que l'eau, tant l'entraînement d'air est important. Finalement, une forte ondulation de la surface se manifeste à Laval du ressaut (peterka1983)

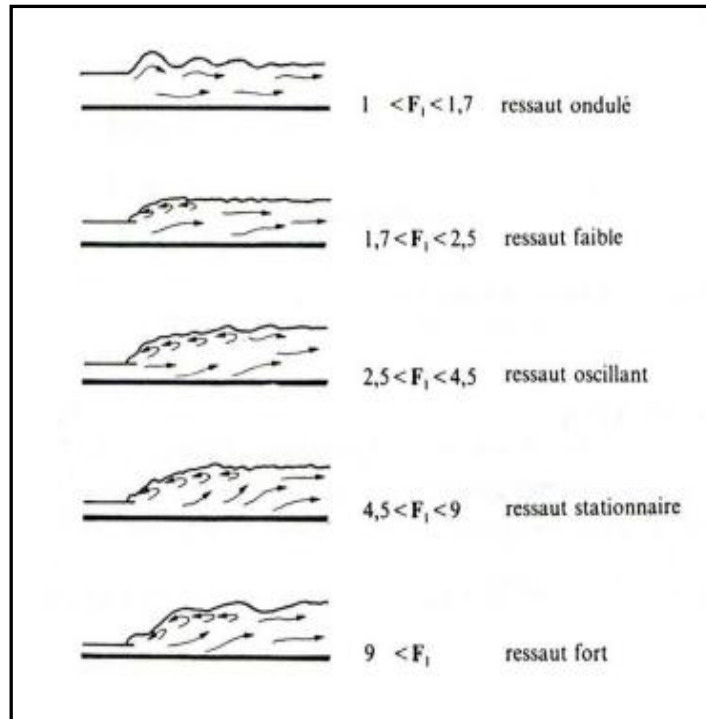


Figure (1.2) : Type de ressaut hydraulique plan pour divers domaine du nombre de Froude F_1 (Chow 1959).

I.5. Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut

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

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

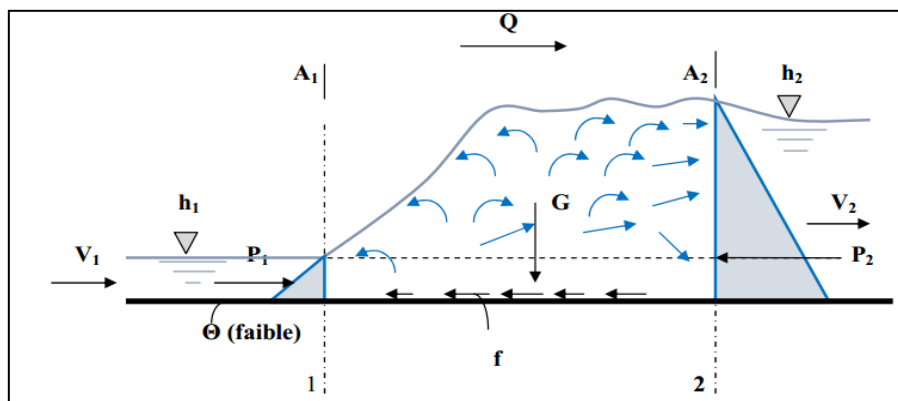


Figure (1.3) : Représentation des forces agissantes sur le ressaut.

$$L'équation de continuité perm et d'écrire : $V_1 = \frac{Q}{A_1}$ (1.1)$$

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

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

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

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

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

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

Ou :

β : facteur de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité Puisque la répartition des vitesses est supposée uniforme.

p : la masse volumique du liquide en mouvement.

Q : débit volume.

V : vitesse d'écoulement.

g : accélération de la pesanteur.

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

P_1 et P_2 : forces des pressions hydrostatiques.

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

f : force de frottement (considérée comme négligeable).

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

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

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

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

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

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

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

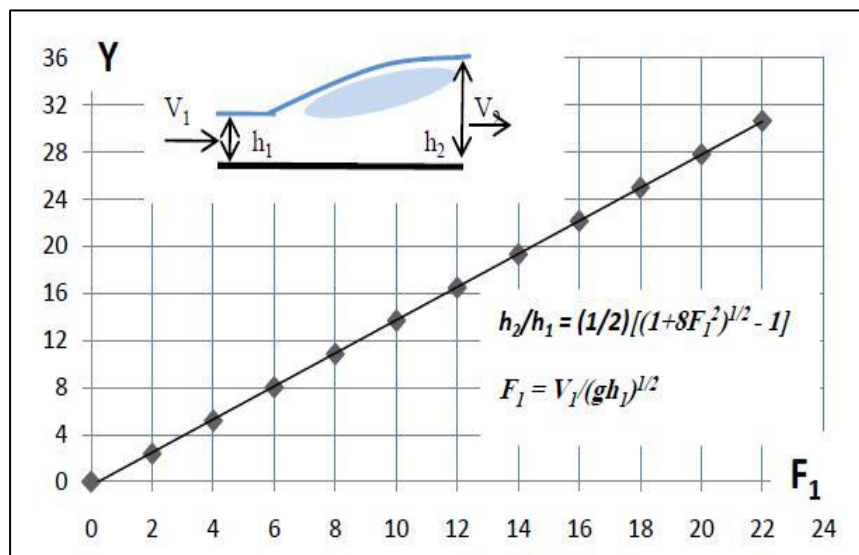


Figure (1.4) : Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828)

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

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

Il faut noter ici les points suivants :

- Le ressaut ne se réalisera qu'à la condition que le niveau d'eau en aval y_3 dans le canal soit supérieur à la hauteur conjuguée y_2 . Ce niveau est souvent conditionné par l'ouvrage situé en aval du ressaut.

- Dans les petits cours d'eau ($Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$), les nombre des Froude varient généralement 2 à 6, ce qui entraîne des hauteurs y_2 de deux à huit fois supérieures à y_1 .

1.6 Caractéristiques géométriques du ressaut

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

1.6.1 Hauteurs du ressaut

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

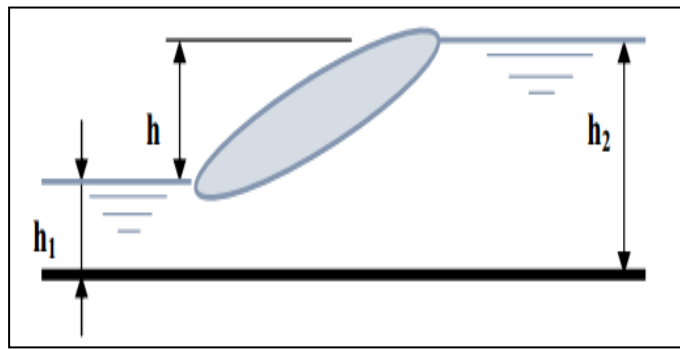


Figure (1.5) : hauteur du ressaut

1.6.2 Longueur du rouleau

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

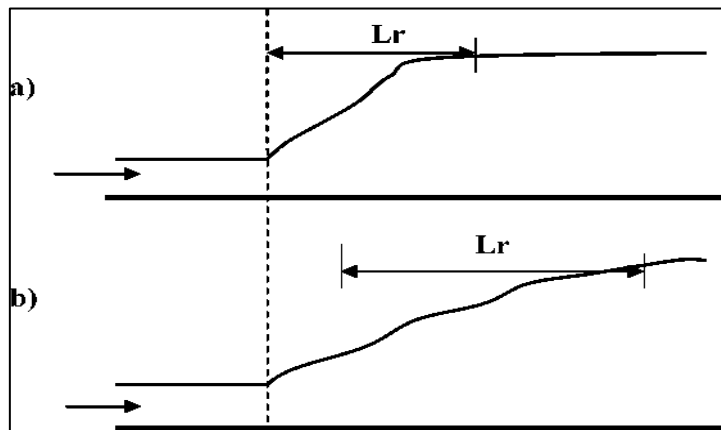


Figure (1.6) : Aspect du ressaut classique a) Rouleau développé, b) Rouleau non développé.

Le rouleau non développé est caractérisé 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. Le rouleau développé présente une surface relativement lisse et est caractérisé 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.

Les essais effectués par Hager et al. (1990) montrent que, pour le cas du ressaut classique, le rapport $\lambda_r = L_r/h_1$ dépend du nombre de Froude IF_1 et du rapport d'aspect $w = h_1/b$. Les auteurs proposent les relations suivantes :

$$\lambda_r = -12 + 160.Tgh(F_1/20) \text{ Pour } W=(h_1/b) < 0.1. \quad (1.8)$$

$$\lambda_r = -12 + 160.Tgh(F_1) \text{ Pour } 0.1 < W < 0.7 \quad (1.9)$$

« Tgh » indique la tangente hyperbolique.

Les auteurs notent que pour $IF_1 < 8$, les relations (1.8) et (1.9) peuvent être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

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

1.6.3 Longueur du ressaut

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

- La surface libre est pratiquement horizontale.
- La surface de turbulence du rouleau est faible.
- Les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.
- L'écoulement graduellement varie apparaît à l'extrémité aval du rouleau. Pratiquement,

pour calculer les dimensions du bassin d'amortissement, on considère comme limite d'aval du ressaut le point à partir duquel le revêtement du béton n'est plus nécessaire. Les essais de Bradley et Peterka (1957) ont permis à Hager et al. (1990) de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur L_j du ressaut. Celle-ci rapportée à la hauteur initiale h_1 du ressaut, peut s'écrire comme suit :

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

D'après Hager et al. (1990), la variation de la longueur relative (L_j/h_1) en fonction du nombre de Froude F_1 montre que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à 6 pour une gamme pratique $4 < F_1 < 12$

$$\frac{L_j}{h_1} = 6 \quad (1.12)$$

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

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

Pour un nombre de Froude au-delà de $F_1=3$, selon Sinning et Hager (1985), on peut également

Appliquer la formule empirique suivante.

$$\frac{L_j}{h_1} = \frac{35\sqrt{F_1}}{(8+F_1)} \quad (1.14)$$

Et qui conduit aux mêmes résultats.

1.6.4 Rendement du ressaut

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

Par l'application du théorème de Bernoulli (1738) on peut déterminer la perte d'énergie,

$$\Delta H_{12} = H_1 - H_2 \text{ produite par le ressaut en admettant que } Z_1 = Z_2 \text{ (canal horizontal),}$$

(figure 1.7), on obtient :

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

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

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

Et la charge totale dans la section aval est :

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

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

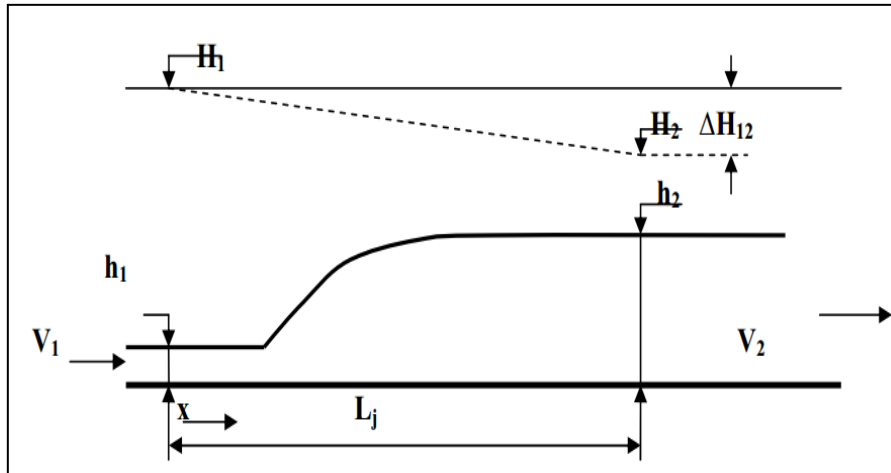


Figure (1.7) : Représentation de la Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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

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

$$\text{Où : } A_1 = b \cdot h_1$$

$$A_2 = b \cdot h_2$$

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

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

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

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

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

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

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

Le rapport $\frac{H_2}{h_1}$ est appelé efficacité du ressaut. donc pour déterminer les charge totale tenant compte de la relation (1.5) Du nombre de Froude on obtiendra :

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

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

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

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

$$\eta = 1 - \left[\frac{\left(Y + \frac{F_1^2}{24} \right)}{\left(1 + \frac{F_1^2}{2} \right)} \right] \quad (1.25)$$

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

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

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

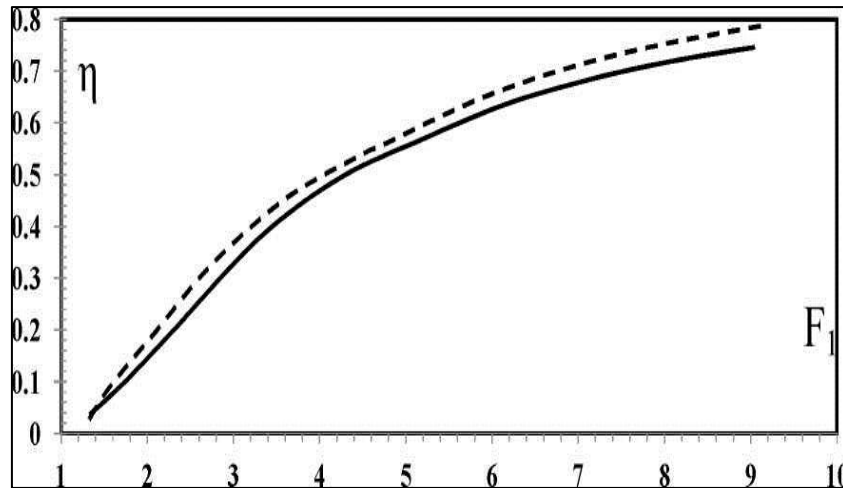


Figure (1.8) : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1
 (—) Courbe tracée selon la relation (1.25), (----) courbe tracée
 Selon la relation (1.26).

D'après l'analyse de la courbe $\eta = f(F_1)$ nous constatons que le rendement η du ressaut classique est supérieur à 50 % pour une valeur de nombre de Froude $F_1 > 5.1$ et que les

rendements calculés par l'application de la relation (1.26) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.25) d'autre par; l'écart maximum observé peut atteindre les 2 %.

I.7. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire

I.7.1. Approche de Forster et Skrinde (1950)

I.7.1.1. Seuil continu à paroi mince

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

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

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

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

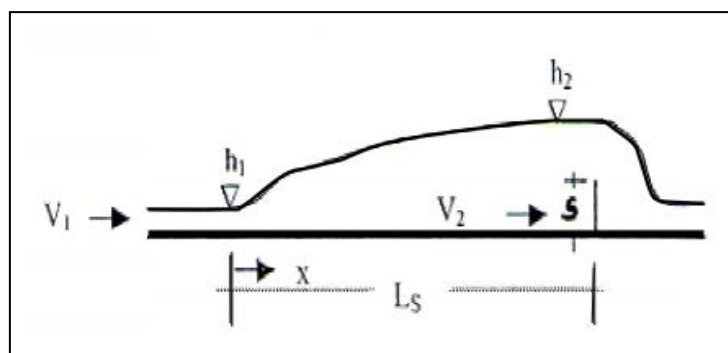


Figure (1.9): Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

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

$$h_3 < h_2 - 0.75s \quad (1.27)$$

La figure (1.10) montre la variation expérimentale de la hauteur relative s/h en fonction du nombre de Froude F de l'écoulement incident, pour les valeurs 3, 5 et 10 de la position relative x/h_2 du seuil.

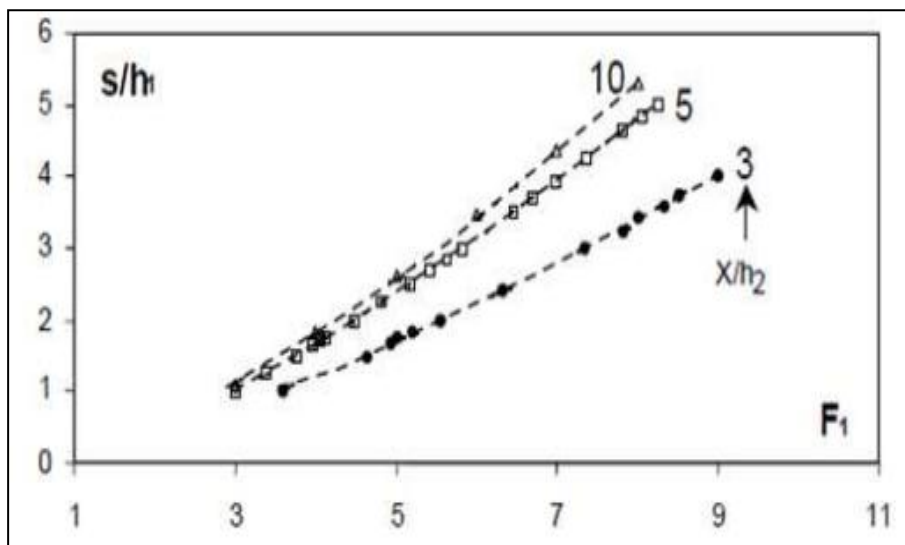


Figure (1.10) : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince quelques valeurs de x/h_2 , selon Forster et skrinde(1950).

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

I.7.1.2 Seuil continu à paroi épaisse

Le seuil est considéré comme épais lorsque le profil liquide s'y écoulant est presque parallèle au fond, pour peu que la longueur L du seuil soit suffisante (figure 1.11). La notion

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

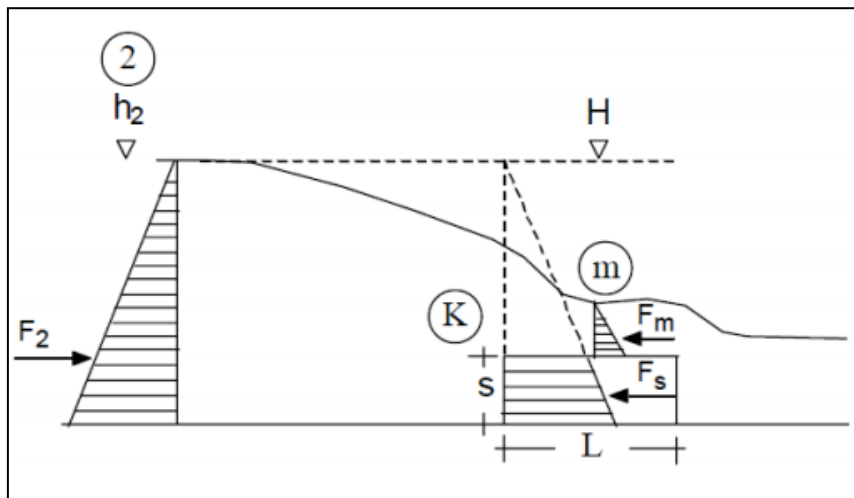


Figure (1.11) : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.

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

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

$$\frac{21.33 F_1^2}{\sqrt{1+8F_1^2}-1} = \frac{(\sqrt{1+8F_1^2}-1-2\frac{s}{h_1})^3}{\sqrt{1+8F_1^2}-1+2\frac{s}{h_1}} \quad (1.29)$$

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

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

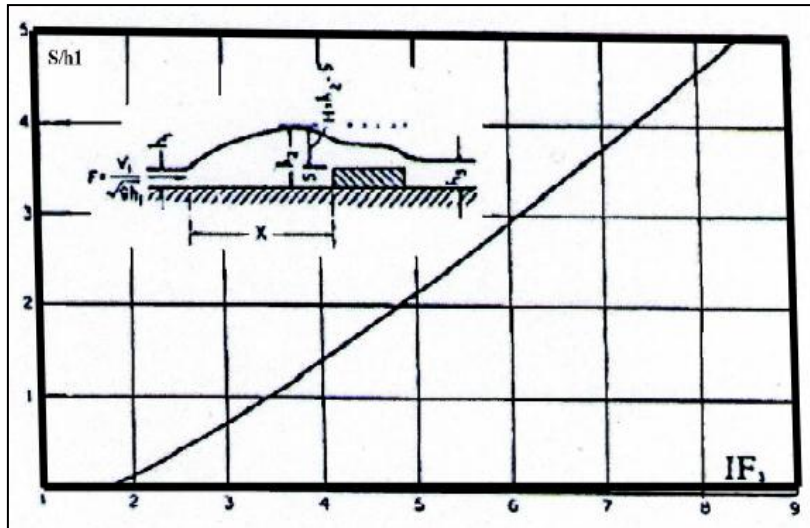


Figure (1.12) : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracé selon la relation la relation (1.30).

I.8 Ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire

I.8.1 Approche de Rand

En 1957, Rand a proposé d'établir une certaine classification pour le bassin avec seuil continu à son extrémité. Il était le premier qui a classifié le ressaut forcé par seuil en 10 cas typiques, se rapportant aux effets de la hauteur du seuil et de sa position, le ressaut classique servant du cas de référence .Ces cas peuvent être groupés en trois classes se distinguant par la position du seuil par rapport au pied du ressaut (figure 1.13) :

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

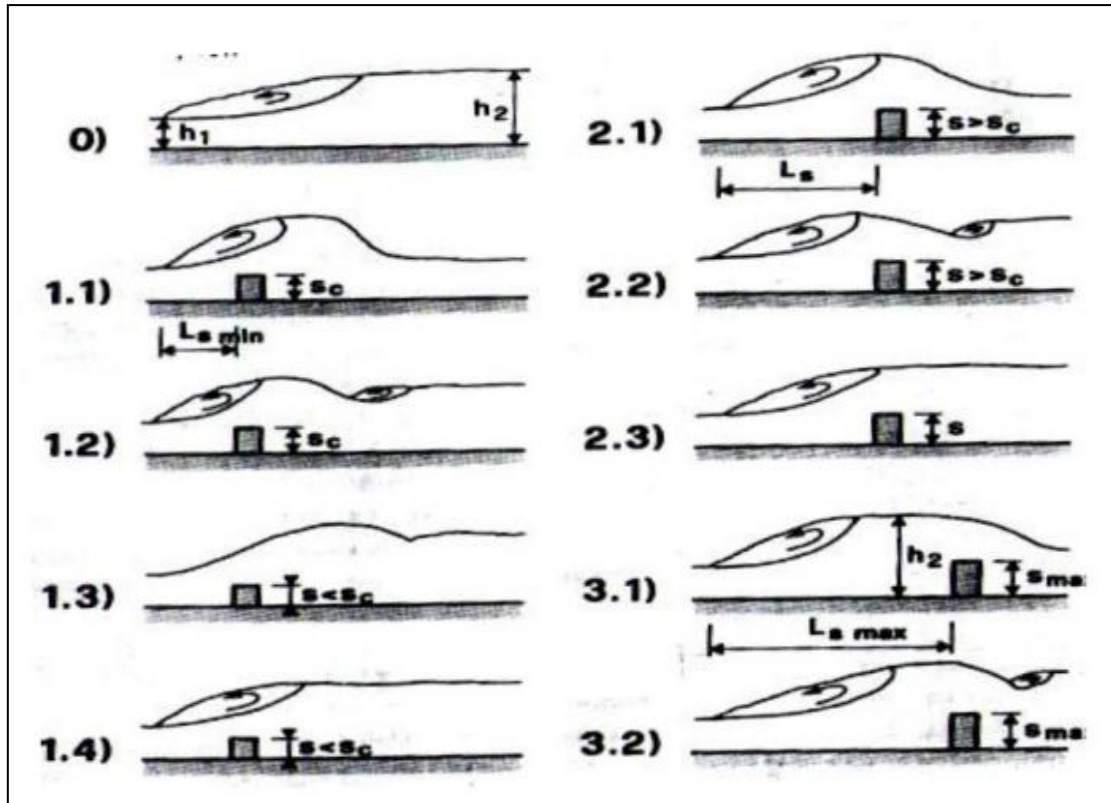


Figure (1.13) : cas typique d'écoulement divisée en trois classes selon rand (1959).

0) Ressaut classique avec hauteurs conjuguées h_1 et h_2 ; 1) class 1, longueur $L_{s,min}$; 2) class 2, longueur intermédiaire L_s ; 3) class 3, longueur $L_{s,max}$. ; s : hauteur du seuil, s_c : hauteur critique du seuil et s_{max} : hauteur maximale du seuil.

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

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

En 1965, Rand a repris ces diagrammes en les présentant sous une autre forme. L'installation expérimentale alors utilisée, est un canal avec vanne plane : la détermination de

h_1 est donc préconisée dans ce cas. Un diagramme pour une valeur de F_1 est dressé $Y_F = h_2 / h_1$ en fonction de $S = s / h_1$ pour divers valeurs de K , arrangement plus pratique à utiliser pour le dimensionnement (figure 1.14), mais avec l'inconvénient qu'il faut un diagramme pour chaque nombre de Froude.

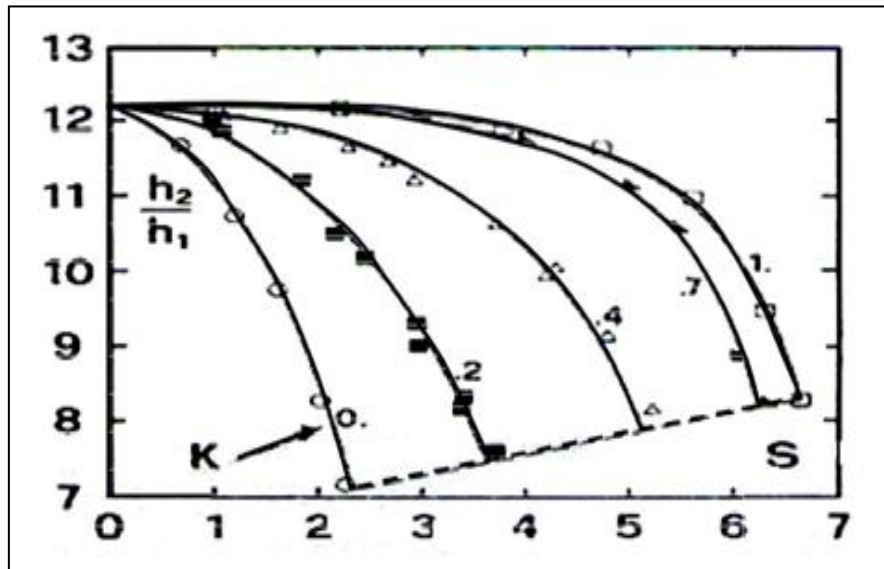


Figure (1.14) : Hauteurs conjuguées $h_2/h_1 = f(S, K)$ pour $F_1 = 9$. Valeurs et courbes expérimentales : (----) limite d'influence de l'aval sur l'amont

I.9 Conclusion

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

D'après cette étude, nous avons remarqué que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement, afin de définir la relation reliant le rapport Y des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 . Bélanger (1828), a fait le premier pas sur cet objectif et a déterminé cette relation, par l'application du théorème d'Euler, entre les deux sections du ressaut. L'équation de la droite $Y = f(F_1)$ obtenue par Bélanger (1828) est représentée par la (figure 1. 4). Quand on a abordé les travaux de Hager et al (1990), nous avons constaté que les caractéristiques géométriques du ressaut, ne sont déterminées, que par la voie expérimentale, et que plusieurs formules ont été proposées, par différents chercheurs.

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

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

Chapitre II:

*RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN
CANAL TRAPEZOIDAL.*

Chapitre II :

Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale.

Partie 1 : 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 .

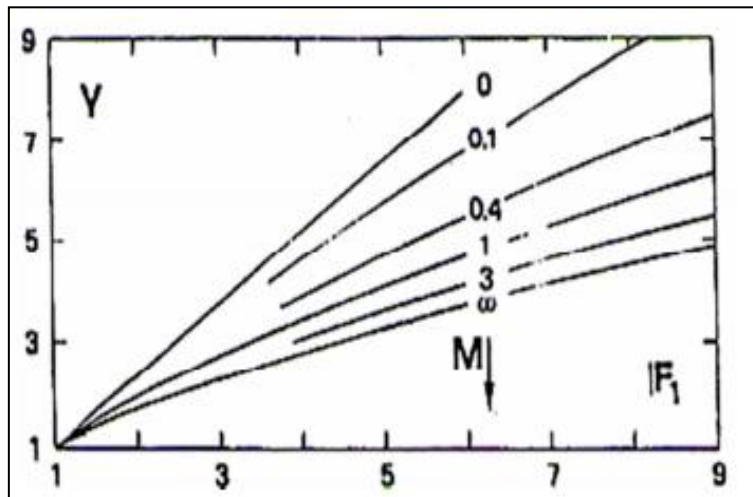


Figure (2.1) : hauteur conjuguées $Y = h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M = mh_1/b$.

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) et $M \rightarrow \infty$ (canal triangulaire), pour les quelles :

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

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^2+Y+1)}{3(Y+1)} \quad 1/M=0$$
(2.5)

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

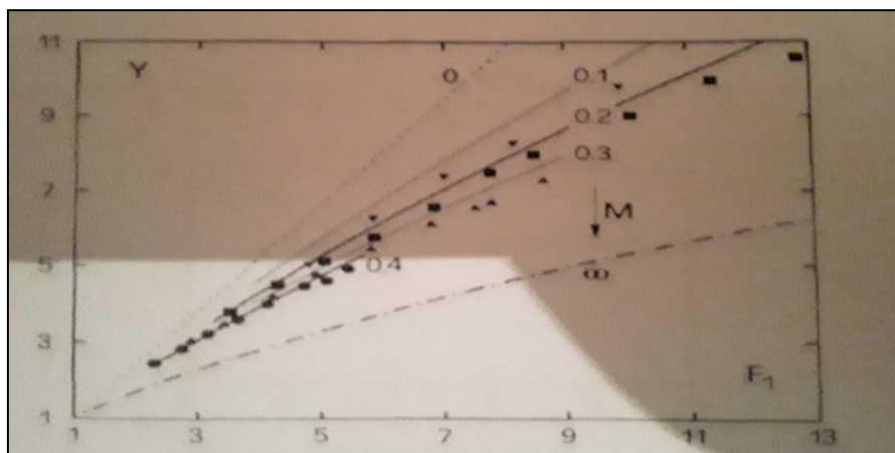
$$Y = \sqrt{2} F_1 - \frac{1}{2} \quad M=0$$

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

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 es notée, la valeur expérimentales de Y sont toujours en dessous de celles issues de la relation théorique.

Cela est attribué à la négligence 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 conjuguais $Y = h_2/h_1$,fonction de F_1 et $M=mh_1/b$,(—) équation : (2.4) ;(...) $M=0$; (▽) $M=0.1$; (■) $M=0.2$;(▲) $M=0.3$;(.) $M=0.4$; (- - -) $M=\infty$.

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 :

Ou : $W = b + 2mh$ 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) :
$$\frac{L_j}{(h_2 - h_1)} = 7.1(1 + 10M)$$

Ou : $\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_i}$ 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

$Fl > 4$. 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).

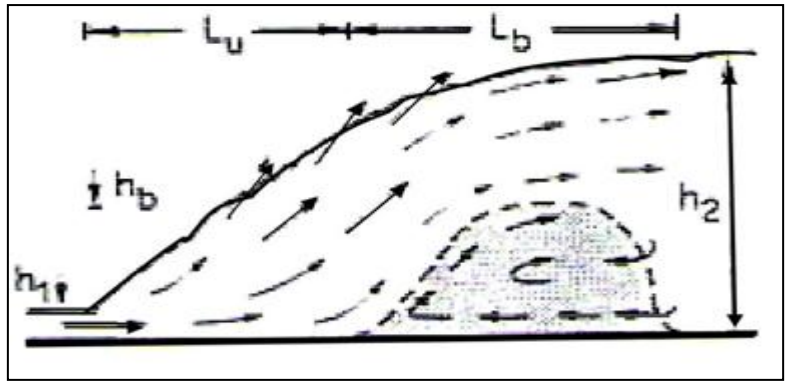


Figure (2.3) : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale.

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).

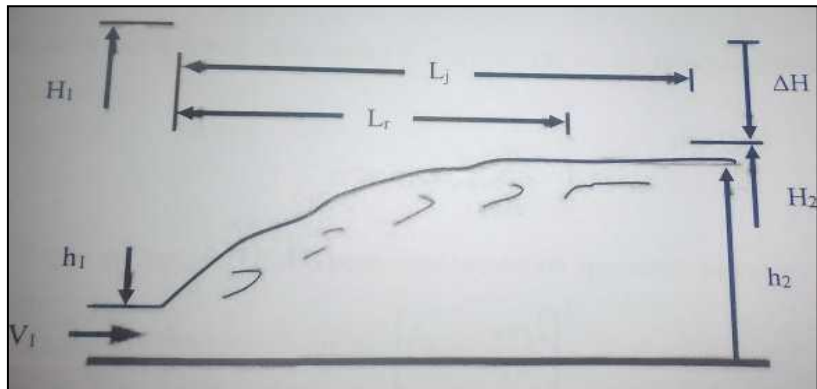


Figure (2.4) : Schéma de définition du ressaut hydraulique.

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

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

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

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

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

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

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

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 triangulaire

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

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

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.

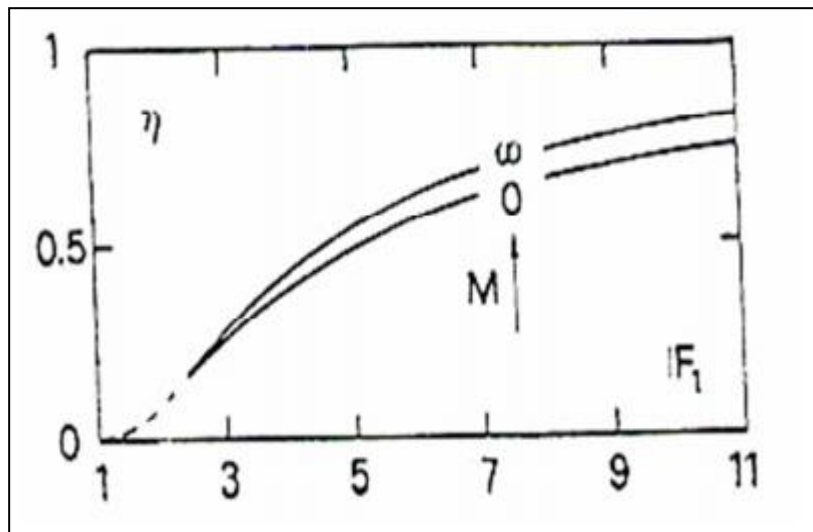


Figure (2.5) : Représentation graphique de la relation (3.12) du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . $M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire

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 dénoyé 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.

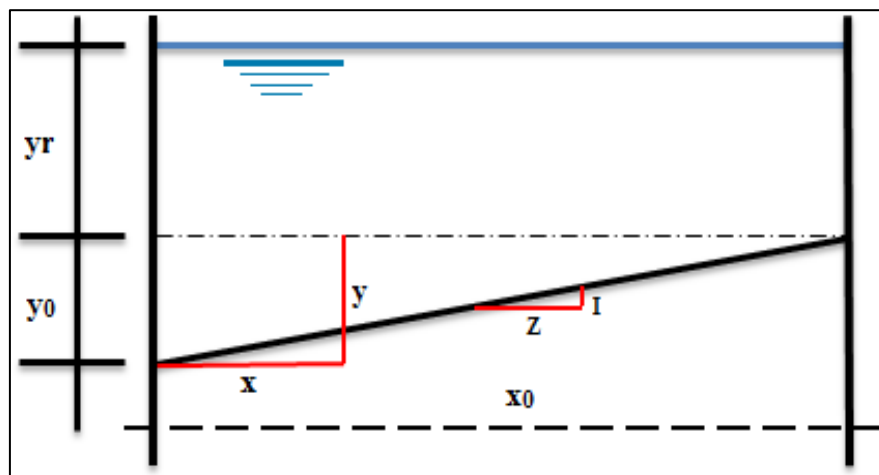


Figure (2.6) : Section transversale du canal

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.

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

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

$$\Phi = y_r / y_0$$

$$\Theta = \frac{(Q \cdot At)^2}{g \cdot y_0^3}$$

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 :

$$P+M = \frac{1}{2} x_0 y_r^2 \gamma + \frac{1}{2} x_0 y_0 \gamma (y_r + y_0/3) + \Phi Q^2 / x_0 y_r + (\frac{1}{2} x_0 y_0). \quad (2.14)$$

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.

11.2.1.3. 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

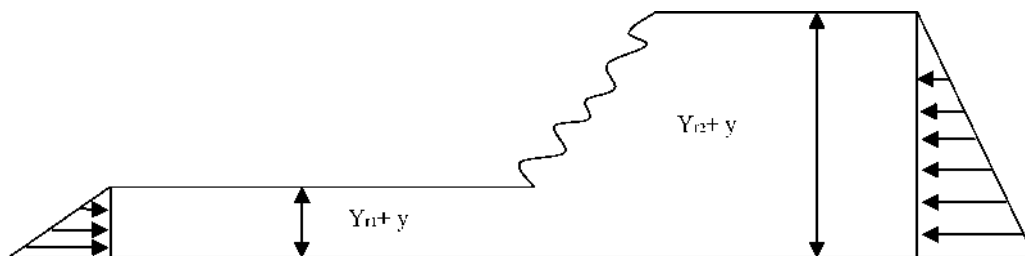


Figure (2.7) : Section de la bande longitudinale

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: $G = (P+M) s_2 / (P+M) s_1$ (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 :

$$y/y_0 = 1 - x/x_0 \quad (2.21)$$

Remplaçant (2.21) dans (2.18) :

$$\frac{1}{2} (1 - x/x_0 + \phi_1)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_1) / (1 + 2\phi_1)^2 = \frac{1}{2} (1 - x/x_0 + \phi_2)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_2) / (1 + 2\phi_2)^2 \quad (2.22)$$

Remplaçant (2.22) dans (2.20) :

$$G = \frac{\frac{1}{2}(1-x/x_0 + \phi_2)^2(1 - x/x_0 + \phi_2) / (1 + 2\phi_2)^2}{\frac{1}{2}(1-x/x_0 + \phi_1)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_1) / (1 + 2\phi_1)^2} \quad (2.23)$$

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 $y_{r1}/y_{r1} + y_0$.

La valeur du paramètre $Y_{r1}/Y_{r1} + Y_0$ 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 $Y_{r1}/Y_{r1} + Y_0$ 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 fourni, 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.

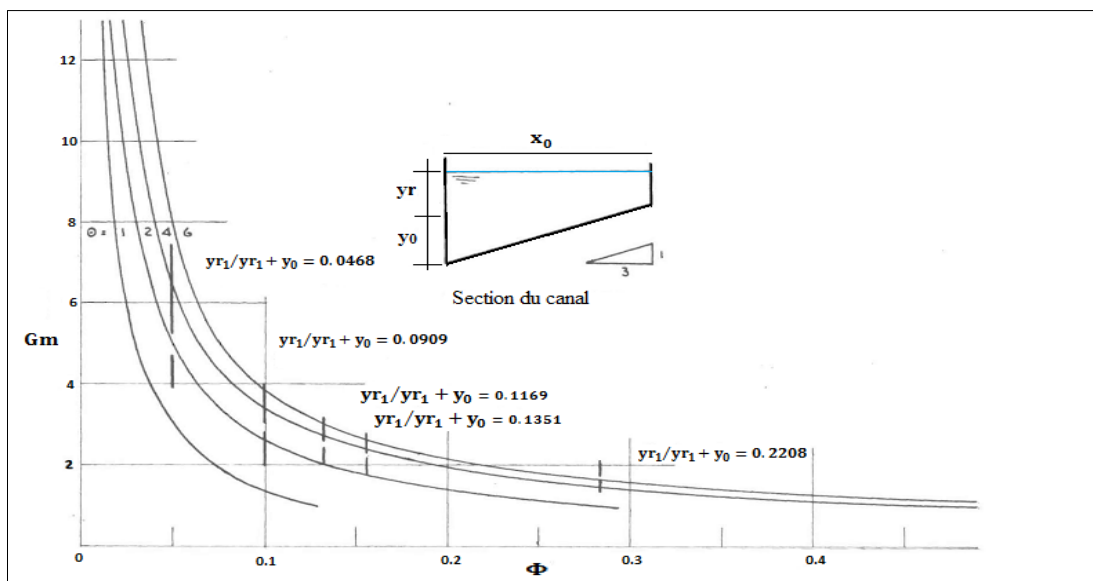


Figure (2.8): Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté peu profond.

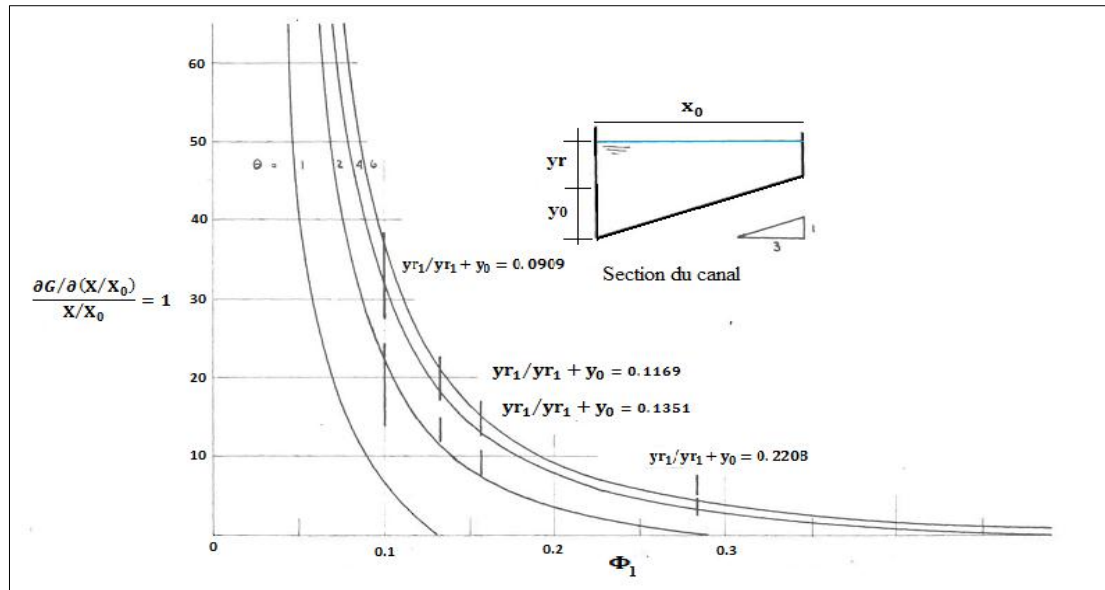


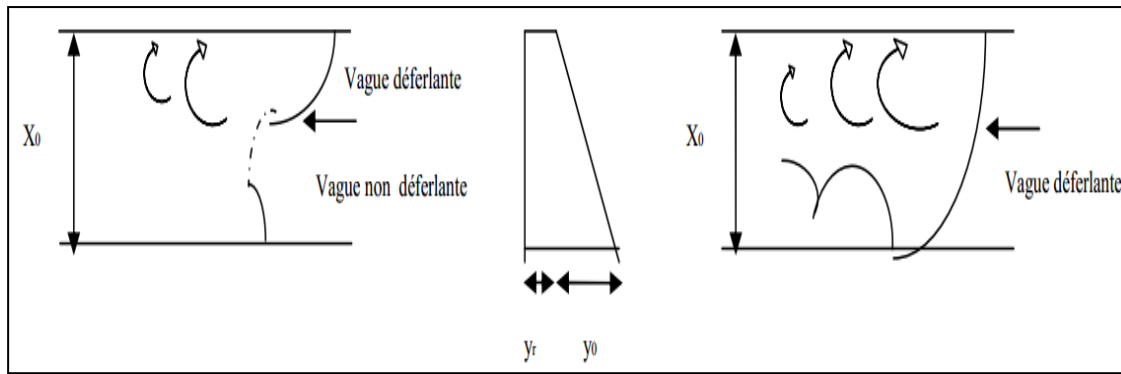
Figure (2.9) : Diagramme adimensionnel du taux de changement de M sur le côté peu profond.

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).

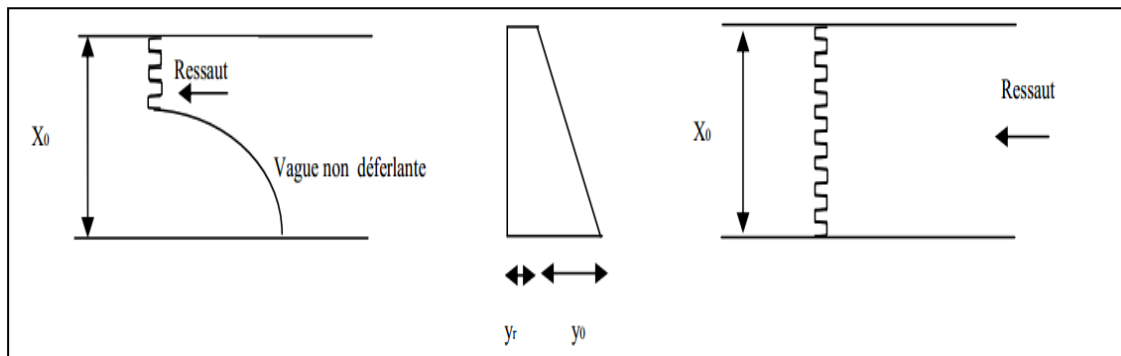
Les critères utilisés pour analyser les deux types de l'écoulement observés sont qu'un certain transfert latéral de la quantité de mouvement est nécessaire pour obtenir une onde perpendiculaire ; dans le cas où ce retour latéral de la quantité de mouvement ne peut pas être fourni, aucun ressaut hydraulique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

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 ($F_1 > 1.83$ 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.

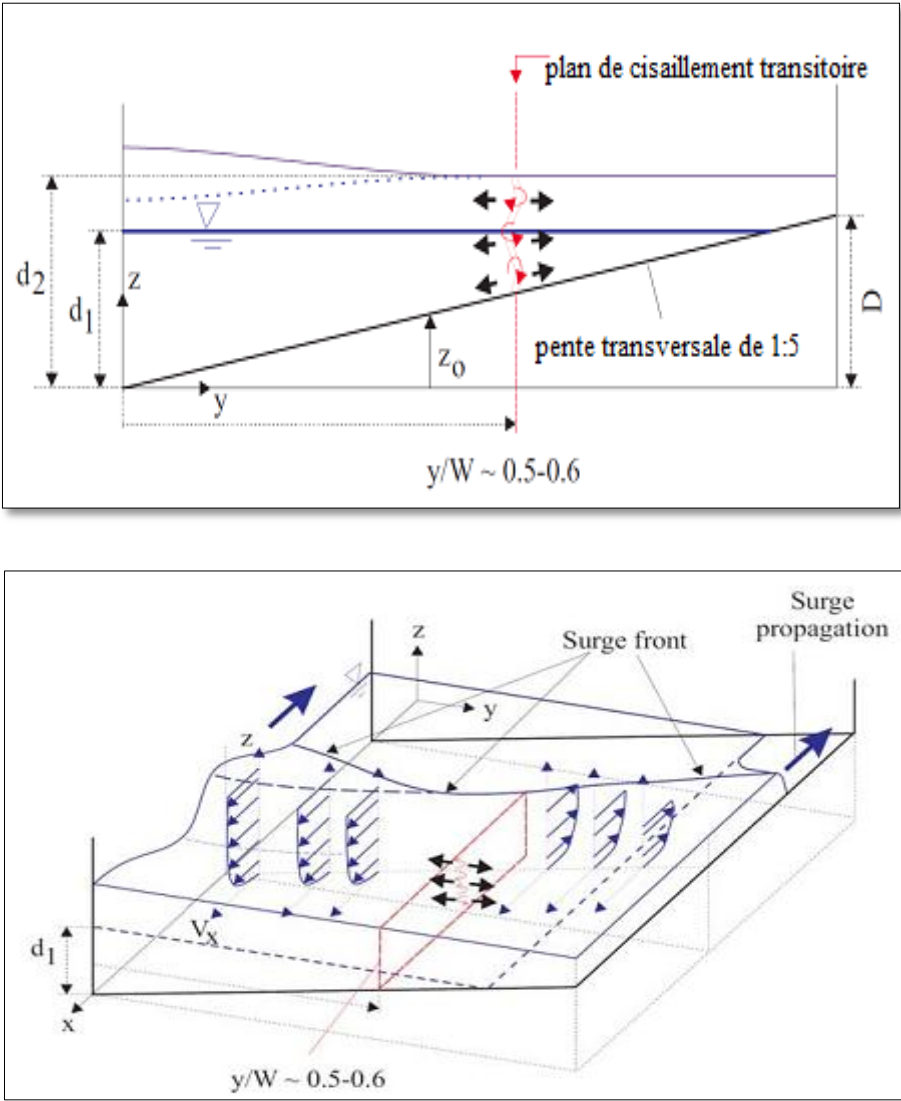


Figure (2.11): Modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la propagation positive du ressaut dans un canal composé prismatique ($d_1/D < 1$)

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 (2015a,b, 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).

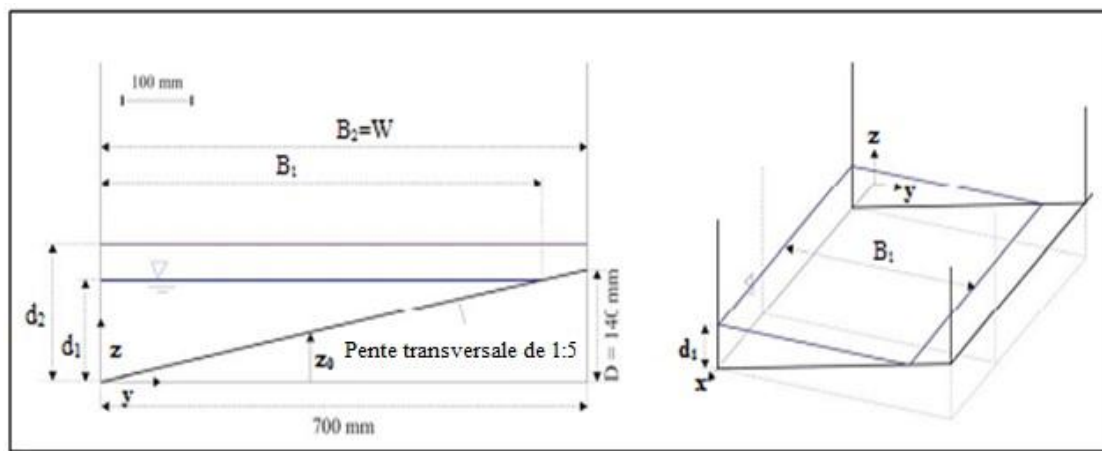


Figure (2.12):Modèle de la section transversale du canal - A gauche: en regardant vers l'amont.



Figure (2.13): Photographie de l'installation expérimentale en aval

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 dénoyé 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
PROFILE DES CANAUX.*

Chapitre III

Influence du seuil sur le ressaut hydraulique dans quelques profils de 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

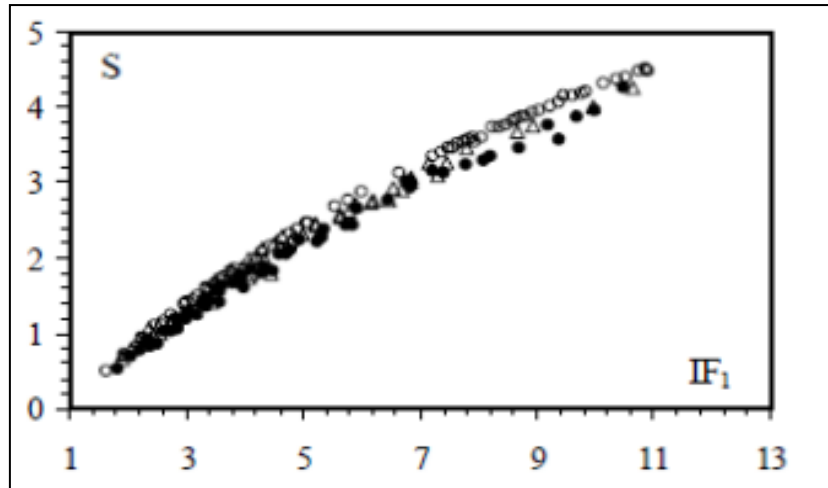


Figure (3.1) : Variation expérimentale la hauteur relative $S=s/h$

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.

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.

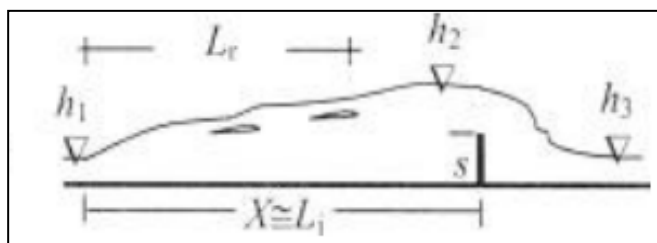


Figure (3.2) : contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour $X=L_j$

Dans la gamme de valeurs $3 < F1 < 9$, les essais n'ont montré aucun effet de frottement et le rapport $Y = h_2/h_1$ 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/h_1 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 $\xi(Y, s/h_1) = 0$ et $\xi(F1, s/h_1) = 0$. 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/h_1 et $F1$:

$$Y = 2,37(s/h_1)^{0,8} + 1, R^2 = 0,996 \quad (3.5)$$

$$s/h_1 = 0,562(F1 - 1)^{1,225}, R^2 = 0,993 \quad (3.6)$$

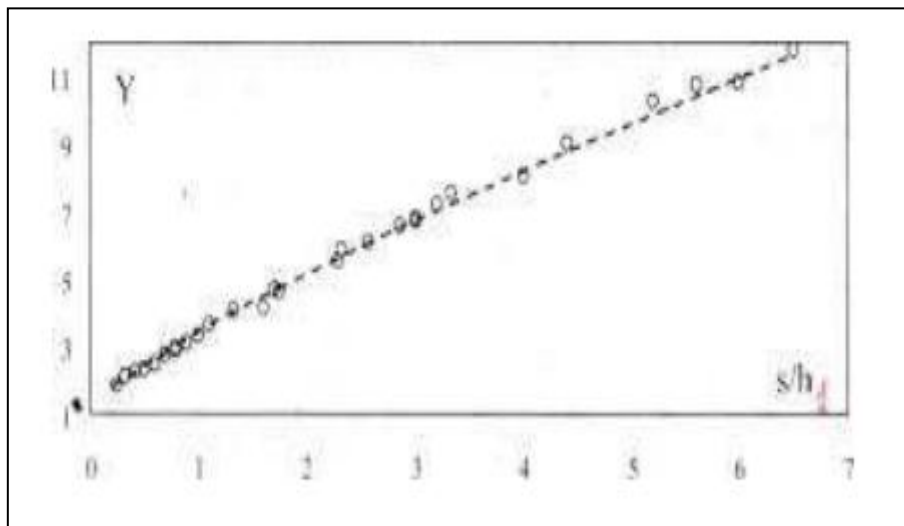


Figure (3.3): Variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince ($x \approx L_j$). (----) courbe tracée selon la relation (3.5).

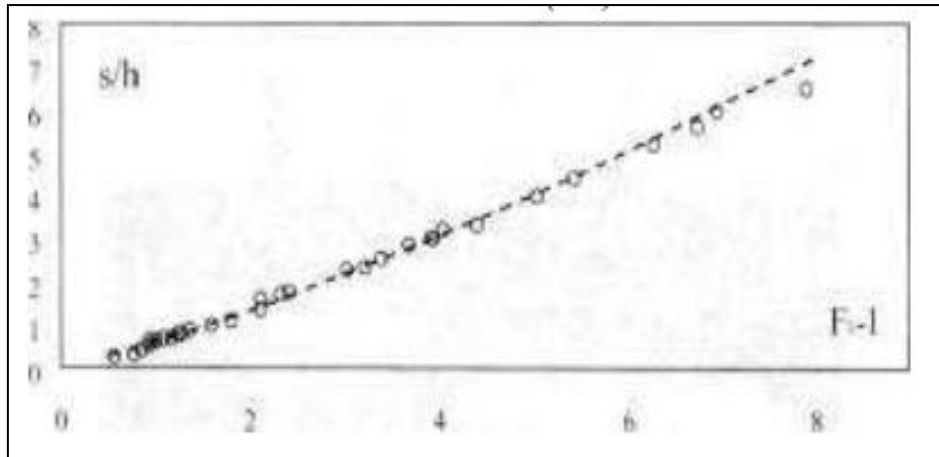


Figure (3.4): Variation expérimentale de la hauteur relative du seuil à parois mince s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident ($x \approx L_j$). (----) courbe tracée selon la relation (3.6).

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 IF_1 de l'écoulement incident

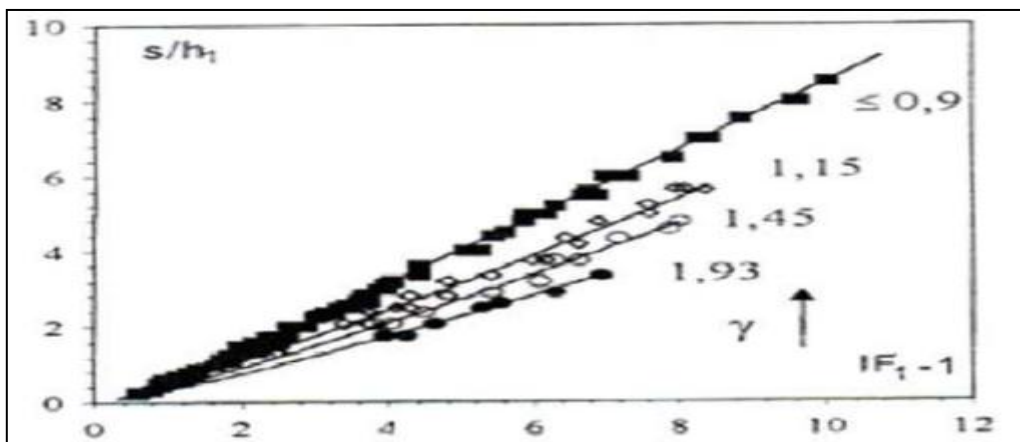


Figure (3.5) : Variation de s/h_1 en fonction de nombre de froude IF_1 et pour différent de valeur du rapport moyenne de compacité γ : (■) 0,9, (◇) 1,15, (○) 1,45, (●) 1,93. (—) Courbes d'ajustements.

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).

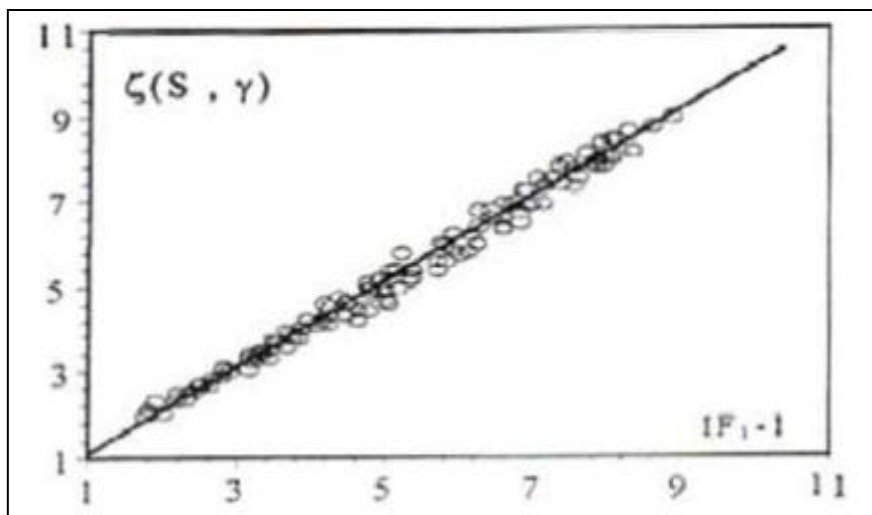


Figure (3.6): Variation de $\zeta(S, \gamma)$ en fonction de F_1-1 . (o) points expérimentaux. (—) Droite d'équation : $(S + 0,48) / (1,07 - 0,29 \gamma) = F_1-1$.

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.

Conclusion à la première partie.

La première partie de notre étude a eu pour objectif de passer en revue l'état des connaissances des principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique.

Le premier chapitre a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique, dont nous avons examiné en première position les caractéristiques : Les hauteurs initiale et finale, la longueur du ressaut L_j et la longueur du rouleau L_r . On a commencé par l'équation de base, démontrée par Bélanger (1828) ; cette dernière est obtenue par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut classique. La détermination de la valeur du nombre de Froude F_1 de l'écoulement à l'amont du ressaut hydraulique, a permis à Bradley et Peterka (1957) de donner leurs classifications des différentes formes du ressaut. D'autres formes du ressaut, ont été abordées, à travers les travaux de Forster et Skrinde (1950), sur le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince et épaisse. Concernant le ressaut hydraulique forcé par seuil mince, les travaux de Rand (1957) ont fait l'objet de notre étude bibliographique. L'auteur a élaboré une relation entre la hauteur du seuil et sa position et ce, pour faire la classification du ressaut forcé en 10 cas typiques.

L'objectif du deuxième chapitre de cette étude, consiste à faire le point sur les travaux principaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal symétrique et asymétrique. La détermination des caractéristiques du ressaut, a été souvent l'objectif principal des travaux entrepris par *Silvester (1964)*, *Posey et Hsing (1938)* et plus récemment ceux de *Hager et Wanoschek (1989)*. Le cas du canal trapézoïdal symétrique est le plus général : par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut, nous avons déterminé la relation des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 et nous avons déduit le cas du canal rectangulaire et triangulaire. La même chose pour la détermination du rendement du ressaut, mais, pour ce cas, l'application du théorème de Bernoulli est nécessaire.

Le second 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).

Deuxième partie :

ETUDE EXPERIMENTALE

Introduction de la deuxième partie

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

Les travaux de la deuxième partie de notre étude, consistent à analyser expérimentalement l'effet du seuil mince du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique.

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

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

Chapitre I :

Description du modèle.

Chapitre I :

Description du modèle.

I.1. Introduction

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

I.2. Description du canal

Le canal de mesure (figure 1.1) et (photographie 1.1) qui nous a servi de banc d'essai est de section trapézoïdal asymétrique, a une largeur de 29.3 (cm) et longueur de 7(m), construit par des séries 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 SILICON. Le fond est incliné transversalement d'une pente de 1/3.

Un bassin d'alimentation est relié au une pompe centrifuge (photographie 1.2). Celle-ci aspire de l'eau d'un réservoir ouvert de récupération et de la refoule dans un bassin, également ouvert, alimentant le canal (photographie 1.3). Le système bassin de récupération- pompe-bassin d'alimentation est relié par une conduite circulaire en PVC d'un diamètre de 115 mm. L'ensemble fonctionne en circuit fermé, l'écoulement incident est provoqué par une plaque métallique manuelle (photographie 1.4). Le canal trapézoïdal asymétrique est relié, dans sa partie amont à une boîte en charge reliée à un convergent de forme triangulaire d'une hauteur d'ouverture de 8cm jouant (photographie 1.5).

Le réglage des débits volume s'effectue par une vanne (photographie 1.6) et sont mesurés à l'aide d'un débitmètre à diaphragme (photographie 1.7). Les deux prises de pression p sortant du diaphragme sont reliées à un manomètre différentiel gradué, (photographie 1.8), permettant de lire la différence « Δh » des côtes des deux ménisques dans les tubes manométrique.

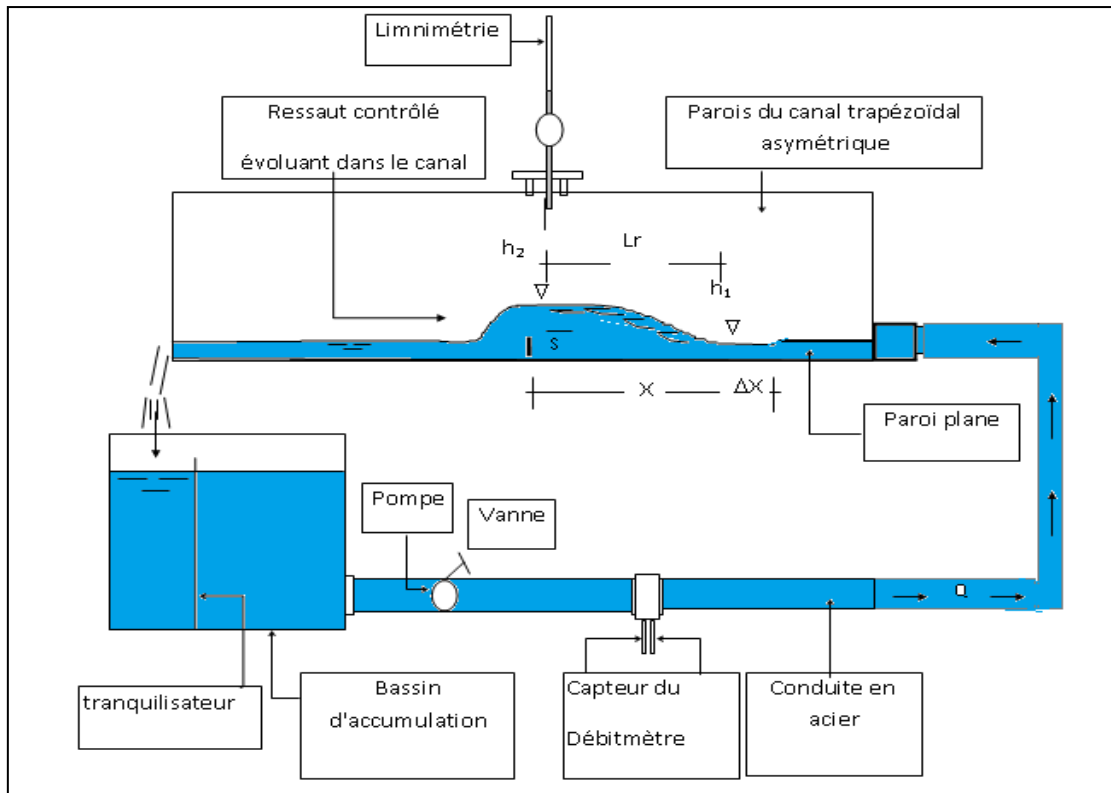


Figure (1.1) : Schéma simplifié d'ensemble du dispositif expérimental.



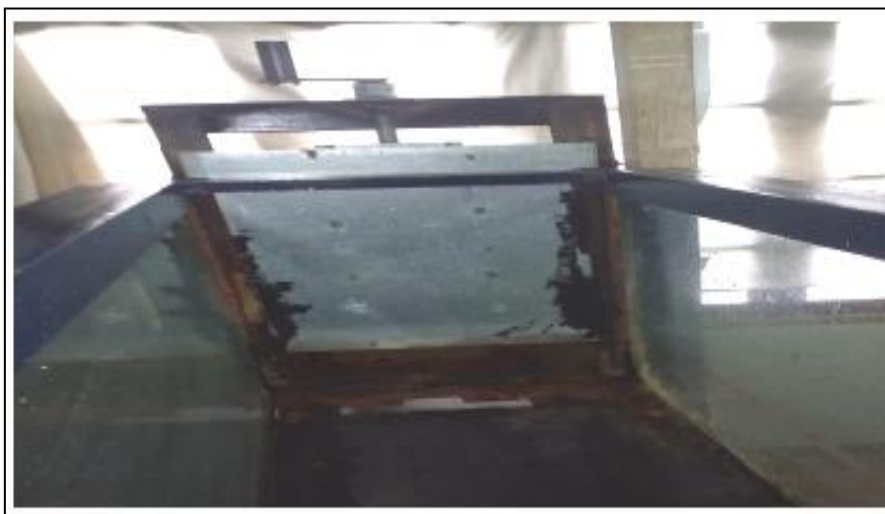
Photographie (1.1) : modèle du canal expérimentale.



Photographie (1.2) : pompe centrifuge axiale.



Photographie (1.3) : bassin de restitution.



Photographie (1.4) : plaque métallique coulissante.



Photographie (1.5) : convergent du canal.



Photographie (1.6) : les deux vannes.

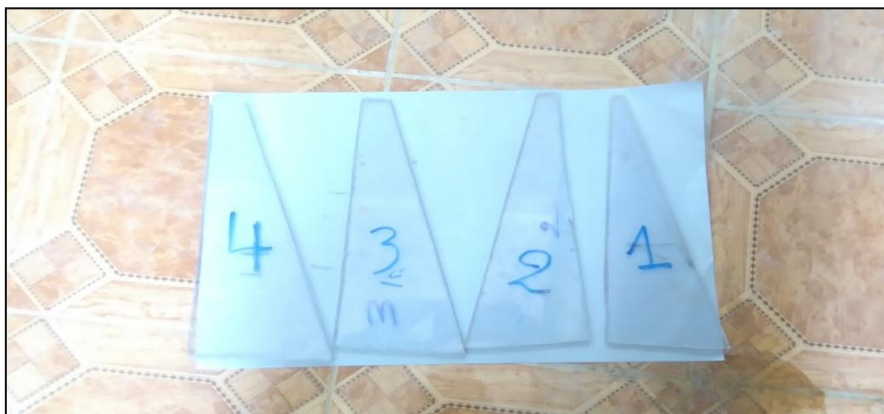


Photographie (1.7) : manomètre différentiel gradué.

I.3.Les Seuils mince.

Pour la création du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire on a utilisé des seuils minces. Les seuils utilisés dans notre dispositif expérimental, sont façonnées en plastique en forme trapézoïdal bien adapté avec le canal.

Dans le but d'obtenir un nombre important de points de mesures, nous avons préparé 04 seuils mince de différentes hauteurs S (cm) = (1;11), (2 ; 11.6), (3 ; 12.1), (4 ; 12.1) cm (Photographie 1.8).



Photographie (1.8) : les seuils minces testés.

I.4 Appareillage de mesures

L'étude du phénomène du ressaut hydraulique nécessite un appareillage simple. Pour définir par voie expérimentale les caractéristiques principales du ressaut, seules le débit volume Q et les différentes profondeurs h qui nécessitent un appareillage spécifique.

La position x du seuil ainsi que les différentes longueurs (L_r, L_j) sont simplement mesurées à l'aide d'un décimètre fixé sur le canal. Les débits volumes Q , mesurées à l'aide d'un débitmètre à diaphragme préalablement étalonné. Les profondeurs de l'écoulement h_2 et h_1 ont été mesurées à l'aide de limnimètres avec une précision du demi-millimètre.

I.4.1 limnimètre (Mesure des hauteurs).

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

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



Photographie 1.9 : Limnimètre.

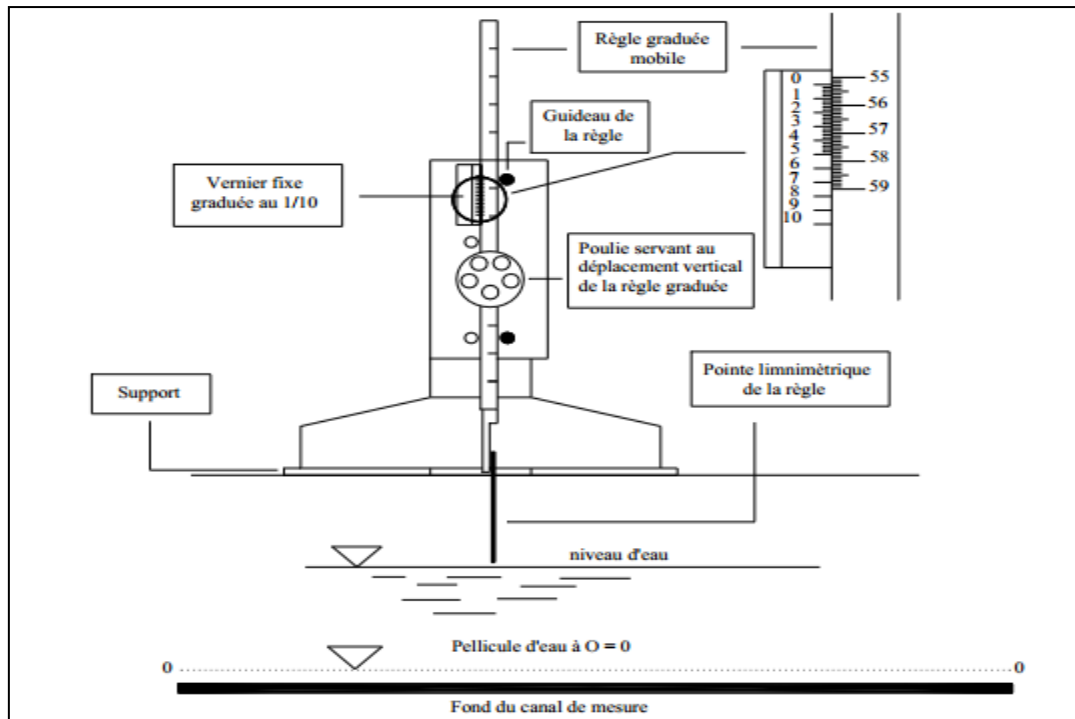


Figure (1.2): Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.

I.4.2. Débitmètre à diaphragme

Le débitmètre à diaphragme (photographie 1.10) est un dispositif destiné à la mesure des débits par différence de pressions.



Photographie (1.10) : débitmètre à diaphragme.

Le liquide en mouvement franchit un étranglement dans une conduit, il se produit alors dans cet étranglement une chute de pression qui est liée à la vitesse de l'écoulement et, par conséquent au débit.

I.4.2.1 Technique de mesure de débit

essais	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	0,0016
2	0,7	0,007	17,66	33	0,033	1,869	0,0019
3	1,4	0,014	13,41	33	0,033	2,461	0,0025
4	2,2	0,022	9,39	33	0,033	3,514	0,0035
5	4,1	0,041	8,56	33	0,033	3,855	0,0039
6	7,7	0,077	12,49	85	0,085	6,805	0,0068
7	11,4	0,114	11,99	85	0,085	7,089	0,0071
8	14,5	0,145	10,02	85	0,085	8,483	0,0085
9	19	0,19	10,48	100	0,1	9,542	0,0095
10	23,1	0,231	9,23	100	0,1	10,834	0,0108
11	31,1	0,311	8,41	100	0,1	11,891	0,0119
12	42,5	6,425	6,22	100	0,1	16,077	0,0161

Tableau (1.1) : Valeurs de mesure expérimental des débits par étalonnage.

L'étalonnage du débitmètre a été effectué pour des débits volumes tel que $1,608 \text{ l/s} < Q < 16,077 \text{ l/s}$.

Ces considérations montrent que pour un diaphragme donné, le débit volume Q peut s'écrire $Q = a \cdot (\Delta h)^b$, ou a et b sont des constantes, en notant que cette dernière est théoriquement égale à 0.5 a chaque débit volume passant par 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'objectif d'un ajustement puissance par la méthode des moindres carrés non linéaire Figure (1.3) :

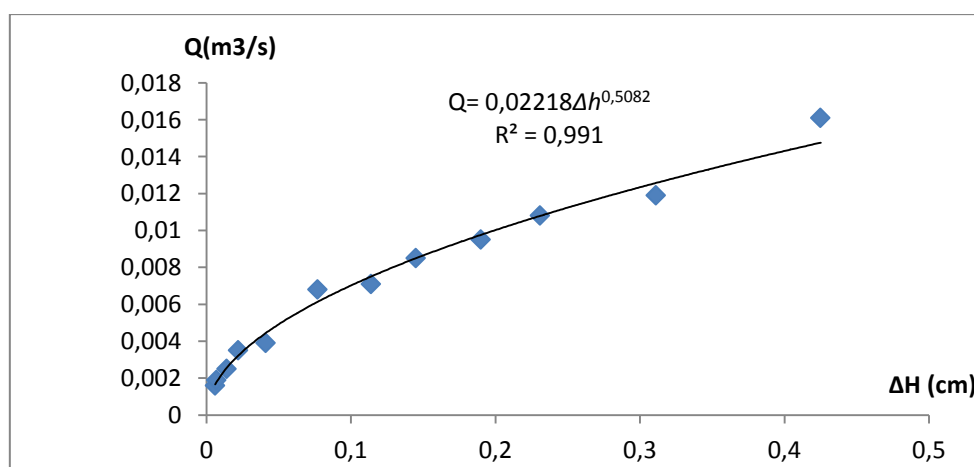


Figure (1.3) : Courbe expérimentale de la relation $Q = f(\Delta h)$.

L'ajustement de la courbe $Q = f(\Delta h)$, donne la relation du débit volumique passant par le Débitmètre à diaphragme :

$$Q = 0,02218 \Delta h^{0,5082} \quad (1.1)$$

I.4.2.2 Vérification de la validité de la relation (1.1)

La figure (1.4) confirme que la relation (1.1) représente un bon ajustement pour la détermination du débit volume, connaissant la différence de cotes Δh .

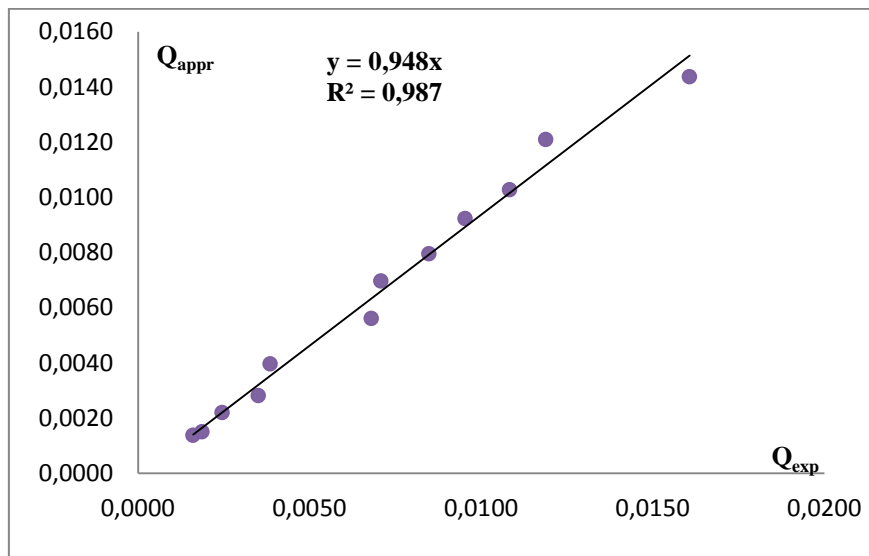


Figure (1.4) : Variation de débit expérimentale $Q_{(appr)}$ en fonction du débit approché $Q_{(exp)}$ issue de l'équation (1.1),
 (○)Point expérimentaux. (—)Première bissectrice d'équation : $Q_{(appr)} = Q_{(exp)}$.

I.5 Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à l'étude du modèle expérimental, qui a servi de base dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal à section trapézoïdal asymétrique. Dans ce chapitre nous avons abordé les appareils de mesure utilisés dans ce travail de laboratoire nous les avons illustré par des photographies.

En ce qui concerne les mesures des débits, nous avons utilisés le débitmètre à diaphragme pour obtenir une équation approché par étalonnage.

Chapitre II :

Etude expérimentale

Chapitre II :

Etude expérimentale

II.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de déterminer expérimentalement l'effet du seuil sur les caractéristiques du ressaut hydraulique évoluant dans un canal Trapézoïdal asymétrique pour des différentes positions x . La formation du ressaut contrôlé est conditionnée par la mise en place d'un seuil à l'aval de l'écoulement. A cet effet, des seuils de différentes hauteurs ont été utilisés.

II.2 Position de problème

Nous avons montré dans l'étude bibliographique, que lorsque le ressaut contrôlé est entièrement formé sur le radier du bassin amortisseur correspondant à une hauteur géométrique s du seuil et une longueur x de bassin, le déplacement du seuil vers l'aval ne modifie en rien la configuration du ressaut, ce qui revient à dire que la longueur L_j du ressaut est pratiquement assimilable à la position x du seuil. L'objectif principal de ce travail est de déterminer l'effet d'un seuil à paroi mince d'un ressaut hydraulique dans un canal à section trapézoïdal asymétrique, et de trouver des relations empiriques exprimant lia à la variation de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil, nombre du Froude F_1 ainsi que celle du rapport $X = x/h_2$.

II.3. Procédure expérimentale

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal asymétrique. Les caractéristiques étudiées sont: le débit volume Q , la hauteur initiale h_1 , la hauteur finale h_2 , la longueur du rouleau L_r , et la longueur du ressaut L_j , mesurée dans le même endroit de la hauteur finale h_2 . Le couple de valeur (Q, h_1) permet en outre le calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

L'expérimentation a été menée sur une seule hauteur initiales : h_1 (mm) = 80mm

La formation complète du ressaut a été conditionnée par la mise en place de seuil au travers de l'écoulement, pour cela 4 seuils ont été confectionnés et testés, de hauteurs géométriques suivantes: (1;11),(2 ;11.6),(3 ;12.1),(4 ;12.1) cm

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

1. Mesure de la hauteur conjuguée aval h_2 du ressaut

2. Mesure de la perte de charge ΔH
3. Calcule du débit volume Q par l'équation(1.1).

$$Q = 0,02218 \Delta h^{0,5082}. \quad Q \text{ en (m}^3/\text{s) et } \Delta h \text{ en (m)}$$

4. Calcule du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, par l'application de la relation :

$$Fr_1^2 = \frac{4Q^2}{(g.b^2.h_1^3)}$$

Avec :

Q : le débit en (m³/s).

g : L'accélération en (m³/s²)

b : largeur du canal b=26.5cm.

5. Mesure de la longueur L_r du retour latéral du courant.
6. Mesure de la longueur L_j du ressaut.
7. Mesure de la hauteur géométrique s du seuil.

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

II.4. Analyse des résultats expérimentaux

II.4.1. Etude expérimentale de l'effet du seuil mince sur les caractéristiques du ressaut

hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique à convergent triangulaire.

II.4.1.1. Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude

Fr_1 incident (au niveau du centre du canal):

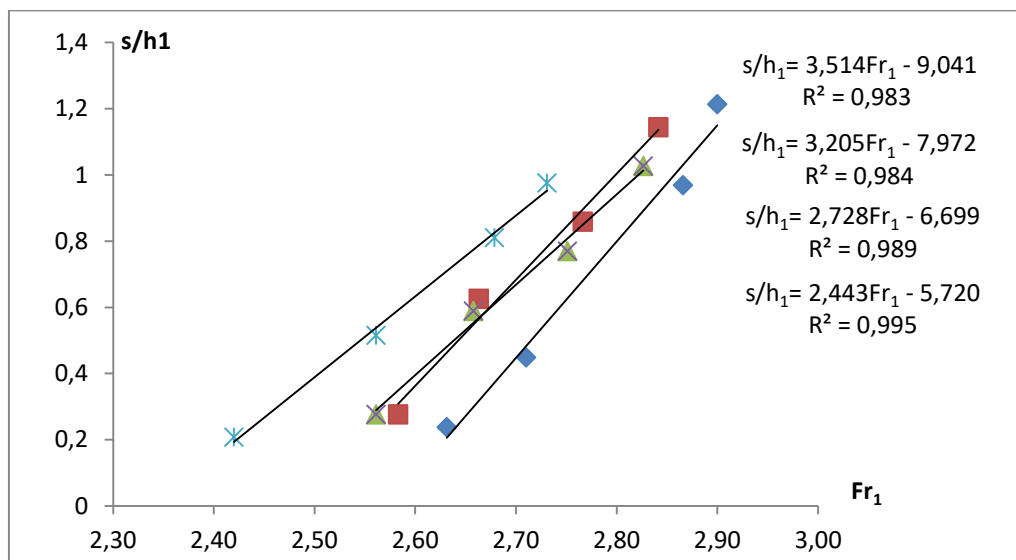


Figure (2.1): Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude Fr_1 incident (au niveau du centre du canal)

La figure (2.1) représente quatre nuages de points correspondant chacun à une position (x) du seuil, l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à quatre relations d'équations linéaires suivantes :

$$s/h_1 = 2,443 Fr_1 - 5,720 \quad R^2 = 0,995 \quad \text{pour } 2,42 \leq Fr_1 \leq 2,73 \quad (x=3) \quad (2.1)$$

$$s/h_1 = 2,728 Fr_1 - 6,699 \quad R^2 = 0,989 \quad \text{pour } 2,56 \leq Fr_1 \leq 2,83 \quad (x=4) \quad (2.2)$$

$$s/h_1 = 3,205 Fr_1 - 7,972 \quad R^2 = 0,984 \quad \text{pour } 2,58 \leq Fr_1 \leq 2,84 \quad (x=4.6) \quad (2.3)$$

$$s/h_1 = 3,514 Fr_1 - 9,041 \quad R^2 = 0,983 \quad \text{pour } 2,63 \leq Fr_1 \leq 2,90 \quad (x=6) \quad (2.4)$$

Par ailleurs, on remarque que pour toutes les positions testées, au fur et à mesure que le nombre de Froude Fr_1 augmente, le rapport de la hauteur relative du seuil s/h_1 augmente. On remarque également que pour le même nombre de Froude, la valeur de la hauteur relative s/h_1 augmente proportionnellement avec la position du seuil.

Les valeurs expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.1) sont consignés dans le tableau (2.1).

Tableau (2.1) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.1)

Fr₁	s/h₁	Fr₁	s/h₁	Fr₁	s/h₁	Fr₁	s/h₁
2,42	0,19	2,56	0,28	2,58	0,30	2,63	0,20
2,45	0,27	2,60	0,39	2,60	0,36	2,65	0,27
2,50	0,39	2,65	0,53	2,65	0,52	2,70	0,45
2,55	0,51	2,70	0,67	2,70	0,68	2,75	0,62
2,60	0,63	2,75	0,80	2,75	0,84	2,80	0,80
2,65	0,75	2,80	0,94	2,80	1,00	2,85	0,97
2,70	0,88	2,83	1,02	2,84	1,13	2,90	1,15
2,73	0,95	/	/	/	/	/	/

Tableau (2.2) : coefficient des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de relations liants s/h₁ au nombre de Froude Fr₁ pour différentes positions x du seuil.

Position x	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient R²
3	2,443	-5,72	0,995
4	2,728	-6,699	0,989
4,6	3,205	-7,972	0,984
6	3,514	-9,042	0,983

La figure (2.2) montre que les points expérimentaux s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$a = 0,371 x + 1,339 \quad R^2 = 0.946 \quad \text{pour} \quad 3 \leq x \leq 6 \quad (2.5)$$

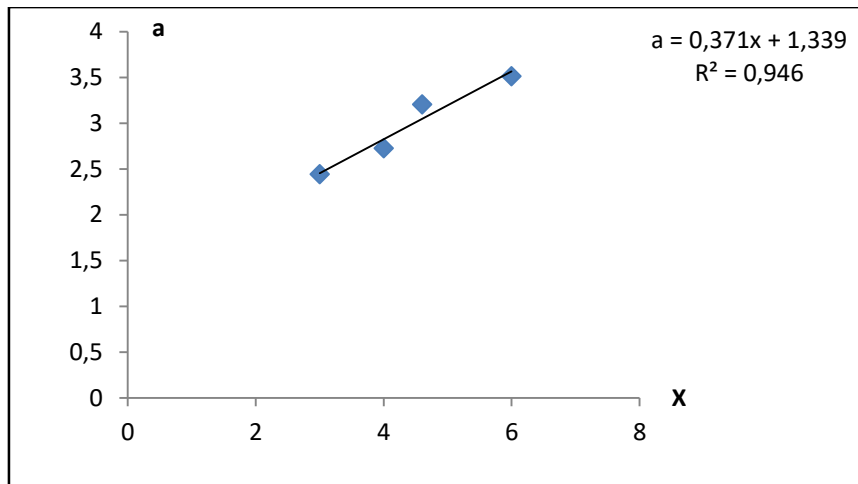


Figure (2.2) : Variation du coefficient **a** en fonction de la position **x** du seuil.
(—) courbe d'ajustement.

La figure (2.3) montre que les points expérimentaux s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$b = -1.138 x - 2.348 \quad R^2 = 0.966 \quad \text{pour} \quad 3 \leq x \leq 6 \quad (2.6)$$

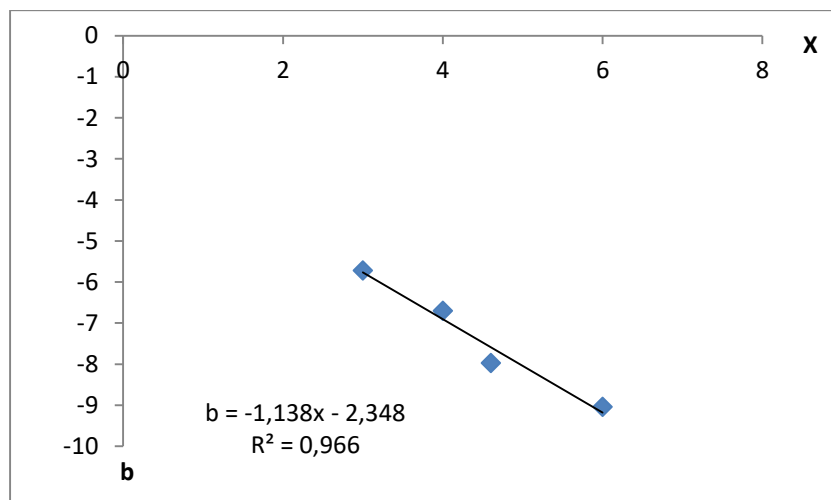


Figure (2.3) : Variation du coefficient **b** en fonction de la position **x** du seuil.
(—) courbe d'ajustement.

La relation linéaire traduisant la variation de s/h_1 en fonction de Fr_1 et de la position x du seuil, est la suivante :

$$\alpha = (0.371x + 1.339) Fr_1 + (-1.138x - 2.348) \quad (3.7)$$

Pour une gamme du nombre de Froude $2.42 \leq Fr_1 \leq 2.90$

La représentation graphique des points de mesure et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure (2.4)

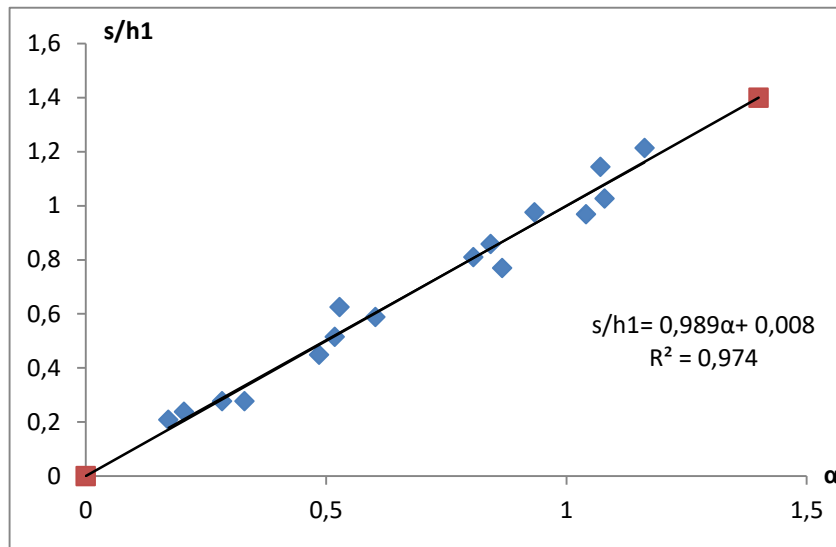


Figure (2.4) : Variation du rapport $S= s/h_1$ en fonction de $\alpha = (0.371x + 1,339) Fr_1 + (-1.138-2.348)$ (—) première bissectrice, (—) droite d'ajustement d'équation $s/h_1=0.989 \alpha +0.008$.

D'après la figure (2.12) on remarque que le nuage de points représentant la variation du rapport $S= s/h_1$ en fonction de $\alpha = (s/h_1)_{appr}$ tourne au tour de la première bissectrice ce qui confirme la validité de la relation généralisé :

$$\alpha = (0.371x+1.339) Fr_1+ (-1.138x-2.348).$$

L'erreur ΔS entre les résultats expérimentaux du rapport $S= s/h_1$ est la fonction α est donnée par le tableau suivant :

Tableau (2.3) : L'erreur ΔS entre les résultats expérimentaux du rapport $S = s/h_1$ est la fonction α .

Position X	s/h ₁	Fr	α	$\Delta S = (s/h_1 - \alpha) / s/h_1$
3	0,21	2,42	0,17	0,17
3	0,52	2,56	0,52	0,00
3	0,81	2,68	0,81	0,00
3	0,98	2,73	0,93	0,04
4	0,28	2,56	0,33	0,19
4	0,59	2,66	0,60	0,02
4	0,77	2,75	0,87	0,12
4	1,03	2,83	1,08	0,05
4,6	0,28	2,58	0,28	0,02
4,6	0,63	2,66	0,53	0,16
4,6	0,86	2,77	0,84	0,02
4,6	1,14	2,84	1,07	0,06
6	0,24	2,63	0,20	0,14
6	0,45	2,71	0,49	0,08
6	0,97	2,87	1,04	0,07
6	1,21	2,90	1,16	0,04

II.4.1.2. Variation de la Position relative du seuil X= (x/h₂) en fonction du nombre du Froude Fr₁ incident (Centre du canal) :

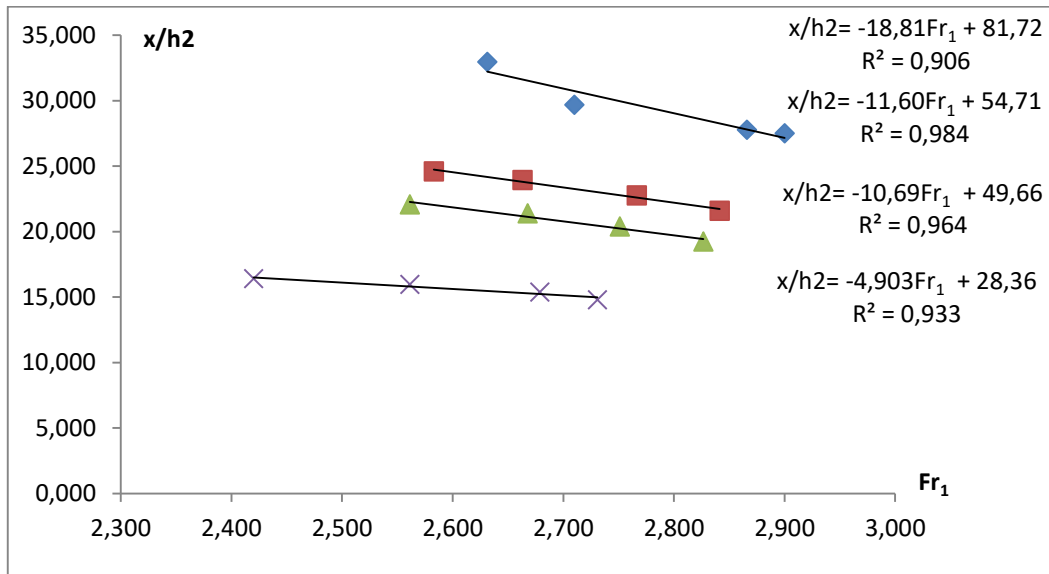


Figure (2.5) : Variation du rapport x/h₂ du seuil en fonction du nombre de Froude Fr₁
(-) courbes d'ajustement.

La figure (2.5) représente quatre nuages de points correspondant chacun à une position (x) du seuil, l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à quatre relations linéaires d'équations linéaires suivantes :

$$x/h_2 = -4,903 Fr_1 + 28,36 \quad R^2 = 0,933 \quad \text{pour } 2,42 \leq Fr_1 \leq 2,73 \quad (x=3) \quad (3.1)$$

$$x/h_2 = -10,69 Fr_1 + 49,66 \quad R^2 = 0,964 \quad \text{pour } 2,56 \leq Fr_1 \leq 2,83 \quad (x=4) \quad (3.2)$$

$$x/h_2 = -11,60 Fr_1 + 54,71 \quad R^2 = 0,984 \quad \text{pour } 2,54 \leq Fr_1 \leq 2,84 \quad (x=4.6) \quad (3.3)$$

$$x/h_2 = -18,81 Fr_1 + 81,72 \quad R^2 = 0,906 \quad \text{pour } 2,63 \leq Fr_1 \leq 2,90 \quad (x=6) \quad (3.4)$$

Par ailleurs, on remarque qu'au fur et à mesure que le nombre de Froude **Fr₁** augmente, le rapport de la hauteur relative du seuil **X= x/h₂** diminue.

Les valeurs expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.5) sont consignés dans le tableau (2.4).

Tableau (2.4) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.5)

Fr ₁	x/h ₂	Fr ₁	x/h ₂	Fr ₁	x/h ₂	Fr ₁	x/h ₂
2,42	16,49	2,56	22,29	2,58	24,78	2,63	32,25
2,45	16,35	2,60	21,87	2,60	24,55	2,65	31,87
2,50	16,10	2,65	21,33	2,65	23,97	2,70	30,93
2,55	15,86	2,70	20,80	2,70	23,39	2,75	29,99
2,60	15,61	2,75	20,26	2,75	22,81	2,80	29,05
2,65	15,37	2,80	19,73	2,80	22,23	2,85	28,11
2,70	15,12	2,83	19,41	2,84	21,77	2,90	27,17
2,73	14,97	/	/	/	/	/	/

Tableau (2.5) : coefficient des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de relations liants x/h₂ au nombre de Froude Fr₁ pour différentes positions x du seuil.

Position du seuil X	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient R ²
3	-4,903	28,36	0.933
4	-10,69	49,66	0.964
4,6	-11,6	54,71	0.984
6	-18,81	81,72	0.906

La figure (2.6) montre que les points expérimentaux s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$a = -4.507x + 8.332 \quad R^2 = 0,982 \quad 3 \leq x \leq 6 \quad (3.5)$$

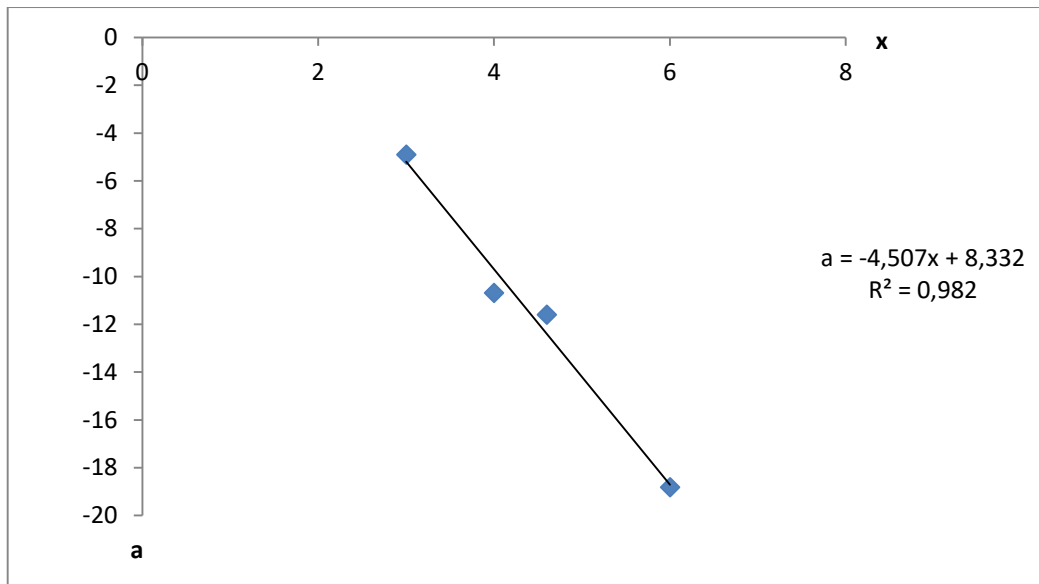


Figure (2.6) : Variation du coefficient **a** en fonction de la position **x** du seuil.
(—) courbe d'ajustement.

La figure (2.7) montre que les points expérimentaux s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$b = 17,4 x - 22,94 \quad \text{pour} \quad 3 \leq x \leq 6 \quad (3.6)$$

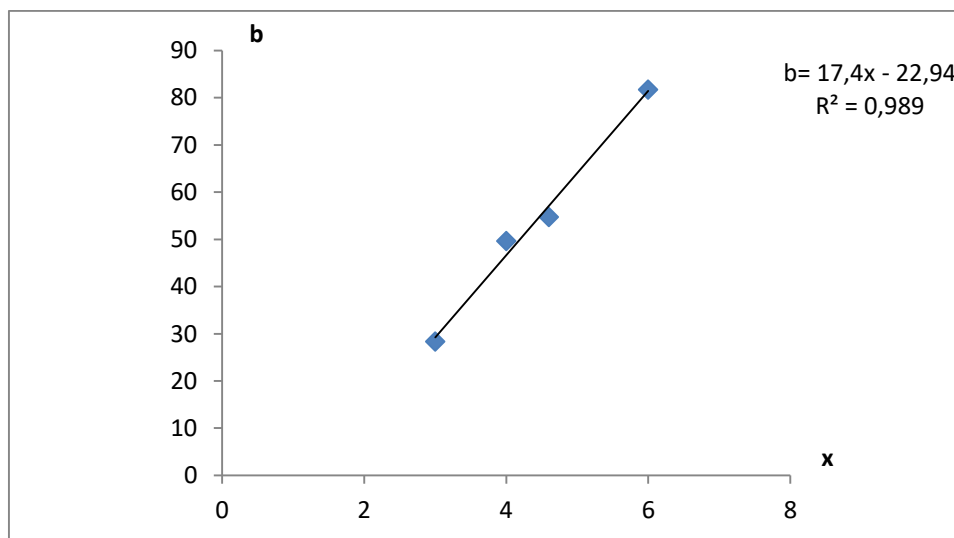


Figure (2.7) : Variation du coefficient **b** en fonction de la position **x** du seuil.
(—) courbe d'ajustement.

La relation linéaire traduisant la variation de x/h_2 en fonction de Fr_1 et de la position x du seuil, est la suivante :

$$\beta = (- 4.507x + 8.332) Fr_1 + (17.4 x - 22.94) \quad (3.7)$$

Pour une gamme du nombre de Froude $2.42 \leq Fr_1 \leq 2.9$

La représentation graphique des points de mesure et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure (2.8)

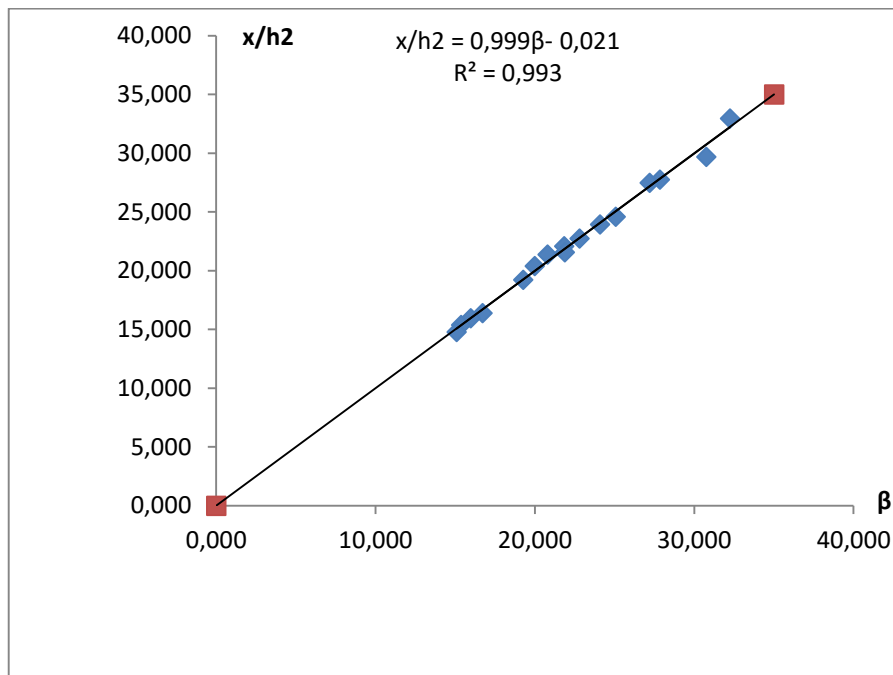


Figure (2.8) : Variation du rapport $X = x/h_2$ en fonction de $\beta = (-4.507x + 8.332) Fr_1 + (17.4x - 22.94)$ (—) première bissectrice, (—) droite d'ajustement d'équation $x/h_2 = 0.999\beta - 0.021$.

D'après la figure (2.8) on remarque que le nuage de points représentant la variation *du* rapport $X = x/h_2$ en fonction de $\beta = (X)_{appr}$ tourne au tour de la première bissectrice ce qui confirme la validité de la relation généralisé :

$$\beta = (-4.507x + 8.332) Fr_1 + (17.4x - 22.94)$$

L'erreur ΔX entre les résultats expérimentaux du rapport $X = x/h_2$ est la fonction β est donnée par le tableau suivant :

Tableau (2.6) : L'erreur ΔX entre les résultats expérimentaux du rapport $X = x/h_2$ est la fonction β .

x	x/h₂	Fr	β	$\Delta X = (x/h_2 - \beta) / x/h_2$
3	16,390	2,420	16,702	0,019
3	15,956	2,561	15,970	0,001
3	15,385	2,679	15,360	0,002
3	14,777	2,731	15,091	0,021
4	22,082	2,561	21,827	0,012
4	21,388	2,668	20,793	0,028
4	20,392	2,751	19,985	0,020
4	19,231	2,827	19,254	0,001
4,6	24,599	2,583	25,071	0,019
4,6	23,942	2,663	24,077	0,006
4,6	22,758	2,766	22,796	0,002
4,6	21,588	2,841	21,866	0,013
6	32,963	2,631	32,228	0,022
6	29,685	2,710	30,755	0,036
6	27,762	2,866	27,838	0,003
6	27,503	2,900	27,201	0,011

II.4.1.3. Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident (coté plus profond du canal):

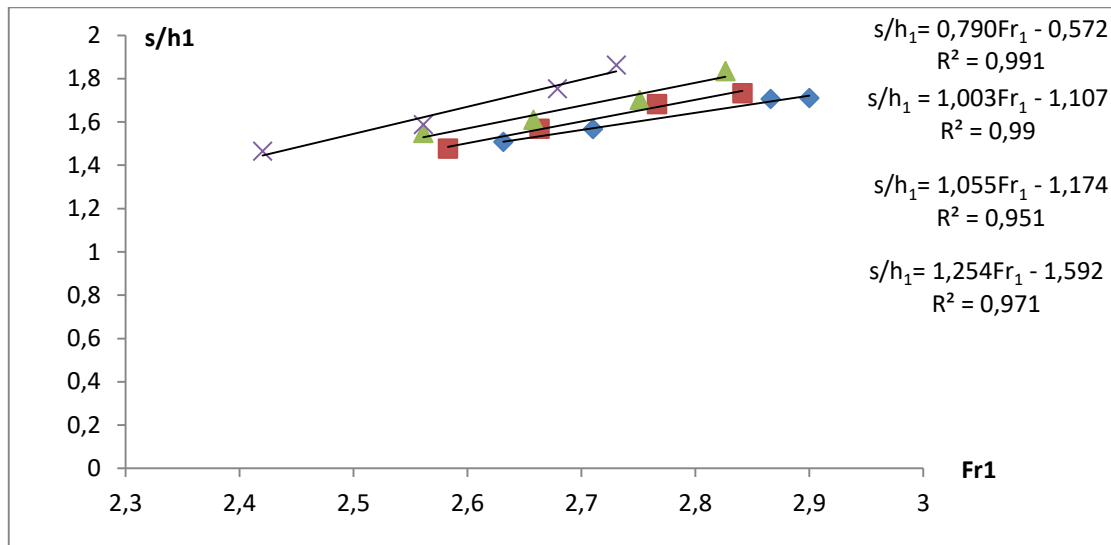


Figure (2.9): Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident (coté plus profond du canal).

La figure (2.9) représente quatre nuages de points correspondant chacun à une position (x) du seuil, l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à quatre relations d'équations linéaires suivantes :

$$s/h_1 = 1.254 Fr_1 - 1.592 \quad R^2 = 0,971 \quad \text{pour } 2.42 \leq Fr_1 \leq 2.73 \quad (x=3) \quad (3.1)$$

$$s/h_1 = 1.055 Fr_1 - 1.174 \quad R^2 = 0,951 \quad \text{pour } 2.56 \leq Fr_1 \leq 2.83 \quad (x=4) \quad (3.2)$$

$$s/h_1 = 1.003 Fr_1 - 1.107 \quad R^2 = 0,99 \quad \text{pour } 2.58 \leq Fr_1 \leq 2.84 \quad (x=4.6) \quad (3.3)$$

$$s/h_1 = 0.790 Fr_1 - 0.572 \quad R^2 = 0,983 \quad \text{pour } 2.63 \leq Fr_1 \leq 2.90 \quad (x=6) \quad (3.4)$$

Par ailleurs, on remarque qu'au fur et à mesure que le nombre de Froude Fr_1 augmente, le rapport de la hauteur relative du seuil s/h_1 augmente.

Les valeurs expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.9) sont consignés dans le tableau (2.7).

Tableau (2.7) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.9)

Fr	s/h1	Fr	s/h1	Fr	s/h1	Fr1	s/h1
2,42	1,44	2,56	1,53	2,58	1,48	2,63	1,51
2,45	1,48	2,60	1,57	2,60	1,50	2,65	1,52
2,50	1,54	2,65	1,62	2,65	1,55	2,70	1,56
2,55	1,61	2,70	1,67	2,70	1,60	2,75	1,60
2,60	1,67	2,75	1,73	2,75	1,65	2,80	1,64
2,65	1,73	2,80	1,78	2,80	1,70	2,85	1,68
2,70	1,79	2,83	1,81	2,84	1,74	2,90	1,72
2,73	1,83						

Tableau (2.8) : coefficient des relations expérimentales de type linéaire, issues de L'ajustement de relations liants s/h₁ au nombre de Froude Fr₁ pour différentes positions x du seuil.

Position (x)	Coefficient (a)	Coefficient (b)	Coefficient (R ²)
3	1,254	-1,592	0,971
4	1,055	-1,174	0,951
4,6	1,003	-1,107	0,99
6	0,79	-0,572	0,991

La figure (2.10) montre que la variation du paramètre a en fonction de position du seuil x est parfaitement une loi linéaire l'on peut écrire comme suite :

$$a = -0.151 x + 1,690 \quad R^2 = 0.987 \quad \text{pour} \quad 3 \leq x \leq 6 \quad (3.5)$$

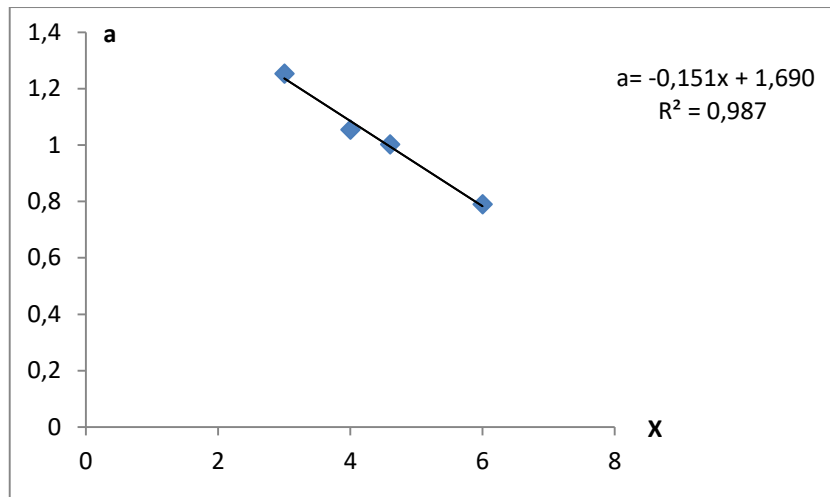


Figure (2.10) : Variation du coefficient **a** en fonction de la position **x** du seuil.

(—) courbe d'ajustement.

La figure (2.11) montre que la variation du paramètre **b** en fonction de position du seuil **x** est parfaitement une loi linéaire l'on peut écrire comme suite :

$$b = 0.330x - 2.567 \quad R^2 = 0.982 \quad \text{pour} \quad 3 \leq x \leq 6 \quad (3.6)$$

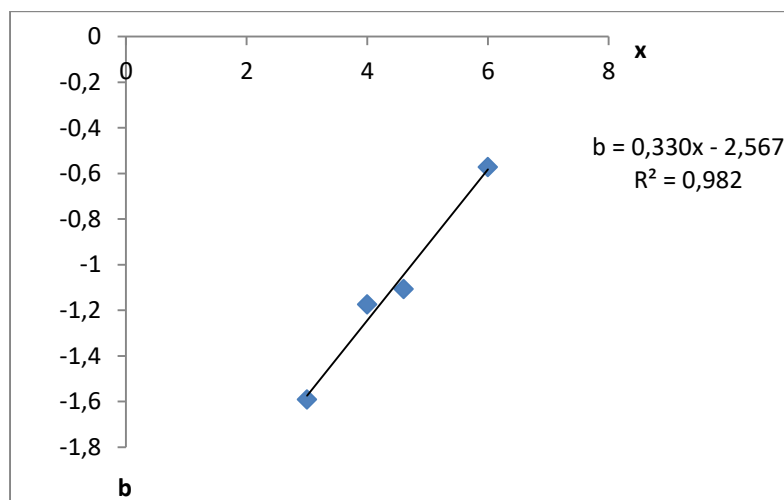


Figure (2.11) : Variation du coefficient **b** en fonction de la position **x** du seuil.(—) courbe d'ajustement.

La relation linéaire traduisant la variation de s/h_1 en fonction de Fr_1 et de la position x du seuil, est la suivante :

$$Z = (-0.151x + 1.690)Fr_1 + (0.330x - 2.567) \quad (3.7)$$

Pour une gamme du nombre de Froude $2.42 \leq Fr_1 \leq 2.90$

La représentation graphique des points de mesure et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure (2.12)

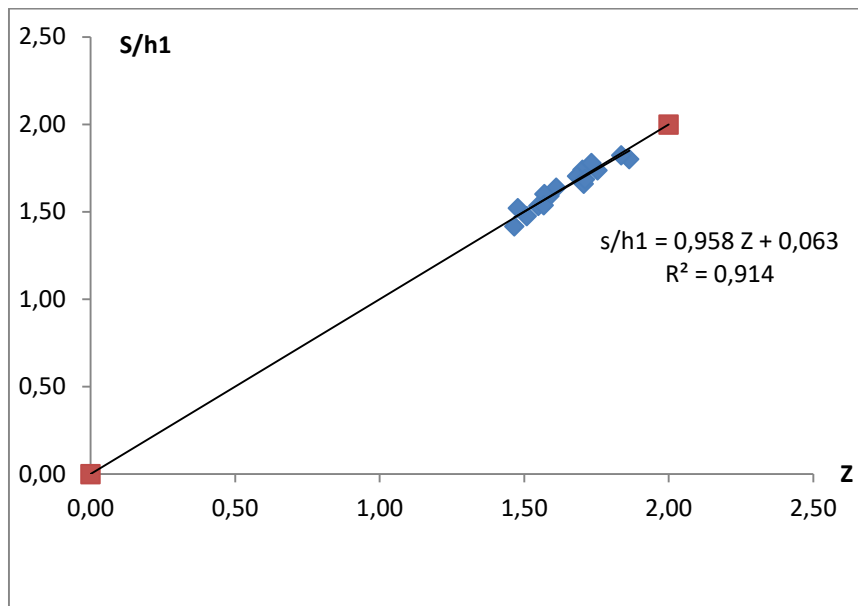


Figure (2.12) : Variation du rapport $\lambda_j = s/h_1$ en fonction de $\alpha = (-0.151x + 1,690) Fr_1 + (0.330-2.567)$ (—) première bissectrice, (—) droite d'ajustement d'équation $s/h_1 = 0.958Z + 0.063$.

D'après la figure (2.12) on remarque que le nuage de points représentant la variation du rapport $S = s/h_1$ en fonction de $Z = (S)_{app}$ tourne au tour de la première bissectrice ce qui confirme la validité de la relation généralisé :

$$Z = (-0.151x + 1.690) Fr_1 + (0.330x - 2.567).$$

L'erreur ΔS entre les résultats expérimentaux du rapport $S = s/h_1$ est la fonction Z est donnée par le tableau suivant :

Tableau (2.9) : L'erreur ΔS entre les résultats expérimentaux du rapport $S = s/h_1$ est la fonction Z .

x	s/h_1	Fr_1	Z	$\Delta S = (s/h_1 - Z)/s/h_1$
3	1,47	2,42	1,42	0,03
3	1,59	2,56	1,59	0,00
3	1,75	2,68	1,74	0,01
3	1,86	2,73	1,80	0,03
4	1,55	2,56	1,53	0,01
4	1,61	2,66	1,64	0,02
4	1,70	2,75	1,74	0,02
4	1,84	2,83	1,82	0,01
4,6	1,48	2,58	1,52	0,03
4,6	1,57	2,66	1,60	0,02
4,6	1,68	2,77	1,70	0,01
4,6	1,73	2,84	1,78	0,03
6	1,51	2,63	1,48	0,02
6	1,57	2,71	1,54	0,02
6	1,71	2,87	1,66	0,03
6	1,71	2,90	1,69	0,01

II.5. Conclusion

Ce présent chapitre a été consacré à l'étude expérimentale de l'effet du seuil mince du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique. Dans un premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie pendant les essais. Passant en second temps aux résultats expérimentaux, une seule hauteur initiale h_1 ont été testées (4) seuils s des hauteurs différentes et (4) positions x . Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue. L'étude expérimentale s'est intéressée à la variation de la hauteur relative des seuils $S = (s/h_1)$ ainsi que la position relative du seuil $X = (x/h_2)$ et ceci en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. Des relations fonctionnelles généralisées, ont été obtenues permettant la détermination des caractéristiques étudiées.

Conclusion de la deuxième partie.

A travers cette deuxième partie on a abordé la partie expérimentale de l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique.

Le premier chapitre a été consacré à la description détaillée du modèle expérimental, et la description des différents appareillages des mesures utilisés, qui ont servi de base à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal asymétrique avec convergent triangulaire.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'exposition du problème et à l'analyse expérimentale des résultats obtenus. A travers cette analyse nous avons proposé des relations expérimentales régissant le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique. Dans ce chapitre nous avons analysé l'effet d'un seuil à paroi mince sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique. Les résultats expérimentaux ont montré que le déplacement du seuil vers l'amont peut donner plusieurs configurations du ressaut étudié. Cette influence se traduit par les différents paramètres du ressaut, tel que le rapport des positions relative du seuil $X = x/h_2$, la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$.

D'après les graphiques construits à partir des résultats expérimentaux obtenus on a noté les conclusions suivantes:

1- pour la Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude Fr_1 incident (au niveau du centre du canal):

- pour toutes les positions testées, au fur et à mesure que le nombre de Froude Fr_1 augmente, le rapport de la hauteur relative du seuil s/h_1 augmente.

On remarque également que pour le même nombre de Froude, la valeur de s/h_1 augmente proportionnellement avec la position du seuil.

- La relation linéaire traduisant la variation de s/h_1 en fonction de Fr_1 et de la position x du seuil, est la suivante :

$$s/h_{1(app)} = \alpha = (0.371 x + 1.339) Fr_1 + (-1.138x - 2.348)$$

2- pour la variation de la position relative du seuil $X = (x/h_2)$ en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident (Centre du canal) :

- Au fur et à mesure que le nombre de Froude Fr_1 augmente, le rapport de la hauteur relative du seuil x/h_2 diminue.
- La relation linéaire traduisant la variation de x/h_2 en fonction de Fr_1 et de la position x du seuil, est la suivante :

$$x/h_{2(app)} = \beta = (-4.507x + 8.332) Fr_1 + (17.4x - 22.94)$$

3-Pour la variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre du Froude fr_1 incident (coté plus profond du canal):

- Au fur et à mesure que le nombre de Froude Fr_1 augmente, le rapport de la hauteur relative du seuil s/h_1 augmente.
- La relation linéaire traduisant la variation de s/h_1 en fonction de Fr_1 et de la position x du seuil, est la suivante :

$$s/h_{1(app)} = Z = (-0.151x + 1.690) Fr_1 + (0.330x - 2.567)$$

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 de 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.

LISTE DES FIGURES

Première partie

Chapitre I :

Figure 1.1 : Ressaut hydraulique.....	2
Figure 1.2: Type de ressaut hydraulique plans pour divers domaine du nombre de Froude F_1 (Chow 1959).....	4
Figure 1.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut.....	4
Figure (1.4) : Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828)Hager et Sinniger (1986), ont donné une relation plus simple que la relation (1.6) et applicable pour un nombre de Froude $F_1 > 3$	6
Figure 1.5 : hauteur du ressaut.....	7
Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique a) Rouleau développé, b) Rouleau non développé.....	7
Figure 1.7 : Représentation de la Ligne de charge totale le long du ressaut Classique.....	10
Figure 1.8 : Rendement n du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 (—) Courbe tracée selon la relation (1.25), () courbe tracée Selon la relation (1.26).....	11
Figure 1.9: Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.....	12
Figure 1.10 : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince quelques valeurs de x/h_2 ,selonForster et skrinde(1950).....	13
Figure 1.11: Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.....	14
Figure 1.12: Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde(1950).Courbe tracé selon la relation la relation (1.30).....	15
Figure 1.13 : cas typique d'écoulement divisée en trois classes selon rand (1959).....	16

Figure 1.14 : Hauteurs conjuguées $h_2/h_1 = f(S, K)$ pour $F_1 = 9$. Valeurs et courbes expérimentales : (----) limite d'influence de l'aval sur l'amont.....17

ChapitreII

Figure 2.1 : hauteur conjuguées $Y=h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M=mh_1/b$20

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$21

Figure 2.3 : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale.....23

Figure 2.4 :Schéma de définition du ressaut hydraulique.....23

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. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire.....25

Figure 2.6:Section transversale du canal.....26

Figure 2.7 : Section de la bande longitudinale.....28

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.....30

Figure 2.9 : Diagramme adimensionnel du taux de changement de M sur le côté peu profond.....31

Figure 2.10: Schéma général d'écoulement.32

Figure 2.11: Modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la propagation positive du ressaut dans un canal composé prismatique ($d_1/D < 1$).....34

Figure 2.12:Modèle de la section transversale du canal - A gauche: en regardant vers l'amont.....35

Figure 2.13: Photographie de l'installation expérimentale en aval.....36

Chapitre III

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.....38

Figure 3.2 : contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour $X=L_j$38

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).....39

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).....40

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, (\diamond) 1,15, (o) 1,45, (•) 1,93. (—) Courbes d'ajustements.....40

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$41

Deuxième partie

Chapitre I :

Figure 1.1: Schéma simplifié d'ensemble du dispositif expérimental.....47

Figure 1.2: Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnométrique.....52

Figure 1.3: Courbe expérimentale de la relation $Q = f(\Delta h)$53

Figure 1.4 : Variation de débit expérimentale $Q(\text{appr})$ en fonction du débit approché $Q(\text{exp})$ issue de l'équation (1.1) ,(●) Point expérimentaux .(—) Première bissectrice d'équation : $Q(\text{appr}) = Q(\text{exp})$54

Chapitre II

- Figure 2.1:** Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident (au niveau du centre du canal).....57
- Figure 2.2 :** Variation du coefficient a en fonction de la position x du seuil.
(—) courbe d'ajustement.....59
- Figure 2.3 :** Variation du coefficient b en fonction de la position x du seuil.
(—) courbe d'ajustement..... 59
- Figure 2.4 :** Variation du rapport $S= s/h_1$ en fonction de
 $\alpha = (0.371x + 1,339) Fr_1 + (-1.138x-2.348)$ (—) première bissectrice, (—) droite
d'ajustement d'équation $s/h_1=0.989\alpha+0.008$ 60
- Figure 2.5 :** Variation du rapport x/h_2 du seuil en fonction du nombre de Froude Fr_1
(-) courbes d'ajustement..... 62
- Figure 2.6:** Variation du coefficient a en fonction de la position x du seuil.
(—) courbe d'ajustement..... 64
- Figure 2.7 :** Variation du coefficient b en fonction de la position x du seuil.
(—) courbe d'ajustement.....64
- Figure 2.8 :** Variation du rapport $X= x/h_2$ en fonction de
 $\beta = (-4.507x+8.332) Fr_1 + (17.4x-22.94)$. (—) première bissectrice, (—) droite
d'ajustement d'équation $x/h_2=0.999\beta - 0.021$65
- Figure 2.9:** Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident (coté plus profond du canal)..... 67
- Figure 2.10 :** Variation du coefficient a en fonction de la position x du seuil.
(—) courbe d'ajustement..... 69
- Figure 2.11 :** Variation du coefficient b en fonction de la position x du seuil.(—) courbe
d'ajustement.....69
- Figure 2.12 :** Variation du rapport $S= s/h_1$ en fonction de
 $\alpha = (-0.151x + 1,690) Fr_1 + (0.330-2.567)$ (—) première bissectrice, (—) droite
d'ajustement d'équation $s/h_1=0.958Z+0.063$70

LA LISTE DE PHOTOGRAPHIE

Deuxième partie

Chapitre I :

Photographie 1.1 : modèle du canal expérimentale.....	47
Photographie 1.2 : pompe centrifuge axiale.....	48
Photographie 1.3 : bassin de restitution.....	48
Photographie 1.4 : plaque métallique coulissante.....	48
Photographie 1.5 : convergence du canal.....	49
Photographie 1.6 : Photographie d'une vanne.....	49
Photographie 1.7 : manomètre différentiel gradué.....	50
Photographie 1.8 : les seuils minces testés.....	50
Photographie 1.9 : Limnimètre.....	51
Photographie 1.10 :débitmètre à diaphragme.....	52

LA LISTE DES TABLDAU

Deuxième partie

Chapitre I :

Tableau 1.1 : Valeurs de mesure expérimental des débits par étalonnage.....53

Chapitre II

Tableau 2.1 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.1).....58

Tableau 2.2 : coefficient des relations expérimentales de type linéaire, issues de
L'ajustement de relations liants s/h_1 au nombre de Froude Fr_1 pour différentes
positions x du seuil.....58

Tableau 2.3 : L'erreur ΔS entre les résultats expérimentaux du rapport $S = s/h_1$ est la fonction
 α61

Tableau 2.4 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.5).....63

Tableau 2.5 : coefficient des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement
de relations liants x/h_2 au nombre de Froude Fr_1 pour différentes positions x du
seuil.....63

Tableau 2.6 : L'erreur ΔX entre les résultats expérimentaux du rapport $X = x/h_2$ est la
fonction β66

Tableau 2.7: Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.9).....68

Tableau 2.8: coefficient des relations expérimentales de type linéaire, issues de
L'ajustement de relations liants s/h_1 au nombre de Froude Fr_1 pour différentes
positions x du seuil (coté du canal plus profonde).....68

Tableau 2.9: L'erreur ΔS entre les résultats expérimentaux du rapport $S = s/h_1$ est la fonction Z ...71

PRINCIPALES NOTATIONS

A1	L'aire de la section mouillée initiale	[m ²]
A2	L'aire de la section mouillée finale	[m ²]
B	La grande base du canal trapézoïdal	[m]
b	La petite base du canal trapézoïdal	[m]
D	Diamètre	[m]
F1	Nombre de Froude incident	[-]
g	Accélération de la pesanteur	[m/s ²]
G	Poids de la tranche liquide	[N]
h	Hauteur du ressaut	[m]
h1	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h2	Hauteur finale du ressaut	[m]
\bar{h}	Distance entre le centre de gravité de la section transversale et la surface libre de l'écoulement	[m]
h(x)	Profondeur d'eau à la distance x du pied du ressaut	[m]
H	Charge totale	[m]
ΔH	Perte de charge due au ressaut	[m]
LB	Longueur du bassin	[m]
Lj	Longueur du ressaut	[m]
Lr	Longueur du rouleau de surface	[m]
LRF	Longueur du rouleau de fond	[m]
M	La hauteur relative initiale du ressaut $M = (mh1)/b$	[-]

m	Cotangente de l'angle d'inclinaison d'un talus	[-]
Y_F	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut forcé par seuil	[-]
P_1	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	[N]
P_2	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	[N]
Q	Débit volume	[m ³ /s]
q	Débit unitaire	[m ² /s]
s	Hauteur du seuil ou de la marche positive	[m]
S	Hauteur relative du seuil	[-]
V_1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m/s]
V_2	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m/s]
W	Rapport d'aspect $W = h_1/b$	[-]
x	Position de seuil	[m]
X	Position relative de seuil	[-]
x_{rf}	Position de la fin du rouleau de fond à l'aval	[m]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	[-]
β	Facteur de correction de la quantité de mouvement	[-]
α	Angle d'inclinaison du canal	[-]
$\bar{\omega}$	Poids spécifique du liquide	[Kg/m ³]
η	Rendement du ressaut	[-]
γ	Rapport d'occupation	[-]
X0	Ressaut hydraulique correspondant au profile trapézoïdale.	[m]
k	Coefficient de correction du volume du ressaut.	[-]
Re_e	Nombre de Reynolds	[-]

λ_j	Longueur relative du ressaut	[-]
λ_r	Longueur relative du rouleau	[-]
ρ	Masse volumique du liquide	[kg.m ⁻³]
x_o	Largeur de la section transversale	[m]
y_o	Différence entre la profondeur de l'eau dans le fond et les côtés peu profonds	[m]
Y	Profondeur de l'eau dans le coté peu profond	[m]
Y_{are}	Profondeur moyenne	[m]
X_s	Longueur du retour latéral sur le côté peu profond du canal	[m]
X_d	Longueur de retour latéral sur le côté profond du canal	[m]
G	Rapport de la force de pression et de l'écoulement amont et aval	[-]

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUES.

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, 9731022.

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

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

Hager W.H., Li D. (1992). 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.

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.