

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Minister de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et Hydraulique



جامعة محمد خيضر – بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري

Mémoire de Master 2^{ème} année

Option: Ouvrages hydrauliques

THEME:

Etude expérimentale de l'effet de la compacité sur le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique

Etudiant:

Bahri mouadh

Encadré par:

Dr: Cherhabil Sonia

PROMPTION: 2017/2018

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère HARIDI SALIHA qui a si souffert pour me soutenir.

A mon très cher père SALAH Allah Yerhmou.

A mes chères frères Abd El Ghani , Mohamed, El Bahri ,
DjaafarSadek et Heithem Islem.

Et a tous mes amis chaqu'un son nom.

A tous mes amis du lycée filles et garçons.

A toute ma grande famille BAHRI.

A tous mes amis de la promotion 2017/2018 Hydraulique.

A tous les étudiants des l'université de MohamedKhider-Biskra

BAHRI Mouadh

Remerciement

En guise de reconnaissance, je tien à témoigner mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribués de près ou de loin au bon déroulement de ce modeste travail.

Mes sincères gratitudes à Mme CHERHABIL Sonia pour la qualité de son enseignement, ses conseils, ses encouragements et son intérêt incontestable qu'elle porte à nous.

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

Dans l'impossibilité de citer tous les noms, mes sincères remerciements vont à tous ceux et celles, qui de près ou de loin, ont permis par leur conseils et leur compétence la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je n'oserais oublier de remercier tout le corps professoral de département de génie civil et d'hydraulique pour le travail énorme qu'il effectue pour nous offrir les conditions les plus favorables pour le déroulement de nos études.

Résumé

Cette étude se propose d'examiner, par la voie de l'expérimentation, l'effet du rapport des hauteurs conjuguées sur la compacité du ressaut hydraulique dénoyé contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdale asymétrique. Deux grandes parties se sont avérées nécessaires : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux entrepris dans ce domaine ; une seconde partie à caractère expérimental a permis d'obtenir avec des bonnes corrélations des relations empiriques, montrant l'effet du rapport des hauteurs conjuguées sur la compacité du type de ressaut étudié. Les équations obtenues sont représentées en termes adimensionnels, afin de permettre leur utilisation dans la pratique.

Mots clés : Ressaut hydraulique dénoyé, Canal trapézoïdale asymétrique, Seuil mince, Compacité du bassin, Rapport des hauteurs conjuguées, Bassin de dissipation.

ملخص

هذه الدراسة تقترح فحص بالطريقة التجريبية في المختبر تأثير نسبة الارتفاعات الابتدائية الى النهائية ($Y=h_2/h_1$) على انضغاط القفزة المائية الغير مغمورة μ داخل قناة مفتوحة شبه منحرفة الشكل غير متناظرة.

جزئت هذه الدراسة إلى قسمين: القسم الاول ذو طابع نظري يختص بالأبحاث المتعلقة بالأعمال المنجزة في هذا المجال، أما القسم الثاني ذو طابع تجريبي حيث سمح لنا بإيجاد علاقات تجريبية جيدة تظهر أثر نسبة الارتفاعات الابتدائية الى النهائية على انضغاط القفزة المائية الغير مغمورة. العلاقات المحصلة عليها بدون أبعاد وذلك لاستعمالها في الواقع.

الكلمات المفتاحية: القفزة المائية الغير مغمورة، قناة شبه منحرفة الشكل غير متناظرة، عتبة رقيقة، انضغاط الحوض، نسبة الارتفاعات الابتدائية الى النهائية، حوض التبديد.

PREMIERE PARTIE :

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE1	I
--	---

CHAPITRE I :

Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

I.1.Introduction	1
I.2.Définition.....	1
I.3. Ressaut hydraulique dans un canal horizontal ou ressaut hydraulique classique.....	2
I.3.1. types du ressaut classique.....	4
I.3.2. Hauteurs du ressaut.....	6
I.3.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	6
I.3.4. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	9
I.3.5. Longueur du rouleau.....	10
I.3.6. Longueur du ressaut.....	11
I.3.7. Rendement du ressaut.....	12
I.3.8. Profil de surface	15
I.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire.....	18
I.4.1. Approche de Forster et Skrinde (1950).....	18
I.4.1.1. Seuil continu à paroi mince.....	18
I.4.1.2. Seuil continu à paroi épaisse.....	19
I.5. Conclusion.....	21

CHAPITRE II :

Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

II.1 : Symétrique

II.1.1. Introduction	22
II.1.2. Application de l'équation de la quantité de mouvement	23
II.1.3. Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal	24
II.1.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées	24
II.1.3.1.1. Cas particulier du canal rectangulaire	25
II.1.3.1.2. Cas particulier du canal triangulaire	26
II.1.3.2. Longueurs du ressaut	27
II.1.3.3. Rendement	29
II.1.3.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire	30
II.1.3.3.2. Cas du canal triangulaire	30

II.2 : Asymétrique

II.2.1. Introduction : Approche d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954	32
II.2.2.1. Analyse de la section totale	33
II.2.2.2. Analyse de bande longitudinale (volume de contrôle)	34
II.2.2.3. Discussion des résultats	38
II.2.3. Conclusion	40
II.2.4. Conclusion du deuxième chapitre	42

CHAPITRE III :

Etude de la compacité du ressaut hydraulique en canal rectangulaire

III.1. Introduction.....	43
III.2. Hauteur relative du seuil.....	43
III.3. Rapport des hauteurs conjuguées.....	44
III.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées pour $\gamma \leq 0,9$	44
III.3.2. Rapport des hauteurs conjuguées pour $\gamma > 0,9$	45
III.4. Conclusion.....	47

DEUXIEME PARTIE

Etude expérimental

CHAPITRE I :

Introduction à la Deuxième Partie	49
I. Description du modèle expérimental	
I.1. Introduction.....	50
I.2. Description du dispositif expérimental.....	50
I.3Appareillage de mesures.....	54
I.3.1. Débitmètre à diaphragme	54
I.3.1.1 Technique de mesure de débit.....	55
I.3.1.2 Vérification de la validité de la relation (1.1).....	57
I.3.2. Linnimètre.....	58
I.4 Les seuils minces.....	61
1.5 Conclusion.....	62

CHAPITRE II :

II. Etude et résultats expérimentale	
II.1.Introduction	63
II.1.2.procédé de détermination du débit volume Q	63
II.2.Description des essais	63
II.2.1. Procédure expérimentale	63
II.3.Analyse des résultats expérimentaux	66
II.3.1. Etude expérimentale du ressaut contrôlé dans un canal trapézoïdal asymétrique contrôlé par seuil mince	66
II.3.1.1. variation du rapport des hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude incident Fr_1	66
II.3.2 Etude expérimentale de l'effet de la compacité(y) sur le rapport des hauteurs conjuguée ($Y=h_2/h_1$)	71
II.3.2.1. variation de la longueur relative du retour latéral du courant en fonction du nombre Froude Fr_1	71
II.3.2.1. variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude Fr_1	72
II.4.Conclusion	75

INTRODUCTION GENERAL

INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine des constructions hydrauliques, il est souvent question de restituer l'eau d'un ouvrage hydraulique vers un cours d'eau. Un ouvrage hydraulique, tel qu'un barrage, est muni d'un déversoir pour laisser passer les débits de crues que la retenue ne peut accumuler. Au pied de ce barrage se situe un bassin amortisseur, conçu pour être le siège de la dissipation d'énergie. Un changement de régime de l'écoulement intervient alors dans le dissipateur : à son entrée, le régime est torrentiel, à sa sortie il est fluvial ; cette transition s'appelle ressaut hydraulique. Pour contrôler et stabiliser la position dans le bassin, la disposition d'un seuil en travers de l'écoulement est souhaitable.

Le ressaut hydraulique a fait l'objet de nombreuses études, aussi bien théoriques qu'expérimentales. C'est surtout le canal rectangulaire qui a attiré l'attention de nombreux chercheurs, en raison sans doute de sa simplicité géométrique et de la facilité de sa mise en œuvre. L'expérimentation a montré qu'en règle générale, le ressaut est bien régi par l'équation de la quantité de mouvement quel que soit la forme du canal considéré. Cette équation a pour but de déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique évoluant dans des profils prismatiques tel que le canal rectangulaire.

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse **Forster et Skinde (1950) ; Achour (1997)**, continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative **Hager et Sinniger (1985)**. Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau aval, de contrôler sa position lors des changements des paramètres de l'écoulement et contribuent enfin à une meilleure compacité du bassin amortisseur **Bretz (1987) ; Hager et Li (1992)**.

Récemment plusieurs chercheurs ont abordé la question du ressaut hydraulique d'un point de vue théorique et appliqué, les plus importants et les plus récents d'entre eux sont certainement **Hager et Sinniger (1990), Hager et Bretz (1987) et Rajaratnam (2002)** qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal, **Hager et Wanoschek (1987), Achour et Debabeche (2003)** et **Debabeche et Achour (2007)** dont les travaux sont relatifs au ressaut triangulaire horizontal. Par ailleurs, **(Rajaratnam, 1966 ; Mc Corcodal, 1994 ; Pagliara. S. et Peruginelli, 2000 ; Beiram et Chamani, 2006...)** ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné.

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.

*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 sou-chapitre le ressaut hydraulique évoluant dans le canal trapézoïdal asymétrique sera exposé à travers les travaux de **José Vasquez Diaz(1954)**.

Le troisième chapitre s'est intéressé, dans un premier temps, à la de variation la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, pour une valeur donnée du nombre de *Froude* Fr_1 l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

L'étude s'est intéressée, dans un second temps, à la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident.

La deuxième partie de ce mémoire concerne notre étude expérimentale sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique. Notre objectif sera de déterminer

expérimentalement des relations fonctionnelles permettant le calcul aisé des du rapport des hauteurs conjuguées de ce type de ressaut.

PARTIE I

Etude
Bibliographique

CHAPITRE I

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

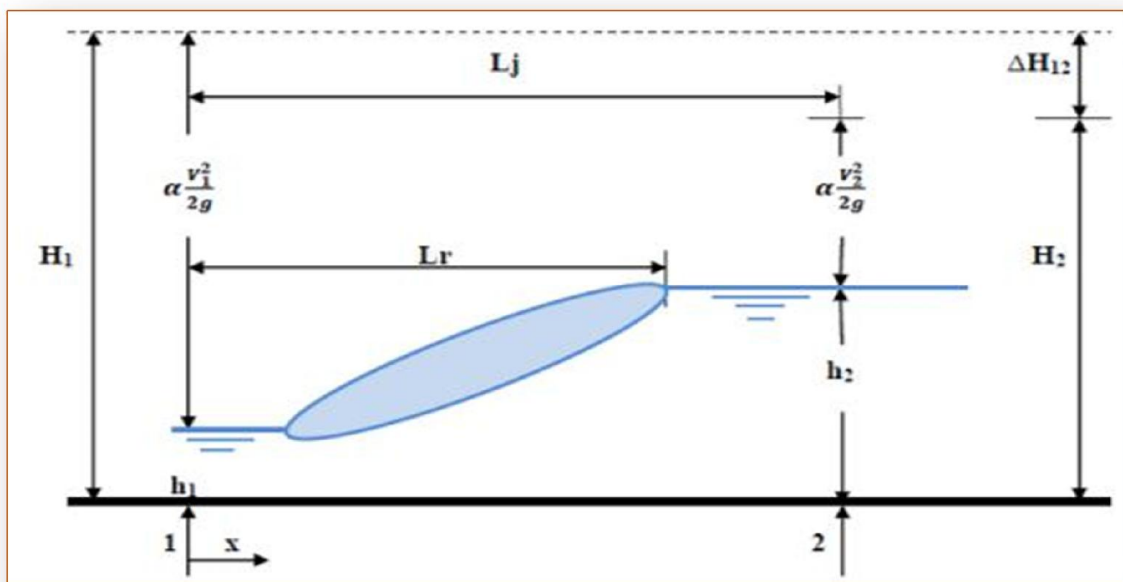


Figure (1.1) : ressaut hydraulique

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 dans un canal horizontal ou ressaut hydraulique classique

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 $\Delta H_{1,2}$, 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 1.2).

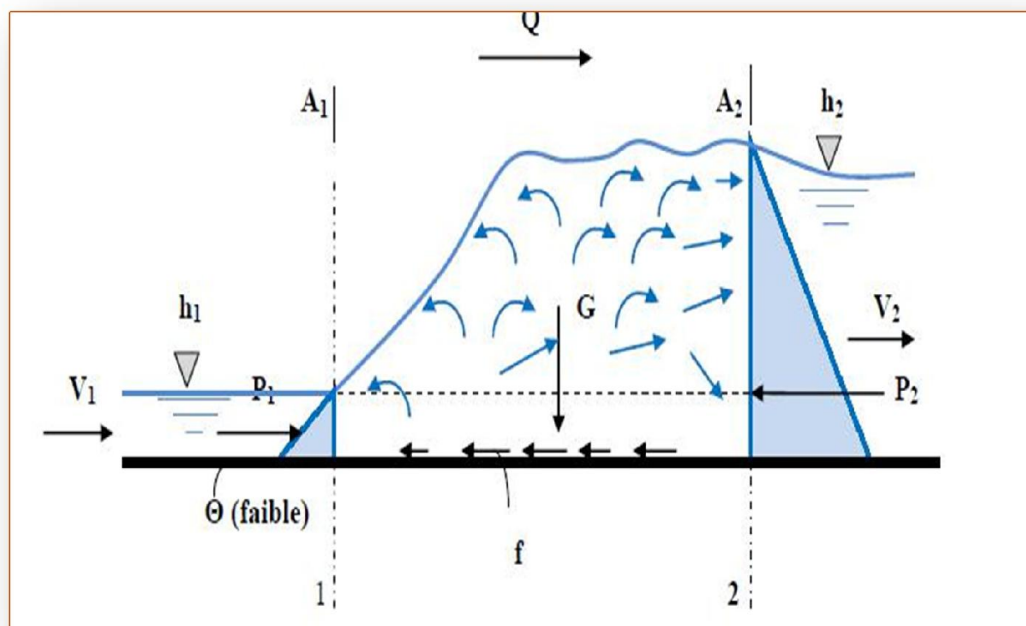


Figure (1.2) : représentation des forces agissantes sur le ressaut

L'équation de continuité permet d'écrire :

$$V1 = Q/A1 \tag{1.1}$$

Où, Q est le débit volume et A1 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 A_1 et A_2 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 :

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

Où :

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

➤ : 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.

➤ θ : angle d'inclinaison du canal (pour un ressaut classique $\theta = 0^\circ$)

➤ f : force de frottement (considérée comme négligeable).

En tenant compte de tous ces paramètres la relation (1. 3) s'écrit :

$$2 \omega \cdot b \cdot h_1^2 + \rho \cdot Q \cdot V_1 = 2 \omega \cdot b \cdot h_2^2 + \rho \cdot Q \cdot V_2 \quad (1.4)$$

Le nombre de *Froude* Fr_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut évoluant dans un canal rectangulaire s'écrit :

$$Fr_1^2 = Q^2 / g.b^2.h_1^3 \quad (1.5)$$

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

$$Y = h_2 / h_1 = 1 / 2[\sqrt{1+8Fr_1^2} - 1]$$

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* Fr_1 , en réalité c'est une équation d'une droite représentée par la figure (1.3).

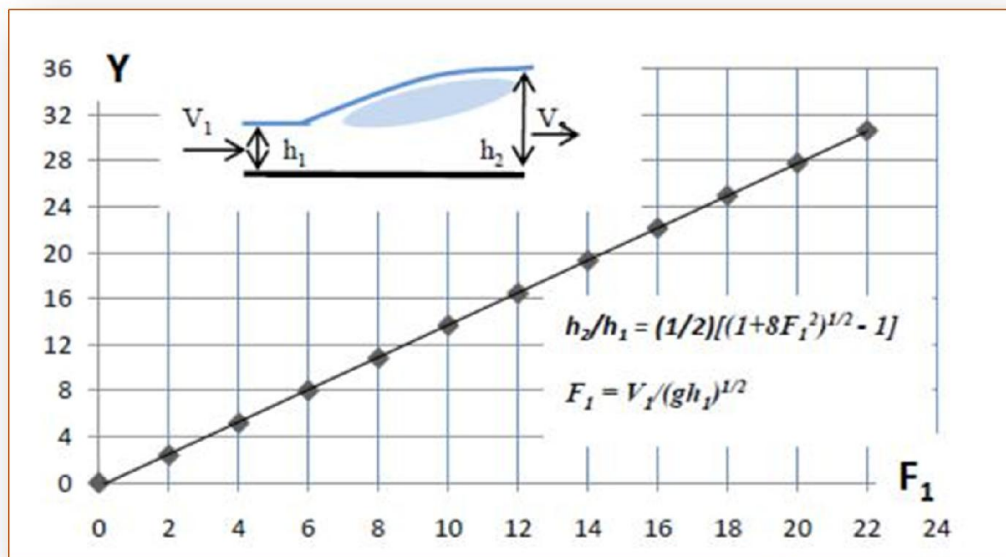


Figure 1.3 : Représentation graphique de l'équation de *Bélanger*(1828)

Beaucoup de recherches ont été menées sur le ressaut hydraulique classique et qui concernent notamment la détermination de ses caractéristiques, de son profil de surface ainsi que sa capacité de dissipation.

I.3.1. types du ressaut classique

Selon la valeur du nombre de Froude amont, Fr_1 , un ressaut peut correspondre à différents types d'écoulement. La figure (1.4), permet d'établir une classification selon l'allure

générale de la surface libre, et ceci selon la nomenclature utilisée par le *U.S. bureau of réclamation*.

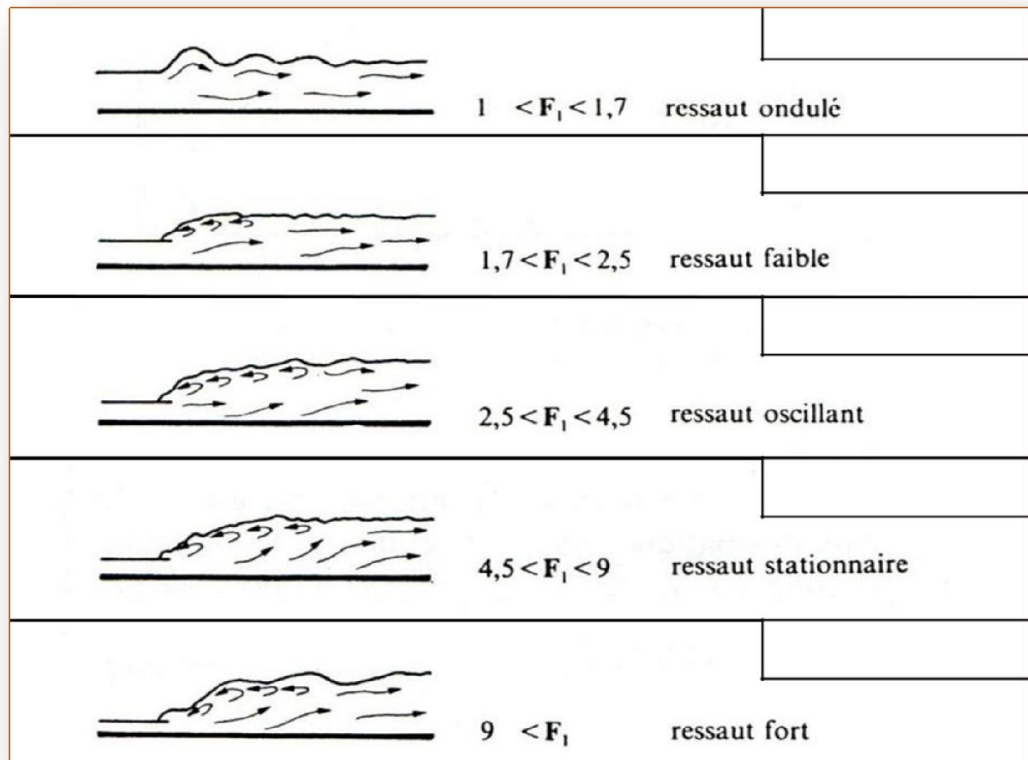


Figure 1.4 : Types de ressauts hydrauliques plans pour divers domaines du nombre de Froude incident Fr_1 .

Pour $1 < Fr_1 < 1,7$, un ressaut ondulé apparaît (figure 1.4.a). 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. (*Anderson 1978*).

Pour $1,7 < Fr_1 < 2,5$, l'apparition du ressaut est encore ondulé (figure 1.4.b), 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 $1 < Fr_1 < 2,5$ est normalement exclu pour les ressauts hydrauliques proprement dits. (*Bradly et Peterka 1957*).

Pour $2,5 < Fr_1 < 4,5$, le ressaut oscillant se présente sous la forme typique (figure 1.4.c). des turbulences fortes se produisent non seulement en surface, mais aussi au fond et cela de manière irrégulière. Ces turbulences peuvent se propager loin à l'aval. (*Bradly et Peterka 1957*).

Pour $4,5 < Fr_1 < 9,5$, le ressaut hydraulique est dit établi ou stationnaire (figure 1.4.d). Il est bien localisé et efficace en terme de dissipation de l'énergie pour son bon rendement (45% et 70%). (Bradly et Peterka 1957).

Pour $Fr_1 > 9$, le ressaut est si fort qu'il devient presque impossible de protéger le dissipateur contre les forces libérées (figure 1.4.e). De plus, l'écoulement prend plutôt l'allure de mousse que d'eau, tant l'entraînement d'air est important. Finalement une forte ondulation de la surface se manifeste à l'aval du ressaut. (Bradly et Peterka 1957)

I.3.2. Hauteurs du ressaut

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

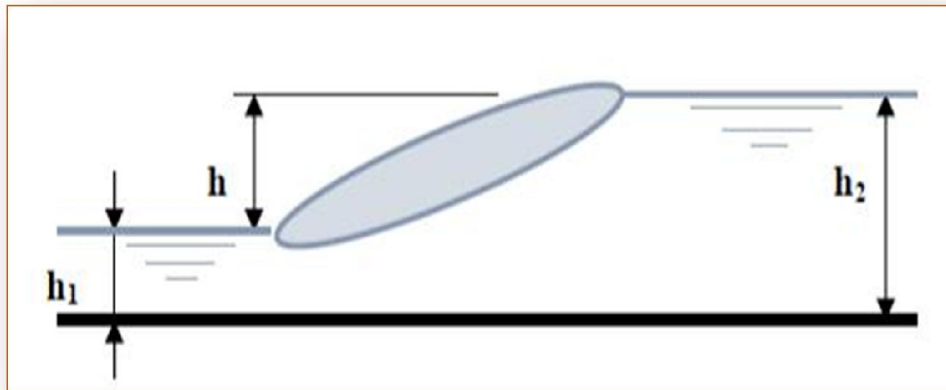


Figure 1.5 : Hauteur du ressaut

I.3.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure (1.6) montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiales et finales 1 et 2.

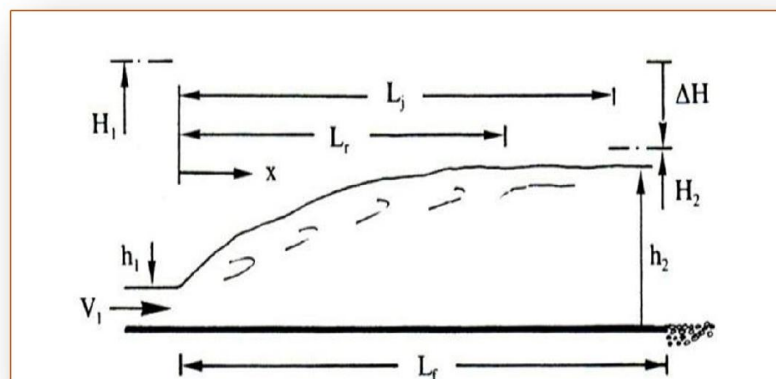


Figure 1.6 : Notations adoptées pour le ressaut hydraulique

Sur fond horizontal en canal prismatique

PARTIE : I
CHAPITRE I : Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

Comme nous l'avons déjà dit (relation (1.1)) le ressaut est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale; c'est en fait la seconde loi de *Newton* qui est appliquée énonçant que la variation de la quantité de mouvement s'opérant entre les sections 1 et 2 est égale à la somme des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement. L'application de cette loi a nécessité quatre hypothèses simplificatrices (comme nous avons citons précédemment) :

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

En outre, en raison du fait que le ressaut évolue dans un canal de pente nulle, la composante tangentielle du poids propre de la masse liquide considérée n'est également nulle.

Ainsi, les forces extérieures appliquées à la masse liquide en mouvement se résument aux forces de pressions hydrostatiques F_1 et F_2 s'exerçant sur la sections 1 et 2. Ces forces s'écrivent :

$$F_1 = \bar{\omega} \bar{h}_1 A_1 \quad (1.7)^1$$

$$F_2 = \bar{\omega} \bar{h}_2^* A_2 \quad (1.7)^2$$

- ω Désigne le poids spécifique du liquide,
- \bar{h}_1 et \bar{h}_2^* sont respectivement la position du centre de gravité des sections A_1 par rapport

— —

à la surface libre de l'écoulement dans ces sections.

On peut ainsi écrire que : $h_1^* = h_1 / 2$ et $h_2^* = h_2 / 2$

(1.8)

Sachant que :

- $\rho.Q.v$ représente la quantité de mouvement.

D'après la relation (1.4) et (1.8) on peut écrire :

$$\bar{\omega}.b.h_1^2/2 + \rho.Q.v_1 = \bar{\omega}.b.h_2^{*2}/2 + \rho.Q.v_2^* \quad (1.9)$$

Où :

- $\omega = \rho.g$, ρ est la masse volumique du liquide.
- g est l'accélération de la pesanteur.

D'après d'équation de *Bélanger* (1828), la relation (1.6) qui permet d'évaluer le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de *Froude* Fr_1 . *Hager* et *Sinniger* (1985) proposent une relation approchée applicable pour les nombres de *Froude* $Fr_1 > 3$:

$$Y^* = h_2/h_1 = \sqrt{2} .Fr_1 - 1/2 \quad (1.10)$$

La relation (1.10) montre ainsi que Y^* et $IF1$ sont linéairement dépendants. Cette relation est représentée graphiquement dans le système d'axes à coordonnées cartésiennes de la figure (1.7)

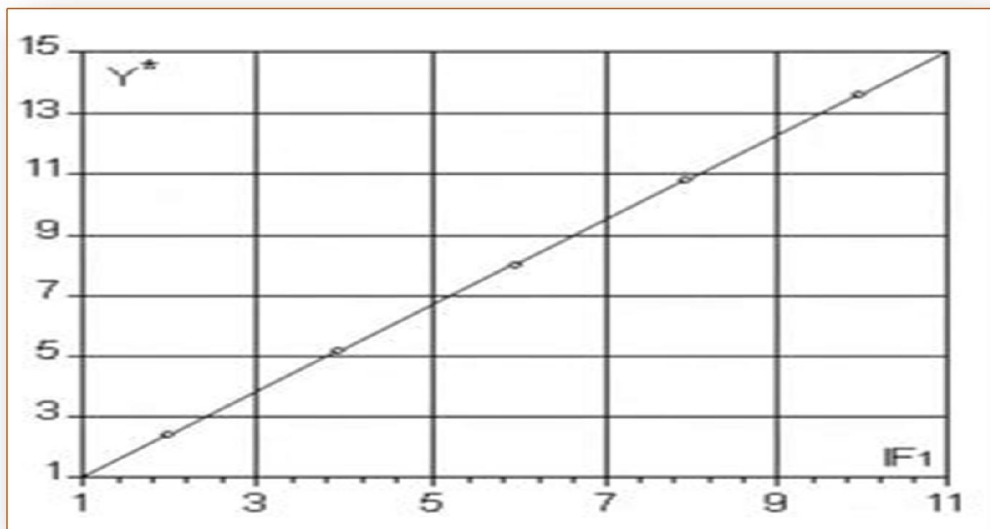


Figure 1.7 : rapport Y^ des hauteurs conjuguées du ressaut classique en fonction du nombre de Froude Fr_1 .*

I.3.4. Longueurs caractéristiques du ressaut

Mises à part les hauteurs conjuguées et l'efficacité d'un ressaut hydraulique, la longueur sur laquelle il se manifeste est importante. Jusqu'à présent, il n'existe que quelques modèles semi-empiriques qui permettent de la quantifier.

Selon les critères appliqués, différentes extensions longitudinales d'un ressaut hydraulique peuvent être considérées (figure.1.8) :

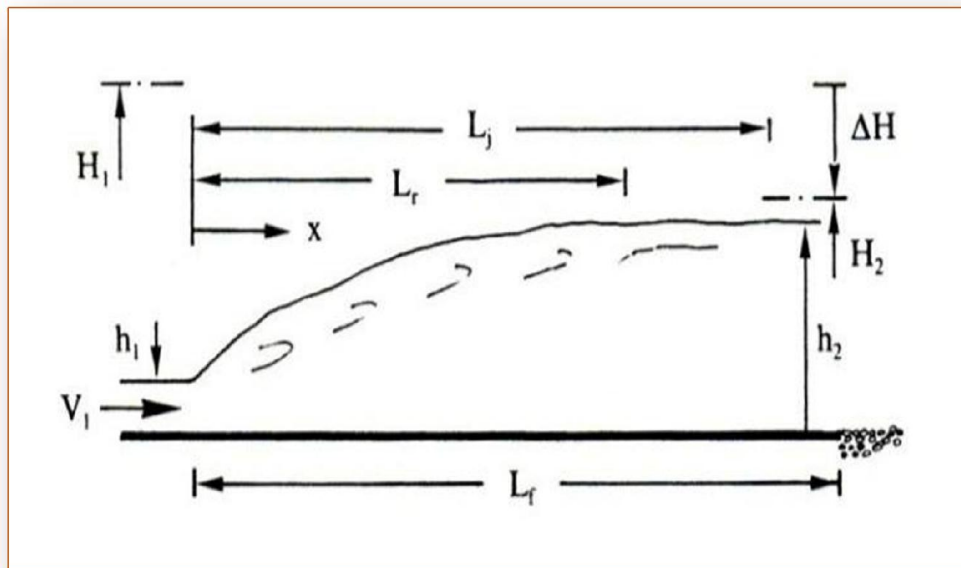


Figure 1.8 : Longueurs caractéristiques du ressaut

- longueur du rouleau L_r^* .
- longueur du ressaut hydraulique L_j^* sur laquelle il s'étend.
- longueur L_f jusqu'à ce que la vitesse V_f auprès du fond et la vitesse moyenne soient à peu près identiques.

Du point de vue de la facilité d'observation, la longueur L_r peut être aisément estimée par des observations expérimentales. Par contre, les deux autres longueurs L_j et L_f (plus grandes que L_r) ne sont pas suffisamment définies. En effet le profil de surface et la répartition verticale des vitesses s'approchent asymptotiquement des valeurs de calcul, h_2 et V_2 . C'est la raison pour laquelle les résultats concernant L_j et L_f divergent considérablement selon différents observateurs. De plus, comme cela a déjà été mentionné, l'écoulement interne du ressaut hydraulique n'est pas un phénomène stationnaire ; par conséquent, des ondes de surface et des fluctuations de vitesse empêchent une détermination exacte des paramètres recherchés.

I.3.5. Longueur du rouleau

En 1990 *Hager et Al* (1990) définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et intro

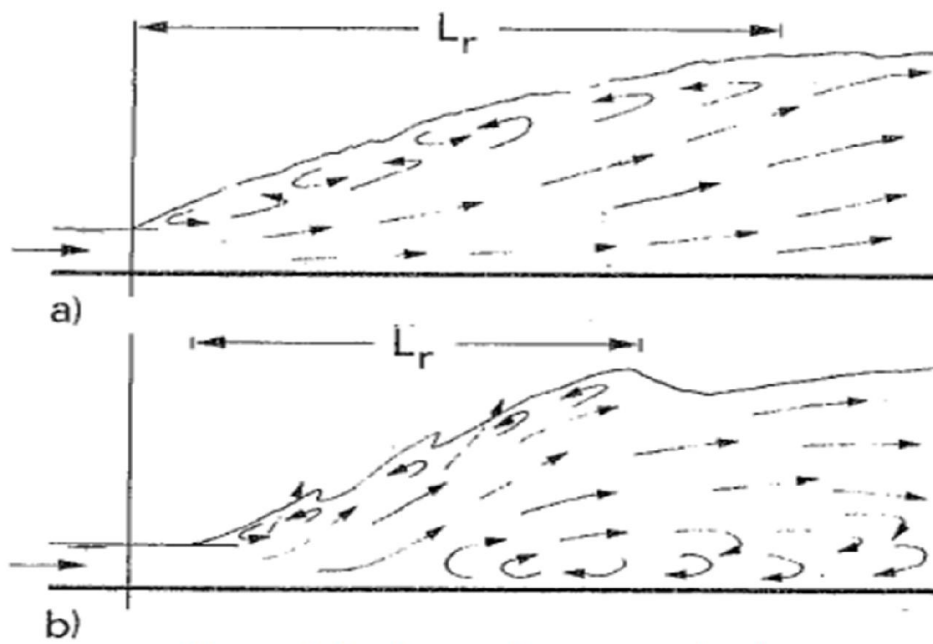


Figure 1.9 : Aspect du ressaut classique.

a) rouleau développé. b) rouleau non développé

En 1990 *Hager et Al* (1990) définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisent ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé. La figure (1.9) montre ces deux types de ressaut et les longueurs L_r qui leur correspondent.

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 Fr_1 et du rapport d'aspect $w=h_1/b$.

Les auteurs proposent les relations suivantes

$$\lambda_r^* = -12 + 160 \operatorname{Tgh} (Fr_1/20) \quad \text{pour } w = h_1 / b < 0,1 \quad (1.11)$$

$$\lambda_r^* = -12 + 100 \operatorname{Tgh} (Fr_1/12,5) \quad \text{pour } 0,1 < w < 0,7 \quad (1.12)$$

λ « Tgh » désigne la tangente hyperbolique.

Les auteurs notent que pour $Fr_1 < 8$, les relations (1.11) et (1.12) peuvent être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

$$\lambda_r^* = L_r^*/ h_1 = 8. (Fr_1 - 1,5) \quad 2,5 < Fr_1 < 8 \quad (1.13)$$

I.3.6. Longueur du ressaut

La seconde caractéristique du ressaut est la longueur L_j^* sur laquelle il s'étend. Comme la longueur du rouleau, L_j^* n'a pas pu être quantifiée que par voie expérimentale et sa définition varie d'un auteur à un autre. En effet, on estime que la longueur L_j^* doit être mesurée toujours par la section à l'aval du ressaut où :

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

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

$$L_j^*/h_1 = 220.Tgh [(Fr_1-1)/22] \quad (1.14)$$

D'après *Hager et Al.* (1990), la variation de la longueur relative L_j^*/h_2^* en fonction du nombre de *Froude* Fr_1 indique que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à 6 pour la gamme pratique, $4 < Fr_1 < 12$. Ce résultat est encore admis de nos jours.

$$L_j^*/h_2^* = 6 \quad (1.15)$$

La figure (1.10) représente les rapports L_r/h_2 et L_j/h_2 en fonction de Fr_1 dans un canal rectangulaire.

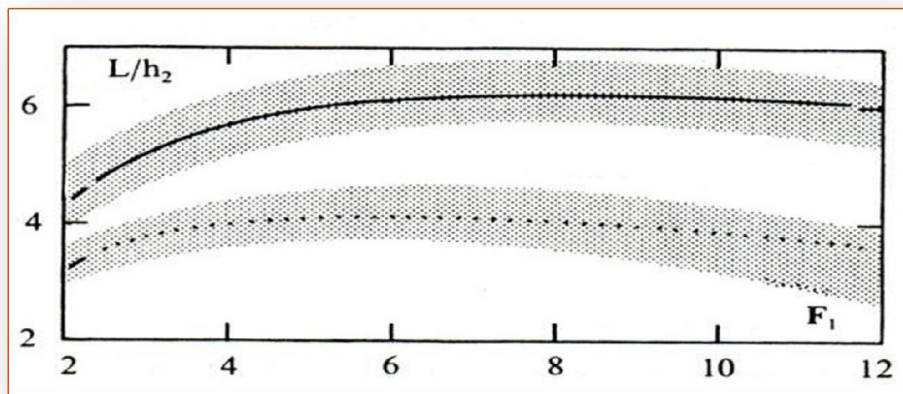


Figure.1.10 : Longueur du rouleau L_r/h_2 et (---) longueur du ressaut L_j/h_2 dans un canal rectangulaire prismatique e fonction de Fr_1 .

I.3.7. Rendement du ressaut

L'intérêt technique du ressaut hydraulique est particulièrement dû à la dissipation d'énergie mécanique qu'il permet de réaliser. La figure (1.11) montre l'alligne de charge totale le long de la longueur L_j sur laquelle s'étend le ressaut

classique.

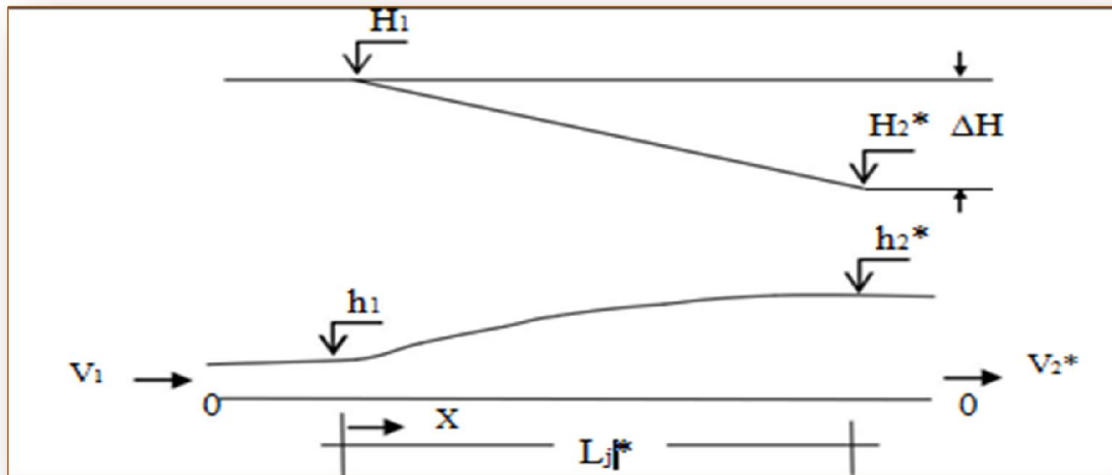


Figure 1.11 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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

$$H_1 = h_1 + \alpha_1 \cdot v_1^2 / (2 \cdot g) \quad (1.16)$$

Tandis que la charge totale dans la section finale est :

$$H_2^* = h_2^* + \alpha_2 \cdot v_2^{*2} / (2 \cdot g) \quad (1.17)$$

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

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

$$\Delta H^* = H_1 - H_2^* \quad (1.18)$$

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

Écrire :

$$Q = v_1.A_1 = v_2^*.A_2^* \quad (1.19)$$

Où :

- $A_1=b.h_1$ et $A_2^*=b.h_2^*$.

En tenant compte des relations (1.16), (1.17) et (1.18), (1.19) s'écrit :

- $H^* = (h_1-h_2^*) + (h_1^{-2} - h_2^{*-2}). (q / (2.g)) \quad (1.20)$

- $q = Q/b$ est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'équation de la quantité de mouvement définie par (1.9) :

$$q^2 / (2.g) = (h_1.h_2^{*2} + h_1^2.h_2^*)/4 \quad (1.21)$$

Ainsi, l'équation (1.20) s'écrit sous sa forme définitive :

$$\Delta H^* = (h_2 - h_1^*)^3 / (4.h_2^*.h_1) \quad (1.22)$$

La relation (1.20) exprime la perte de charge due au ressaut classique en fonction des hauteurs conjuguées de celui-ci.

On exprime souvent la capacité de dissipation du ressaut par le rapport $\square^* = \square H^*/H_1$, qui représente en fait son rendement. En tenant compte de la relation (1.7)1, les charges totales initiale et finale du ressaut peuvent s'écrire respectivement :

$$H_1 = h_1 [1+Fr_1^2/2] \quad (1.23)$$

$$H_2^* = h_1 [Y^*+Fr_1^2/ (2Y^{*2})] \quad (1.24)$$

Où :

- Y^* est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par l'équation (1.6) de Bélanger. Ainsi, le rendement η^* s'écrit :

$$\eta^* = \Delta H^*/H_1 = (H_1 - H_2^*)/H_1$$

$$\eta^* = 1 - [Y^* + Fr_1^2 / (2 \cdot Y^{*2})] / (1 + Fr_1^2 / 2) \quad (1.25)$$

Bien que la relation (1.25) permet le calcul explicite du rendement η^* , *Hager et Sinniger* (1986) proposent une expression approchée, applicable pour

$Fr_1 > 2,5$:

$$\eta^* = [1 - \sqrt{2} / Fr_1]^2 \quad (1.26)$$

Les relations (1.25) et (1.26) sont représentées graphiquement dans le système d'axes de coordonnées cartésiennes de la figure (1.12).

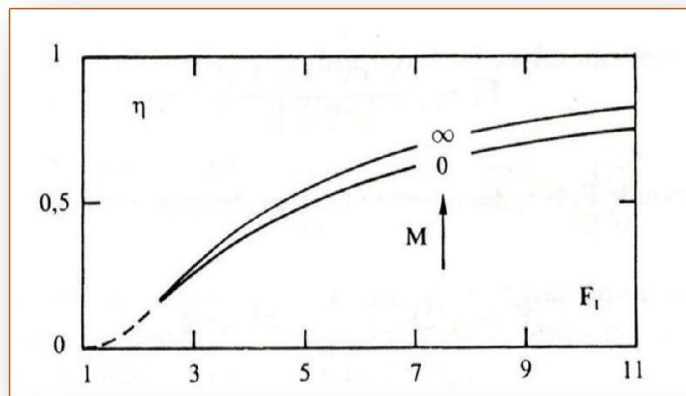


Figure 1.12 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude pour les profils rectangulaires ($M=0$) et triangulaire ($M=\infty$).

I.3.8. Profil de surface :

Selon les essais de *Rajaratnam et Subramanya* (1968) et *Schröder* [1969], la représentation adimensionnelle du profil de surface est possible si $3.5 < F_1 < 10$ et $h_1 > 0.05$. Selon *Schröder*, on introduit :

$$X = x / L_r, \quad f = (h - h_1) / (h_2 - h_1) \quad (1.27)$$

Où :

- x est la coordonnée longitudinale avec origine au pied du ressaut (figure. 1.6)
- La figure (1.13) permet la détermination du profil de la surface $h(x)$, en supposant que h_1, h_2 sont connus.

A cause des ondes de surface et de la forte turbulence, la surface réelle du ressaut n'est pas une ligne précise et unique. Des fluctuations temporelles caractérisent la surface sur toute la longueur du ressaut.

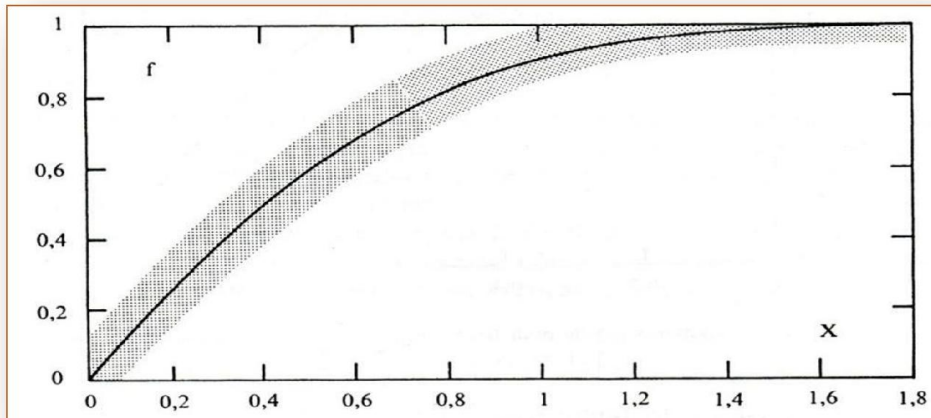


Figure 1.13 : Profil de la surface ressaut hydraulique plan ;définition selon les équations (1.27).

En effet, sur la figure (1.14), les profils des ressauts sont reportés de façon adimensionnelle et unitaire, pour avoir un caractère d'universalité, contrairement à la représentation de *Rajaratnam* et *Subramania* (1968, 1969, 1970). Le diagramme exprime $(h - h_1)/(h_2 - h_1)$ comme fonction de x/Lr pour différents nombres de *Froude* Fr_1 . L'abscisse et l'ordonnée sont, donc, comprises entre 0 et 1. Pour chaque point de la figure (1.14), sont indiquées, les variations du niveau à la surface du liquide

Ainsi, chaque cas, correspondant à un nombre de *Froude* Fr_1 donné, n'est plus représenté par une seule courbe, mais par une bande comprise entre les extrémaux des valeurs mesurées. Ces bandes se chevauchent les unes sur les autres. Apparemment, aucune tendance ne se dessine pour leur ampleur en fonction de Fr_1 . Plus ce dernier croît, plus la courbe moyenne se déplace vers la droite du diagramme et se rapproche d'une droite de 45°.

PARTIE : I
CHAPITRE I : Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

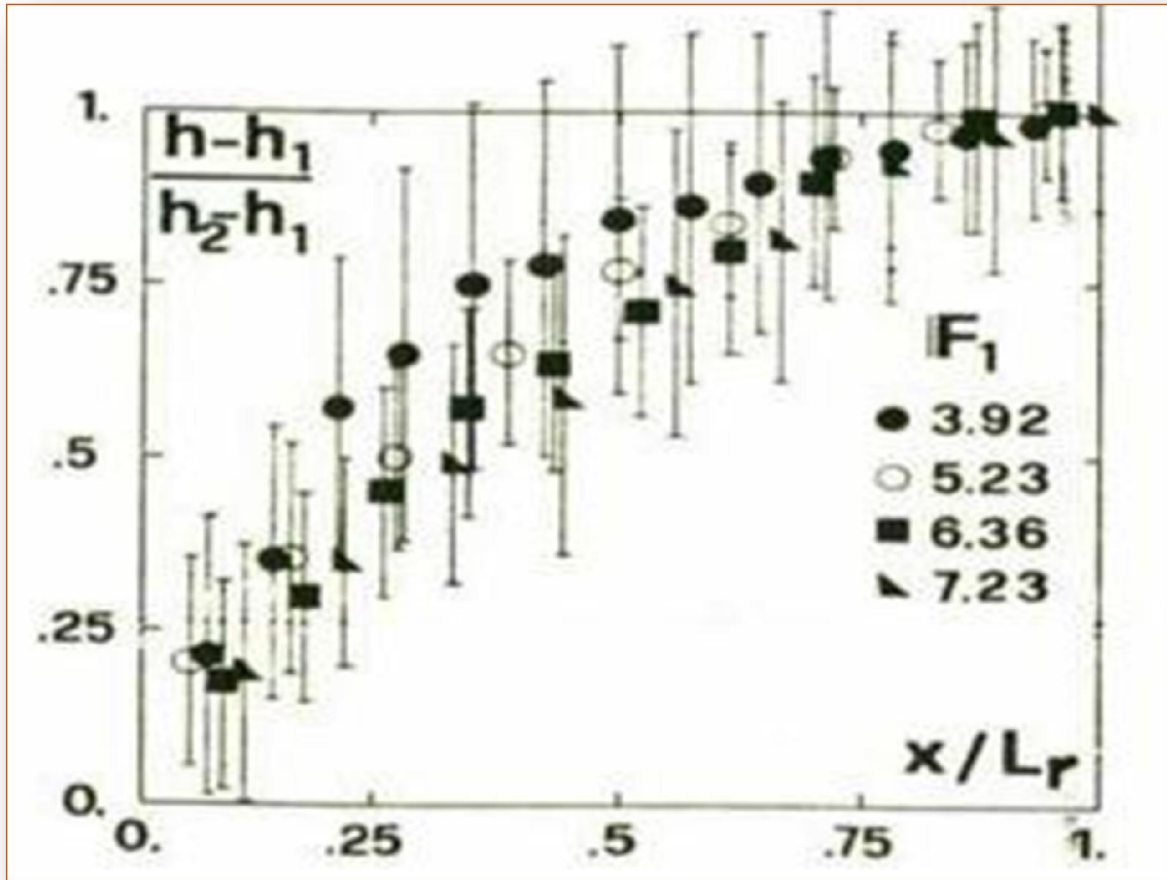


Figure 1.14 : Profils de surface des ressauts relatifs $(h - h_1) / (h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_r , pour différents nombres de Froude Fr_1 (Bretz, 1988) ; les traits verticaux en chaque point représentent les fluctuations de niveau

I.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire :

I.4.1. Approche de *Forster* et *Skrinde* (1950) :

I.4.1.1. 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* Fr_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* Fr_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 1.15)

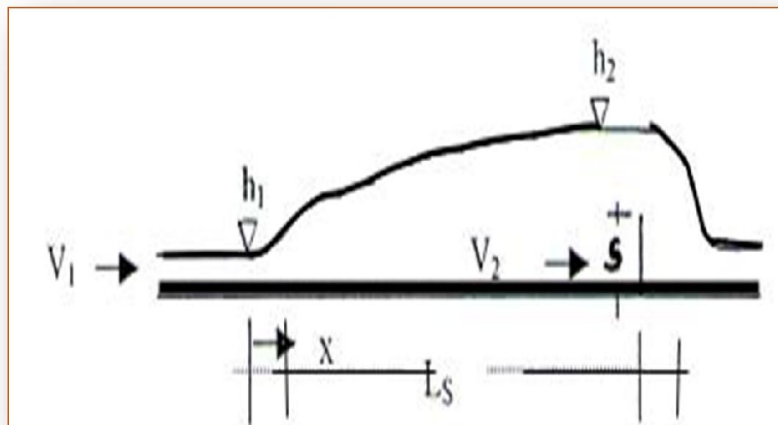


Figure 1.15 : Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

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 :

PARTIE : I
CHAPITRE I : Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

$$H_3 < h_2 - 0,75. S \quad (1.28)$$

Les mesures expérimentales obtenues sont traduites graphiquement sur la figure (1.16)

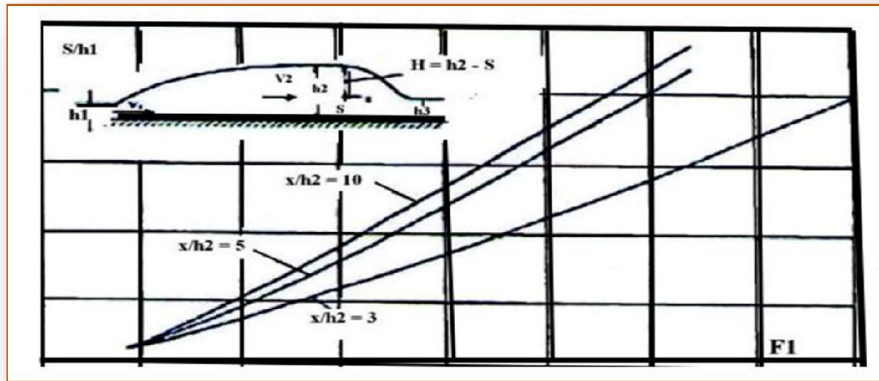


Figure 1.16 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1

du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude Fr_1 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 Fr_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.4.1.2. 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 1.17). La notion de seuil épais est également liée aux caractéristiques de l'écoulement et suivant la classification de Rao et Murlidhar (1963), le seuil est considéré comme étant épais lorsque :

$$0,1 \leq (h_2 - s) / L \leq 0,35 \quad (1.29)$$

PARTIE : I
CHAPITRE I : Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

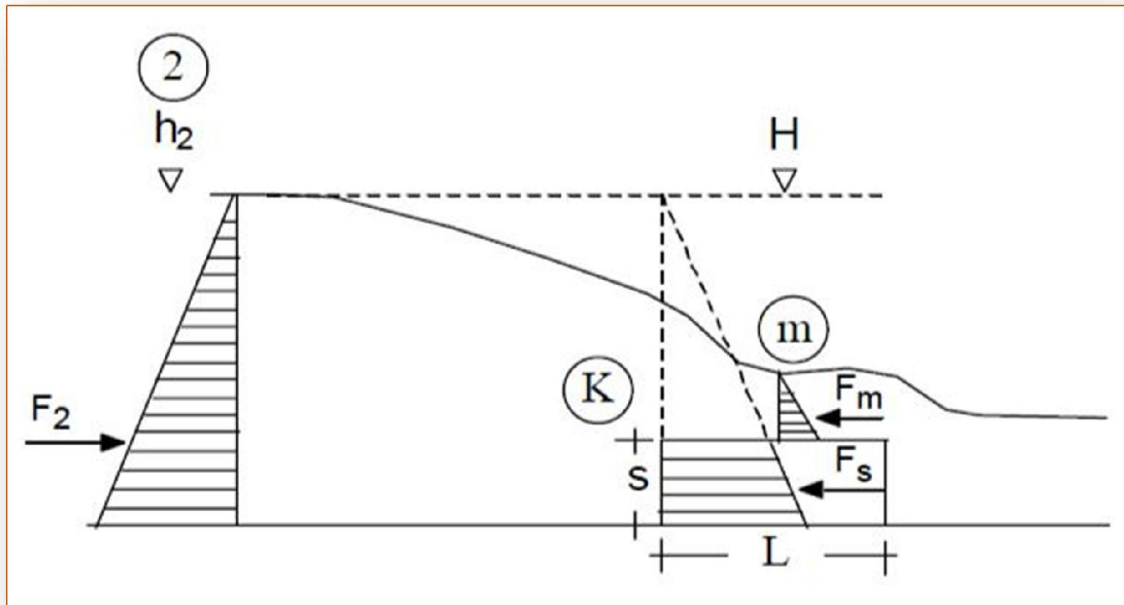


Figure 1.17 : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions

Dans la section 2, l'écoulement est en régime fluvial de profondeur h_2 . Le seuil est en suite 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).

I.5. CONCLUSION

L'étude bibliographique a examiné dans ce premier chapitre, 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* Fr_1 , à l'amont du ressaut, et ceux de *Hager* (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau.

D'après cette étude, nous avons montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale en négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de *Bélanger* qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de *Froude* Fr_1 à l'amont du ressaut.

CHAPITRE II

Ressaut hydraulique en canal
trapézoïdale

II.1. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale Symétrique

II.1.1. Introduction

La forme trapézoïdale est la forme intermédiaire entre le rectangle et le triangle. Le triangle est un trapèze à base nulle et le rectangle est un trapèze à angles droits. La forme trapézoïdale est définie par le paramètre de forme $M = mh_1/b$.

La première étude sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal est apparemment, celle de Posey et Hsing (1938). Les auteurs ont vérifié la validité de l'équation de la quantité de mouvement, utilisée pour la détermination du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.

En(1964) Silvester a déterminé des solutions analytiques pour calculer les hauteurs conjuguées et la dissipation d'énergie, une solution semi-empirique est proposée pour la longueur du ressaut.

Nous allons citer quelques travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. Nous citerons ceux effectués par Wanoschek et Hager(1989) sur le ressaut classique.

Ces auteurs ont notamment contribué à définir la longueur du ressaut et l'ont exprimé sous la forme adimensionnelle tel que :

$$\frac{L_j}{(h_2 - h_1)} = 7,1. (1 + 10M) \quad (2.1)$$

Avec :

- $M = \frac{m \cdot h_1}{b}$ où : $m = \text{Cotg}(\theta)$ " la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal ".
- b la base du trapèze.
- h_1 et h_2 sont respectivement la hauteur initiale et finale du ressaut.
- M paramètre adimensionnel représente en fait, la hauteur relative initiale du ressaut.

La relation de Silvester (1964) montre clairement que, la longueur du ressaut est

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

d'autant plus grande que M tend vers l'infini.

Plus récemment, Wanoschek et Hager (1989) ont décrit d'une manière détaillée le comportement du ressaut, dans un canal trapézoïdal, d'angle d'inclinaison de 45° ($m=1$) et pour des valeurs de

$$M \leq 0,4.$$

Les essais ont montré que la longueur relative L_j/h_2 du ressaut dépend à la fois de la valeur du nombre de Froude F_1 et de la valeur de la hauteur relative initiale M .

Les auteurs ont montré que le ressaut dans le canal trapézoïdal testé devrait être plus long et asymétrique au-delà d'une valeur limite du nombre de Froude F_{1L} , tout dépendant de la hauteur relative initiale M .

Nous allons aborder à travers ce chapitre un autre paramètre caractéristique du ressaut ; ce paramètre est le rapport des hauteurs conjuguées Y , obtenu par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut.

II.1.2. Application de l'équation de la quantité de mouvement

En négligeant toutes les forces de frottement et en considérant une distribution uniforme des vitesses et une distribution hydrostatique des pressions, au pied et à la fin du ressaut, l'équation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\rho Q^2 / A_2 - \rho Q^2 / A_1 = F_1 - F_2 \quad (2.2)$$

Où :

- Q est le débit volume
- ρ est la masse volumique du liquide.
- A_1 et A_2 sont respectivement, l'aire de la section au pied et à la fin du ressaut.

$$A_1 = b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2 \quad (2.3)1$$

$$A_2 = b \cdot h_2 + m \cdot h_2^2 \quad (2.3)2$$

Où : $m = \text{Co tang}(\theta)$

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

F_1 et F_2 sont, les forces de pression hydrostatiques au début et à la fin du ressaut. Ces forces de pressions hydrostatiques correspondent au volume de l'épure de pression.

Ainsi :

$$F1 = \varpi \left(\frac{bh_{21}}{2} + \frac{mh_{31}}{3} \right) \quad (2.4)1$$

$$F2 = \varpi \left(\frac{bh_{22}}{2} + \frac{mh_{32}}{3} \right) \quad (2.4)2$$

L'injection des équations (2.3) et (2.4) dans l'équation (2.2) aboutit à l'équation (2.5), qui suit :

$$\frac{Q_2}{g(bh_1+mh_2)_1} + \frac{bh_{21}}{2} + \frac{mh_{31}}{3} = \frac{Q_2}{g(bh_2+mh_2)_2} + \frac{bh_{22}}{2} + \frac{mh_{32}}{3} \quad (2.5)$$

Le nombre de Froude F_1 au pied du ressaut en canal trapézoïdal caractérisant l'écoulement dans la section initiale du ressaut est tel que :

$$F_1^2 = \frac{Q^2 (b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_2)_1} \quad (2.6)$$

II.1.3. Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

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

II.1.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées

D'après l'équation de la quantité de mouvement appliquée aux sections initiales et finales d'un ressaut se produisant dans un canal horizontal de section droite trapézoïdale nous avons obtenons la relation (2.6).

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

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

$$2F_1 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[Y_2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (2.7)$$

Tels que :

- $Y = \frac{h_2}{h_1}$
- $M = \frac{mh_1}{b}$

La relation (2.7) exprime ainsi, dans le cas d'un canal trapézoïdal, la variation du nombre de Froude à l'amont du ressaut en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées et de la hauteur relative M.

L'équation (2.7) à cinq variables est réduite à trois variables (F12, M, Y).

Les éléments connus sont Q, h1, b et m qui forment la relation (2.6), avec $M = \frac{mh_1}{b}$

L'élément inconnu est h2 = ?

Connaissant F12 et M on peut tirer à partir du graphique, le rapport $Y = \frac{h_2}{h_1}$ d'où :
h2 = Y . h1

II.1.3.1.1. Cas particulier du canal rectangulaire

Pour obtenir la fonction Y(F1) pour le cas du ressaut hydraulique évaluant en canal rectangulaire, il suffit d'annuler dans l'équation (2.7) m et M (m=0 et M=0).

L'équation (2.7)

Devient :

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

Ou encore :

$$F_1^2 = \frac{Y(Y+1)}{2} \quad (2.8)$$

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

Et F_1^2 devient :

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

Eléments connus : Q, b, h1 donnent F1.

Eléments inconnus : h2 = ?

L'équation (2.8) conduit à la relation :

$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2}[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1]$ C'est l'équation de Bélanger (1828), cette équation traduit un ressaut classique sans obstacle en aval. Elle a été reprise par Hager (1988) :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2}, \text{ valable pour } F_1 > 3.$$

Hager a vérifié expérimentalement que pour des ressauts où $F_1 > 3$ $\sqrt{1 + 8F_1^2} \approx \sqrt{8F_1^2}$ d'où la relation :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2} \tag{2.9}$$

II.1.3.1.2. Cas particulier du canal triangulaire

En remplaçant dans l'équation (2.7) : $b = 0$ et $\frac{1}{M} = 0$ ($M \rightarrow \infty$), l'équation (2.7) donne :

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

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

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

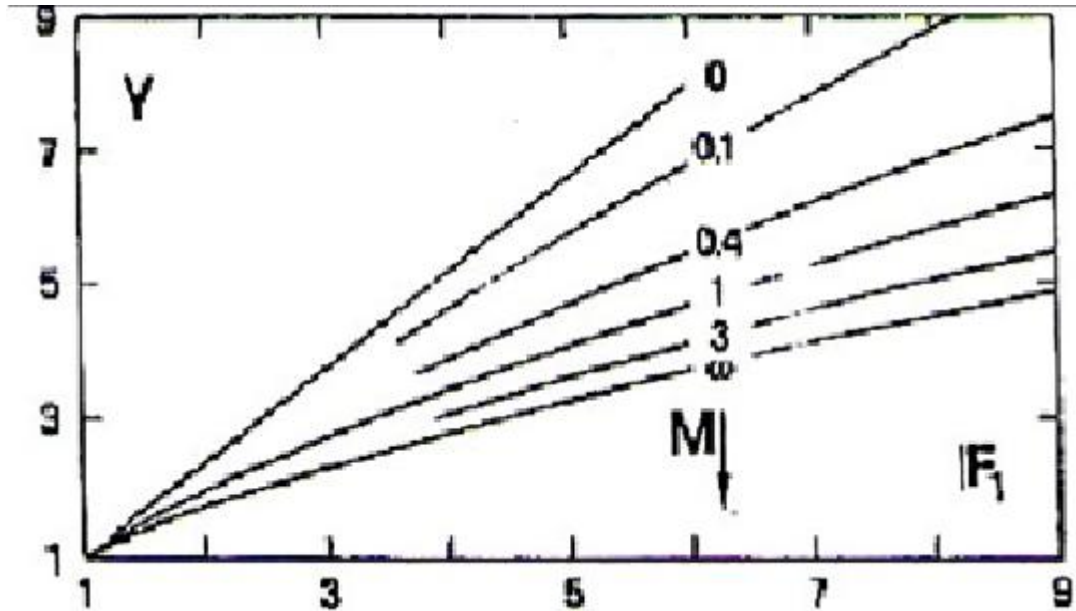


Figure 2.1 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y

des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M .

$M \rightarrow 0$: profil rectangulaire. $0 < M < \infty$: profils trapézoïdaux.

La figure (2.1) montre clairement que la plus faible valeur du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut est obtenue dans le cas du profil triangulaire, pour une même valeur du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

II.1.3.2. 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

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

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 :

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

Où :

- $W = b + 2mh$ avec W : largeur de la surface d'eau.

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

Une autre formule de la longueur du ressaut a été analysée par Silvester (1964), Wanoschek et Hager (1989) c'est la relation (2.1)

$$\frac{L_j}{h_2 - h_1} = 7,1 * (1 + 10M)$$

Otsu (1976) a corrélié la longueur du ressaut, comme :

$$\text{Log}_{10} \left(\frac{L_i}{\Delta H} \right) = 1,71\xi + 0,315m + 1,58 \quad (2.13)$$

Où :

- $\xi = \frac{\Delta H}{H_i}$: 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 $F_1 > 4$. Les dimensions de ce type de rouleau pourront être données par les grandeurs suivantes :

- L_u : distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau du fond.
- L_b : longueur du rouleau du fond.
- h_b : hauteur maximale du rouleau du fond (Figure 2.2)

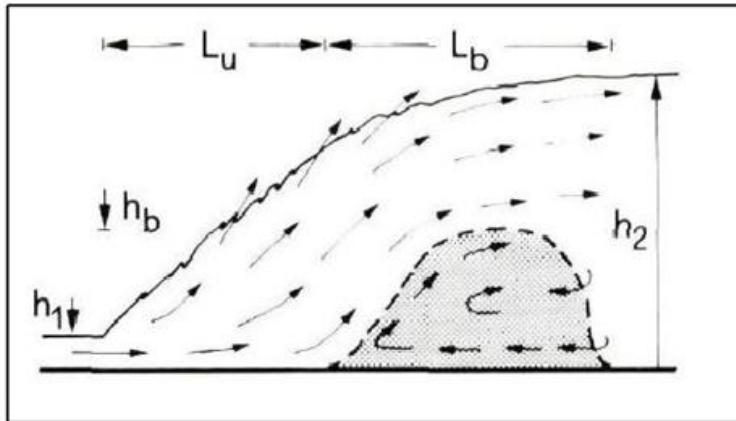


Figure 2.2 : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale

II.1.3.3. Rendement

La perte de charge ΔH du ressaut est par définition la différence des charges initiale et finale :

$$\Delta H = H_1 - H_2.$$

Donc :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} \tag{2.14}$$

$$H_1 = h_1 + \frac{\alpha_1 + Q^2}{2gA_1^2} \tag{2.15)1}$$

$$H_2 = h_2 + \frac{\alpha_2 + Q^2}{2gA_2^2} \tag{2.15)2}$$

Où :

- $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$
- $Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$

L'injection des expressions (2. 3) et (2.15) dans l'équation (2.14) aboutit à l'équation (2.16), qui suit, exprimant le rendement du ressaut hydraulique en canal trapézoïdale :

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2(1+M)^3}{2Y^2(1+2M)(1+MY)^2}}{1 + \frac{F_1^2(1+M)}{2(1+2M)}} ; 0 < \eta < 1 \quad (2.16)$$

Puisque, d'après l'équation (2.7), le rapport des hauteurs conjuguées Y est directement lié au nombre de Froude F1 de l'écoulement incident et au facteur de forme M, le rendement η ne dépend lui aussi, d'après l'équation (2.16), que de F1 et de M.

Lorsque M = 0, la relation (2.16) mène à l'expression du rendement du ressaut évoluant dans un canal horizontal de section droite rectangulaire. Par contre, lorsque 1/M=0, la relation (2.16) conduit à l'expression du rendement du ressaut évoluant dans un canal de section droite triangulaire constante.

II.1.3.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire

Pour le canal rectangulaire on a : M = 0

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (2.17)$$

Sinniger (1985) a proposé une bonne approximation de l'équation (2.17) :

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right]^2 ; F_1 > 2,5 \quad (2.18)$$

II.1.3.3.2. Cas du canal triangulaire

Pour le cas du canal triangulaire on a : $\frac{1}{M} = 0$

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}} \quad (2.19)$$

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

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

$$\eta = \left[\left(1 - \frac{12}{F_1^4} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \quad ; \quad F_1 > 3 \quad (2.20)$$

La relation (2.16) est représentée sur la figure (2.3). La variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour différentes valeurs du facteur de forme M_1 , est illustrée. On voit bien sur la figure (2.3), que le rendement augmente aussi bien avec l'accroissement du facteur de forme M_1 qu'avec le nombre de Froude F_1 .

La courbe inférieure correspond à $M_1=0$, représentant la forme rectangulaire, et la courbe supérieure correspond à $M_1^{-1} = 0$, représentant la forme triangulaire.

Le ressaut en canal triangulaire dissipe donc plus d'énergie, suivi du canal trapézoïdal de différentes valeurs de M_1 et en fin, le canal rectangulaire dissipant moins d'énergie.

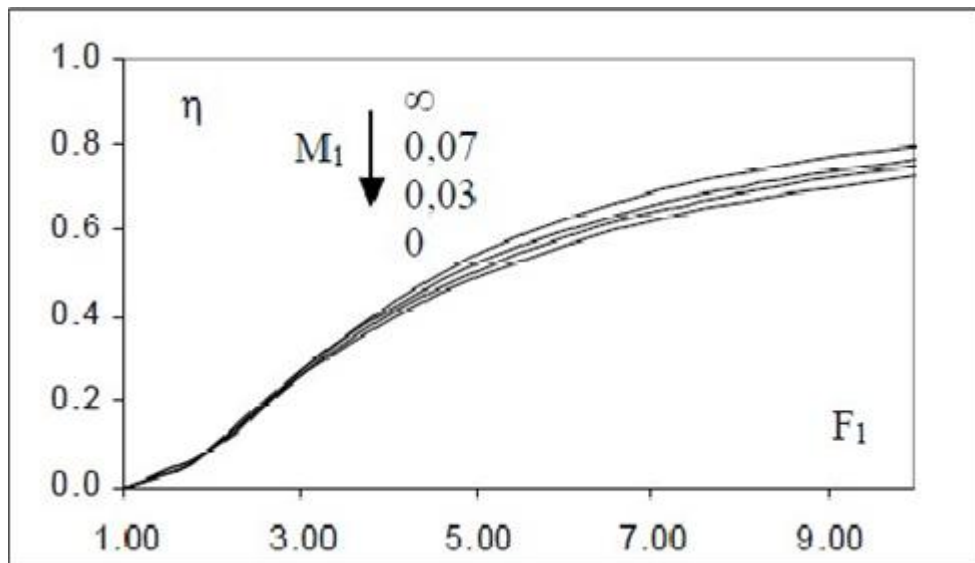


Figure 2.3 : Variation du rendement η du ressaut en canal trapézoïdal en fonction du nombre de Froude F_1 pour différentes valeurs de M_1 (Equation (2.16)).

II.2. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale 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 2.4.

Cette étude a pour but de déterminer :

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

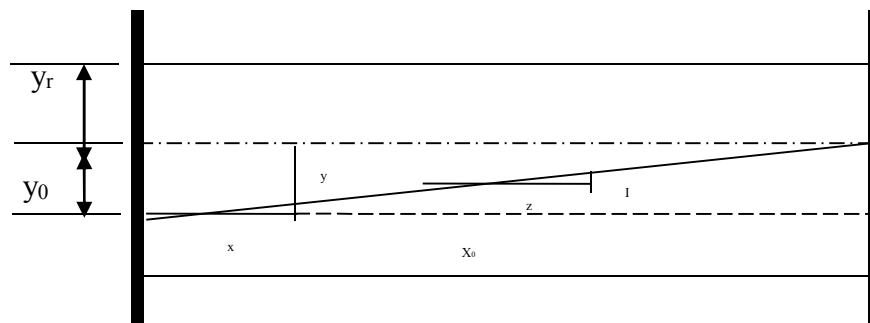


Figure (2.4): Section transversale du canal

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 du retour latéral sur le côté profond du canal

V : 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

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

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

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

$$\Phi = yr / y_0$$

$$\Theta = (Q / At)^2 / gy_0$$

F_1 = Nombre de Froude

γ : Poids spécifique de l'eau

Φ : Densité de la masse

g : Accélération de la gravité

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

II.2.2.1. 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 :

$$P + M = \frac{1}{2} x_0 y_0^2 \gamma + \frac{1}{2} x_0 y_0 \gamma (y_1 + y_0/3) + \phi Q^2 / x_0 y_0 + \left(\frac{1}{2} x_0 y_0\right) \quad (2.21)$$

La forme adimensionnelle :

$$\Psi = \phi^2 + \phi + \frac{1}{3} + \Theta / (1 + 2\phi) \quad (2.22)$$

D'après l'équation de la quantité de mouvement, ψ_1 (amont) = ψ_2 (aval) :

$$\phi^2 + \phi + \frac{1}{3} + \Theta / (1 + 2\phi) = \phi_2^2 + \phi_2 + \frac{1}{3} + \Theta / (1 + 2\phi_2) \quad (2.23)$$

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

La solution de ϕ_2 pour des valeurs données de ϕ_1 et Θ a été réalisée graphiquement en traçant ψ par rapport à ϕ pour une valeur donnée de Θ .

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

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

II.2.2.2. 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.

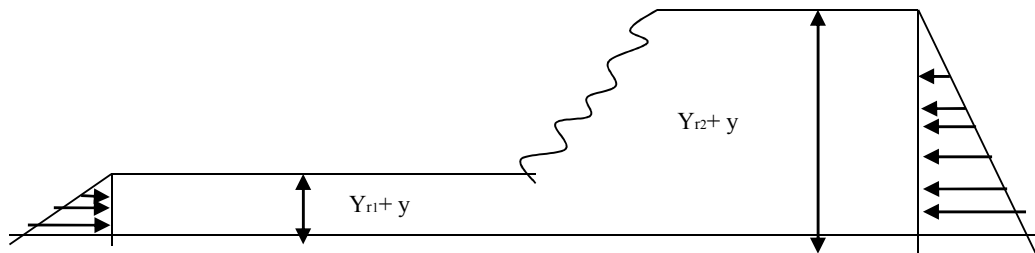


Figure 3.2 : Section de la bande longitudinale

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

$$\frac{1}{2} \gamma (y_{r1} + y)^2 + v_1^2 (y + y_{r1}) = \frac{1}{2} \gamma (y_{r2} + y)^2 + v_2^2 (y + y_{r2}) \quad (2.24)$$

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

$$P + M/\gamma y_o^2 = \frac{1}{2} (y/y_o + \phi_1)^2 + \Theta (y/y_o + \phi_1) / (1+2\phi_1)^2 = \frac{1}{2} (y/y_o + \phi_2)^2 + \Theta (y/y_o + \phi_2) / (1+2\phi_2)^2 \quad (2.25)$$

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

Pour l'équilibre

$$(P+M) s_1 = (P+M) s_2 \quad (2.26)$$

On a:

$$G = (P+M) s_2 / (P+M) s_1 \quad (2.27)$$

M=1 pour l'équilibre

M>1 pour P+M déficience en amont

M<1 pour P+M surplus en amont

De la géométrie :

$$y/y_0 = 1 - x/x_0 \quad (2.28)$$

Remplaçant (2.28) dans (2.25) :

$$\frac{1}{2} (1 - x/x_0 + \phi_1)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_1) / (1 + 2\phi_1)^2 = \frac{1}{2} (1 - x/x_0 + \phi_2)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_2) / (1 + 2\phi_2)^2 \quad (2.29)$$

Remplaçant (2.29) dans (2.27) :

$$G = \frac{\frac{1}{2} (1 - x/x_0 + \phi_2)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_2) / (1 + 2\phi_2)^2}{\frac{1}{2} (1 - x/x_0 + \phi_1)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_1) / (1 + 2\phi_1)^2} \quad (2.30)$$

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 $x/x_0=1$

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

$$Gm = \frac{\frac{1}{2} \phi_2^2 + \theta \phi_2 / (1+2\phi_2)^2}{\frac{1}{2} \phi_1^2 + \theta \phi_1 / (1+2\phi_1)^2} \quad (2.31)$$

Les valeurs de G par rapport à ϕ pour les différentes valeurs de θ sont illustrées dans la figure 2.6.

D'une manière similaire

$$\frac{dG/d(x/x_0)}{x/x_0} = 1 = G (\phi_2 - \phi_1) / \phi_1 \phi_2 \quad (2.32)$$

Les valeurs $\frac{dG/d(x/x_0)}{x/x_0} = 1$ sont tracés en fonction de ϕ_1 pour les différents valeurs de θ (Figure 3.4).

Le diagramme de Gm 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 ya 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.

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

Les valeurs théoriques calculées pour le rapport G_m et tracées dans la figure (2.6) 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.

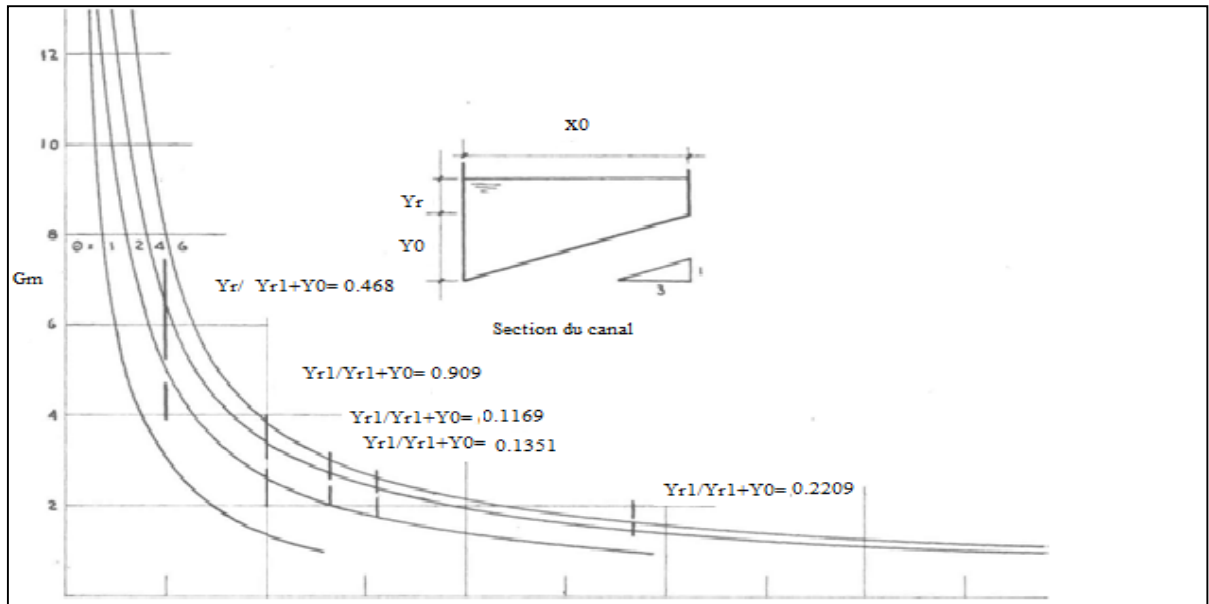


Figure (2.6) : Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté peu profond

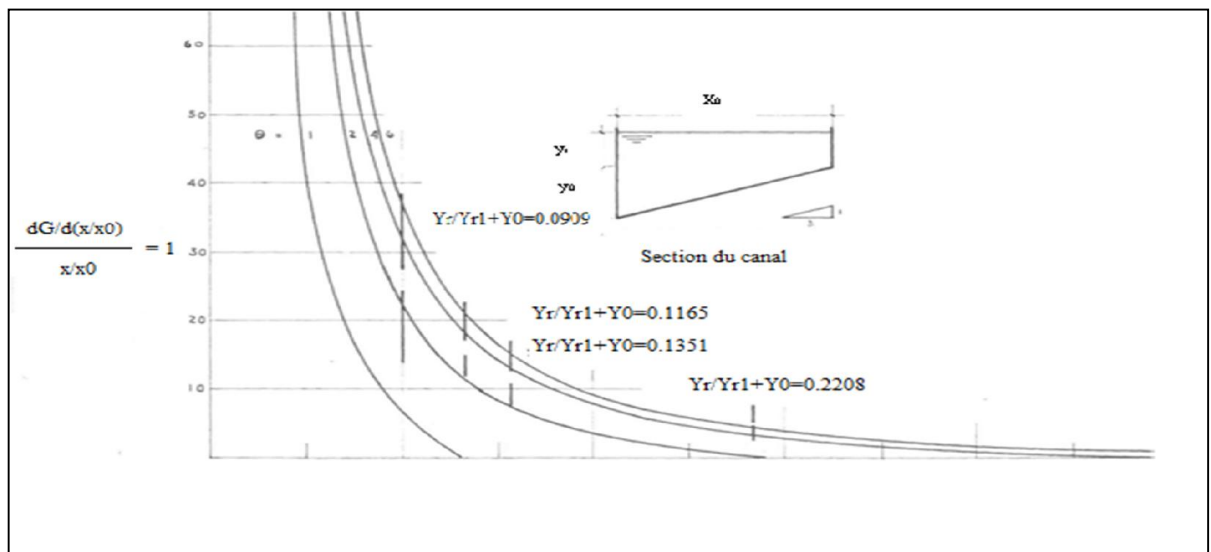


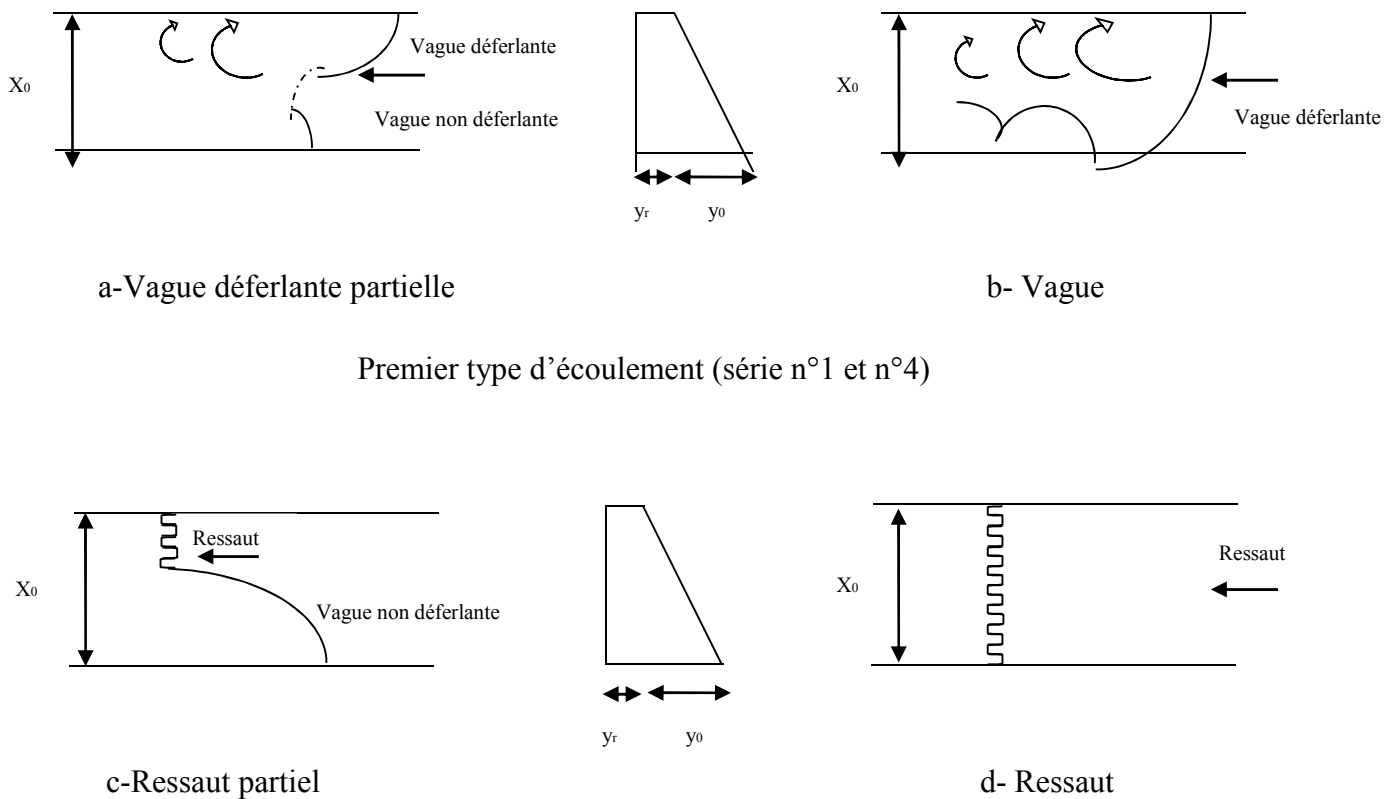
Figure (2.7) : Diagramme adimensionnel du taux de changement de M sur le côté peu profond

II.2.2.3. 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 (2.8a et 2.8b).
- 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 (2.8c et 2.8d).

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.



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

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

Figure (2.8) : Schéma général d'écoulement

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

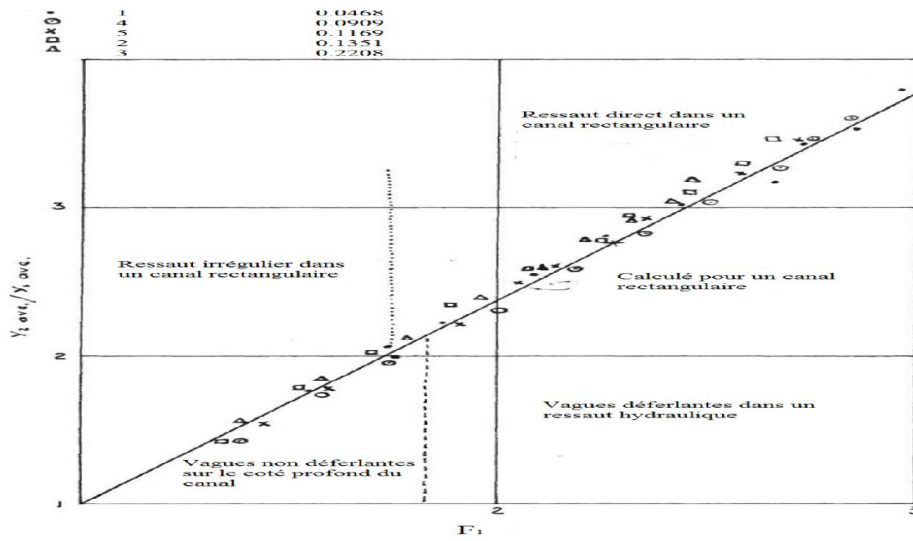


Figure (2.9) : Rapports de profondeur moyenne en fonction de numéro de Froude

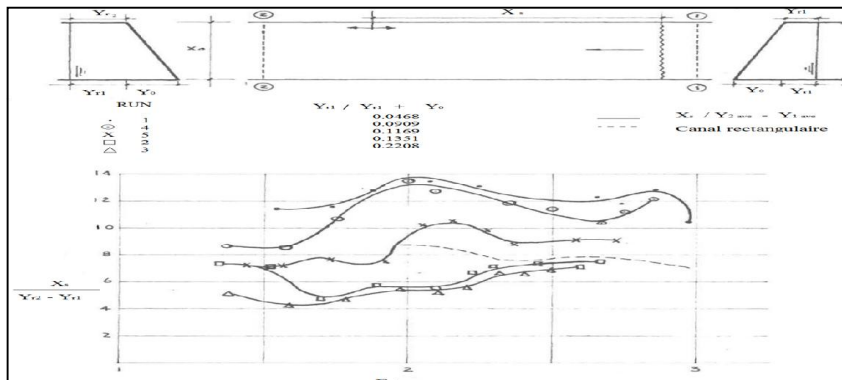


Figure (2.10) : Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral du côté peu profond

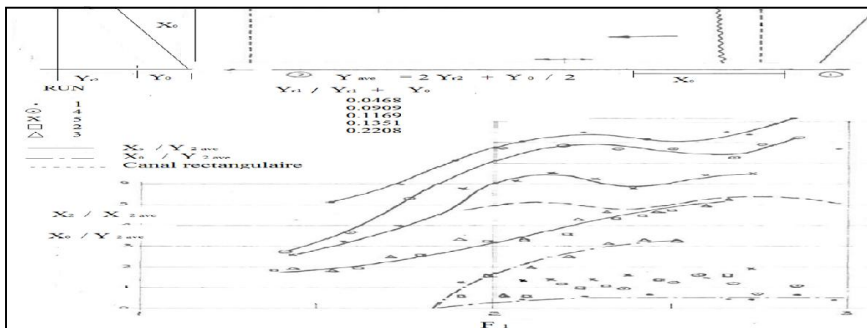


Figure (2.11) : Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral des deux côtés du canal

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

La valeur du nombre Froude légèrement inférieur à 2.0 peut être considérée comme la limite entre la vague de rupture et de non-rupture indépendamment de la forme du canal.

Dans la figure n° 3.7, les deux types de l'écoulement (vagues ondulantes ou ressaut hydraulique) sont bien différenciés. Les valeurs de $X_s/Y_{r2}-Y_{r1}$ supérieur à 8 correspondent à des vagues ondulantes et des remous sur le côté peu profond. Quand le ressaut est obtenu, la valeur de $X_s/Y_{r2}-Y_{r1}$ n'est jamais supérieure à 8. Les valeurs maximales obtenues par Bakhmeteff et Matzke pour la longueur sur la hauteur du ressaut dans un canal rectangulaire sont affichés en pointillés dans la figure 3.8 La valeur de ce rapport est d'environ 8 sur un canal rectangulaire.

Si le ressaut n'est pas obtenu, la longueur du retour latéral sur le côté peu profond augmente à mesure que la largeur du canal augmente ; la limite sera lorsque la section transversale du canal est triangulaire, la longueur de l'écoulement inverse sur le côté peu profond étant infinie ; l'événement est prouvé expérimentalement. Pour la condition du ressaut, la longueur du retour latéral sur le côté peu profond était pratiquement la même pour tous les séries.

Les valeurs maximales du rapport de la longueur de ressaut sur la profondeur amont du ressaut pour un canal rectangulaire (L_j/h_1) obtenu par Bakhmettef et Mr Matzke sont affichées en pointillés sur la figure 8. La valeur maximale de ce rapport est d'environ 5.

La longueur du retour latéral sur le côté profond augmente avec la diminution de la largeur du canal. Cette diminution est due par la diminution du fond du canal incliné. La limite sera donc, quand la longueur du retour inverse devient égale à la longueur dans les deux côtés du canal, c'est le cas d'un canal rectangulaire.

II.2.3. Conclusion

Le deuxième sous-chapitre a concerné le ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire asymétrique. Une étude a été proposée qui est celle d'Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954). 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.

PARTIE : I
CHAPITRE II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale

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 $F_1 = 1.73$ pour les conditions de ressaut irrégulier et direct dans le canal rectangulaire sont très proches de la valeur de $F_1 = 1.83$ 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 y a 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.2.4. Conclusion du deuxième chapitre

Ce chapitre présente les principaux travaux dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal symétrique et asymétrique. La détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique, a été souvent l'objectif principal des travaux de plusieurs auteurs.

La première étude réalisée sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal est celle de Posey et Hsing (1938). Wanoschek et Hager (1989) ont représenté sur un graphique la variation expérimentale et théorique du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour quatre valeurs du paramètre de forme M_1 (0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4).

La longueur du ressaut a été mesurée par plusieurs auteurs et chacun d'eux avait proposé la relation d'ajustement de ses résultats, Ces auteurs sont Posey et Hsing (1938), Silvester (1964), Otsu (1976) et Wanoschek et Hager (1989).

Les auteurs ont montré aussi, sur un graphique, la variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour toutes les formes du trapèze, allant du rectangle au triangle.

Dans le deuxième sou-chapitre la ressaut hydraulique évoluant dans canale trapézoïdale asymétrique a été exposé a travers les travaux da **José Vasques Diaz(1954)**.

CHAPITRE III

Etude de la compacité du
ressaut hydraulique en canal
rectangulaire

III. Etude de la compacité du ressaut hydraulique en canal rectangulaire

III.1. Introduction

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse (*Forster et Skinde (1950), Achour (1997)*). Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau aval, de contrôler sa position lors des changements des paramètres de l'écoulement et contribuent enfin à une meilleure compacité du bassin amortisseur (*Bretz (1987), Hager et Li (1992)*).

Nous examinerons les travaux de *Debabeche (2003)*, qui ont été consacrés à l'étude expérimentale de l'influence du seuil à paroi mince sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire.

L'objectif principal de ce chapitre est de déterminer l'effet des hauteurs conjuguées Y sur la compacité du ressaut hydraulique dans un canal à section droite rectangulaire. Et de présenter des relations empiriques exprimant la variation rapport $Y=h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées, en fonction de nombre de *Froude* $IF1$ et du facteur de compacité γ défini comme le rapport de la longueur du rouleau Lr^* .

III.2. Hauteur relative du seuil

La figure (3.1) montre la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de *Froude* Fr_1 de l'écoulement incident.

La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que la relation $S=f(Fr_1)$ est quasi-linéaire pour chaque configuration du ressaut. Par ailleurs, pour une valeur donnée du nombre de *Froude* Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente. Pour chaque rapport de compacité

γ , les point de mesures expérimentales s'ajustent, par la méthode des moindres carrés, avec une droite d'équation $S = a (Fr_1 - 1) + b$.

La relation linéaire traduisant la variation de s/h_1 en fonction de Fr_1 et du rapport γ de compacité, est la suivant :

$$S = (1,07 - 0,29\gamma) \cdot (Fr_1 - 1) - 0,48 \text{ pour } 2,5 < Fr_1 < 12 \quad (3.1)$$

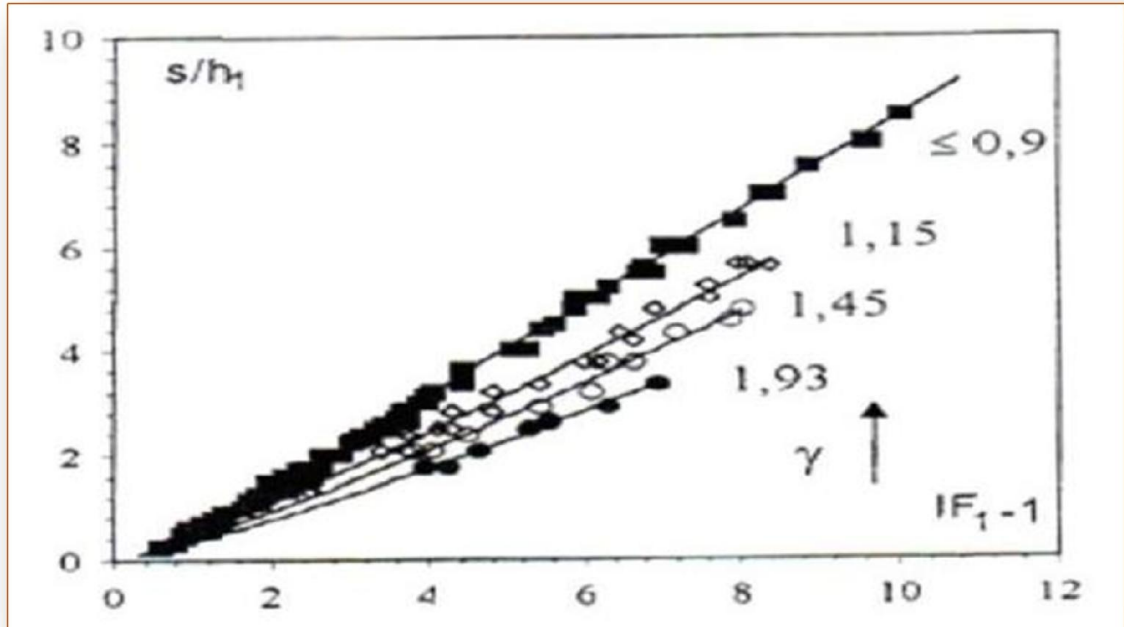


Figure (3.1) : variation de S/h_1 en fonction du nombre de Froude IF_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ (■) 0,9, (◇) 1,15, (○) 1,45, (●) 1,93 (—) courbes d'ajustements.

III.3. Rapport des hauteurs conjuguées

III.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées pour $\gamma \leq 0,9$

Pour une large gamme des nombres de Froude allant de 1,5 à 12, la mise en place d'un seuil mince à l'aval du bassin, à une distance x du seuil supérieur à la longueur L_r du rouleau, correspondant à un rapport de compacité $\gamma \leq 0,9$, n'a pratiquement aucune influence sur le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut classique.

Afin de mettre en évidence cette influence, on s'intéresse aux configurations du ressaut contrôlé relatives aux rapports de compacité $\gamma > 0,9$.

III.3.2. Rapport des hauteurs conjuguées pour $\gamma > 0,9$

La figure 3.1 représente les points de mesures expérimentales et leurs ajustements. Les points de mesures expérimentales s'éloignent de la courbe théorique du ressaut classique selon *Bélanger* ($\gamma \leq 0,9$), au fur et à mesure que le rapport de compacité γ augmente. Cet éloignement commence à se remarquer à partir de $\gamma > 1,25$.

Par ailleurs, pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $Y = a Fr_1 + b$.

Le rapport de compacité γ :
$$\gamma = Lr^*/x \tag{3.2}$$

D'après le chapitre 1 Le nombre de Froude s'écrit :

$$Fr_1^2 = Q^2 / (g \cdot b^2 \cdot h_1^3) \tag{3.3}$$

D'après Hager et Al (1990) :

$$\lambda r = -12 + 160 \cdot Tgh (Fr_1/20) \quad \text{pour } h_1/b < 0, 1 \tag{3.4}$$

$$\lambda r = -12 + 100 \cdot Tgh (Fr_1/12.5) \quad \text{pour } 0, 1 < h_1/b < 0,7 \tag{3.5}$$

$$\lambda r = Lr^* / h_1 \tag{3.6}$$

Donc on peut écrire :

$$Lr^*/h_1 = -12 + 160 \cdot Tgh (Fr_1/20) \quad \text{pour } h_1/b < 0, 1 \tag{3.7}$$

$$Lr^*/h_1 = -12 + 100 \cdot Tgh (IF_1/12.5) \quad \text{pour } 0, 1 < h_1/b < 0,7 \tag{3.8}$$

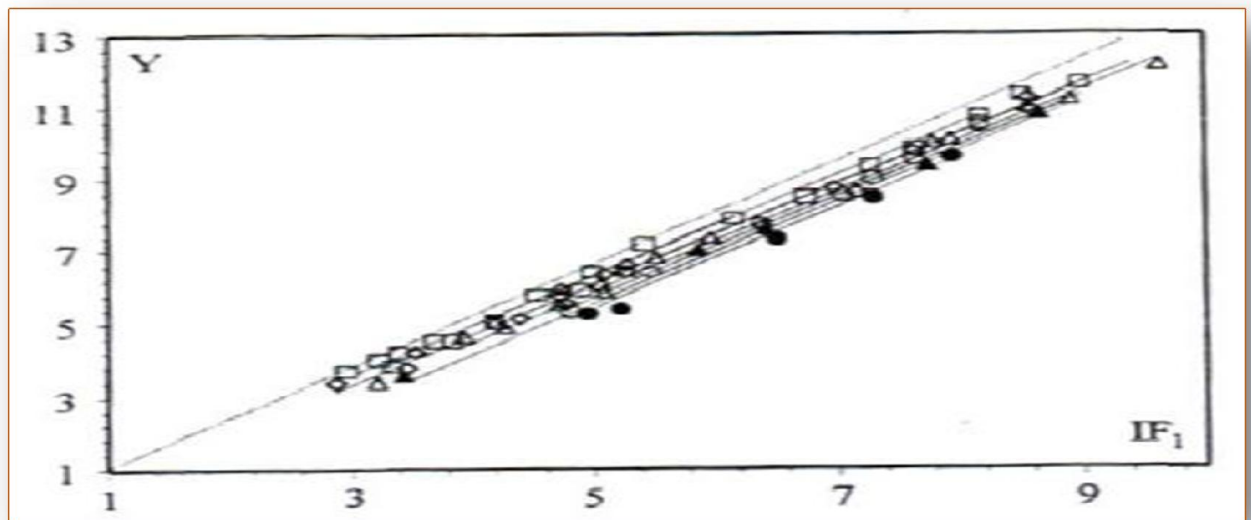


Figure 3.2 : variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction du nombre de Froude Fr_1 pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ : (\square) 1, (\diamond) 1,15 (Δ) 1,3, (\circ) 1,45, (\blacktriangle) 1,6, (\bullet) 1,93, (----) courbe théorique du ressaut classique selon *Bélanger* ($\gamma \leq 0,9$). (—) Courbe d'ajustement.

PARTIE I

Chapitre III : Etude de la compacité du ressaut hydraulique en canal rectangulaire

Une relation unique de la forme $Y = \Psi(Fr_1, \gamma)$ est alors proposée, permettant de déterminer le rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction de nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident pour toutes les configurations du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal rectangulaire. Celle-ci s'écrit comme suit :

$$Y = 1.386 Fr_1 - \sqrt{2} \cdot \ln(\gamma) - 0.617 \quad \text{pour } 2.5 \leq Fr_1 \leq 11. \quad (3.9)$$

La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure (3.3).

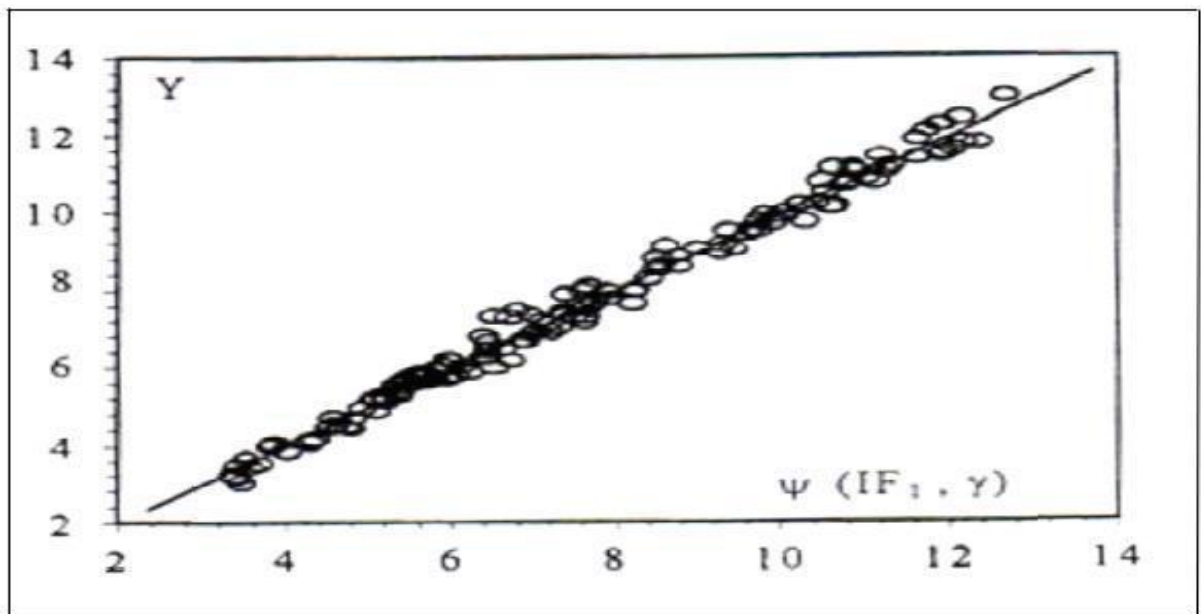


Figure 3.3 : Variation du rapport Y de hauteur conjuguées en fonction de $(1.386.Fr_1 - \sqrt{2} \cdot \ln(\gamma) - 0,617)$. (o) points expérimentaux. (—) droite d'équation : $h_2/h_1 = 1.386.Fr_1 - \sqrt{2} \cdot \ln(\gamma) - 0,617$

III.4. Conclusion

Le troisième chapitre s'est intéressé, dans un premier temps, à la variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, pour une valeur donnée du nombre de *Froude* Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente. L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport S en fonction du nombre de *Froude* Fr_1 de l'écoulement incident suit une loi de type quasi-linéaire.

L'étude s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident. Il a été montré que pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $Y = a IFr_1 + b$.