

Université Mohamed khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique
Référence :...../ 2020

جامعة محمد خيضر - بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع:...../ 2020



Mémoire de Master
Spécialité : Hydraulique
Option : Hydraulique Urbaine

Thème :

**Etude expérimentale des longueurs caractéristiques du
ressaut hydraulique contrôlé dans un canal trapézoïdal
asymétrique avec convergent trapèze**

Etudiant:

Fezzai Dalila

Encadreurs:

Dr: Cherhabil Sonia

Promotion: 2019/2020

Remerciement

Pour ce travail, j'ai bénéficié des orientations, encouragements et précieux conseils de mon encadreur, madame ***Cherhabil Sonia***, prof à l'Université de Biskra que je remercie vivement et auquel j'exprime ma profonde reconnaissance pour l'aide scientifique et morale qu'il n'a cessé de me donner.

Aux membres de jury qui ont bien voulu examiner notre travail et de l'apprécier à juste valeur.

A tous les enseignants de l'hydraulique qui ont contribué à notre formation.

A toute la promotion de l'hydraulique.

En fin. Je tiens également à remercier, ***Debabeche Bouttaina*** pour toute l'aide qu'il m'a prodigué au cours de l'élaboration de cette étude.

Résumé :

Cette étude propose d'examiner, par la voie de l'expérimentation, les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé évaluant dans un canal trapézoïdal asymétrique avec un convergent trapézoïdal.

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 la variation des longueurs L_j en fonction de nombre de Froude F_1 .

Les équations obtenues sont représentées en termes adimensionnels, afin de permettre leur utilisation dans la pratique.

Mots clés : Ressaut hydraulique, canal trapézoïdal asymétrique, longueurs caractéristiques, Bassin de dissipation.

تقتراح هذه الدراسة فحصا بالطريقة التجريبية لخصائص طول القفزة الهيدروليكية المراقبة داخل قناة مفتوحة ذات شكل شبه منحرف غير منتظم.

جزئت هذه الدراسة لقسمين: القسم الأول يختص بالأبحاث المتعلقة بالأعمال المنجزة في هذا المجال, أما القسم الثاني ذو طابع تجريبي حيث سمح لنا بإيجاد علاقات تجريبية جيدة تظهر تغير طول القفزة المائية بدلالة رقم فرود. العلاقات التي تم التحصل هي بدون أبعاد وذلك لاستعمالها في الواقع.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

PREMIERE PARTIE:

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE	1
---	---

CHAPITRE I :

I. Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

I.1. Introduction	3
I.2 Ressaut hydraulique classique.....	3
I.2.1. classification du ressaut hydraulique classique.....	5
I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	5
I.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	7
I.2.3.1. Longueur du ressaut.....	8
I.2.3.2. Longueur du rouleau.....	9
I.3 : Ressaut contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire.....	11
I.3.1. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince.....	11
I.3.2. Seuil continu à paroi épaisse.....	12
I.4. Rendement du ressaut hydraulique.....	15
I.5. Conclusion.....	17

CHAPITRE II :

II. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal

II.1. Introduction.....	19
II.2. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal symétrique.....	19
II .2.1. Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal.....	19
II.2.1.1. Rapport des Hauteurs conjugués du ressaut.....	21
II.2.1.1.1 Cas particulier du canal rectangulaire	21
II.2.1.1.2. Cas particulier du canal triangulaire	22
II.2.2. Caractéristique du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal	24
II.2.2.1. Longueur du ressaut	24
II.3. Rendement	26
II.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire	27
II.3.2. Cas du canal triangulaire	27
II.3. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique.....	29
II.3.1. Approche d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954	29
II.3.1.1. Analyse de la section totale.....	30

II.3.1.2. Analyse de bande longitudinale (volume de contrôle)	31
II.3.1.3. Discussion des résultats	32
II.3.2.Approche d'Hubert Chanson.....	34
II.3.2.1. Propagation positive de ressaut dans un canal non rectangulaire (Canal trapézoïdal asymétrique).....	35
II.3.2.2. Installation expérimentale.....	36
II.4. Conclusion.....	40
CONCLUSION PREMIERE PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE.....	41

DEUXIEME PARTIE :

ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE I :

I. Étude expérimentale du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique.....	44
I.1.Introduction	44
I.2. Description du modèle expérimental.....	45
I.3. Appareillages de mesure.....	50
I.3.1. Débitmètre à diaphragme	50
I.3.1.1 Technique de mesure de débit	51
I.3.1.2 Vérification de la validité de la relation (1.1)	52
I.3.2. Limnimètre.....	53
I.4. Conclusion.....	54

CHAPITRE II :

II. Résultats expérimentaux	56
II.1. Introduction	56
II.2. Procédure expérimentale.....	56
II.3. Analyse des résultats expérimentaux.....	57
II.3.1 Variation de la longueur du ressaut (L_j) pour toute la gamme	60
II.3.2 Longueurs relatives du ressaut	63
II.3.2.1 Variation de la longueur relative du ressaut $\lambda_{j1} = L_j/h_1$ en fonction de nombre du Froude F_1	66
II.3.2.2 Variation de la longueur relative du ressaut $\lambda_{j2} = L_j/h_2$ en fonction de nombre du Froude F_1	70
II.4 Conclusion.....	71
II.4 CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE.....	72

CONCLUSION GENERALE

Principales notation

Liste des Tableaux

Liste des figures

Références bibliographiques

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Les ouvrages de retenue, tels que les barrages hydrauliques, sont souvent soumis à de fortes crues. En périodes de crues, la retenue étant pleine, l'eau est restituée à travers un évacuateur de crue vers la rivière. Le lit de la rivière se trouve alors confronté à un écoulement torrentiel à forte énergie cinétique. Celle-ci engendre des forces tractrices néfastes par leur caractère érosif. Afin d'éviter d'importantes modifications du lit de la rivière situé à l'aval du barrage, il est nécessaire de dissiper cette énergie. Le moyen le moins onéreux et le plus pratique est certainement le ressaut hydraulique. Le principe consiste à transformer l'écoulement torrentiel en un écoulement fluvial engendrant une diminution des forces tractrices.

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. *Leonardo de Vinci (1452-1519)* fut le premier à étudier le phénomène hydraulique du ressaut. Plus tard, d'autres chercheurs ont également essayé d'expliquer ce phénomène.

En premier lieu, c'est *Bidone (1781-1839)* qui a donné la mesure et la description du phénomène du ressaut hydraulique. Plus tard, *Bélanger (1928)* a, pour la première fois, présenté une expression mathématique quand au rapport des hauteurs conjuguées du ressaut ; pour cela, il a appliqué le principe de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de lit horizontal.

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)* qui a 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 type se fait à la base des études expérimentales effectuées au laboratoire.

Notre présent mémoire comporte deux grandes parties.

➤ La première partie est une revue bibliographique divisée en deux chapitres.

1. Le premier chapitre consiste à passer en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique, évaluant dans un 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)*.

Le deuxième chapitre sera consacré aux travaux effectués par *Silvester (1964)*. 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 Wanoschek (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)* et *Hubert chanson (2018)*.

➤ La deuxième partie sera consacrée à l'étude expérimentale, elle est divisée en deux chapitres :

1. Dans le premier chapitre nous allons donner une description détaillée au modèle expérimental utilisé pour entamer l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal prismatique de forme trapézoïdal asymétrique.
2. Le deuxième chapitre a pour but d'étudier expérimentalement des longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal trapézoïdal asymétrique avec convergent trapézoïdal.

PREMIERE PARTIE :

Etude Bibliographique

Introduction De La Première Partie

Cette partie consiste à passer en revue sur les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique. Ce phénomène hydraulique que nous essayons de développer, est l'objet de recherche de plusieurs hydrauliciens, étrangers ou locaux. Ces chercheurs ont abouti à des résultats fiables, basés sur des essais effectués au laboratoire, d'une part pour obtenir une parfaite structure du bassin d'amortissement et, d'autre part pour résoudre les problèmes d'érosion du lit de l'oued, à l'aval des barrages.

Pour organiser notre travail, nous avons divisé la première partie en deux chapitres essentiels.

Le premier chapitre est consacré à citer l'évaluation dans le temps du ressaut hydraulique. En premier lieu, nous avons abordé le ressaut hydraulique classique, évoluant en canal de section droite rectangulaire, de pente faible ou nul, et nous avons 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.

Le deuxième chapitre sera consacré aux travaux effectués par *Silvester (1964)*, *Wanoschek et Hager (1989)*, sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique, ainsi que l'approche présentée par *Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954)* et *Hubert Chanson (2018)* sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique.

CHAPITRE I :

Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

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 doute à une meilleure compréhension du phénomène, tant du point de vue de sa structure interne que de son comportement externe, (**figure 1.1**). [14]

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.

Dans ce chapitre nous examinerons le ressaut hydraulique classique, contrôlé et forcé. [8]

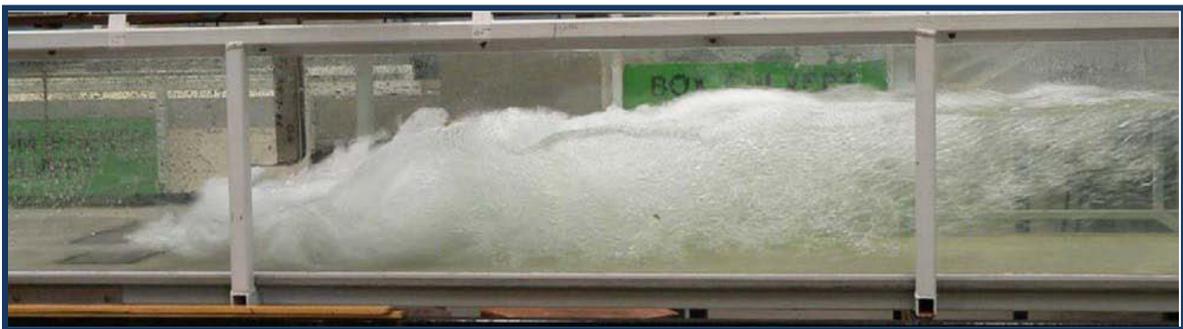


Figure 1.1: Ressaut hydraulique dans un canal horizontal rectangulaire

I.2. Ressaut hydraulique classique

Le ressaut classique est celui qui se produit librement dans un bassin de dissipation de forme rectangulaire, sans aucun obstacle avant la fin du ressaut.

Anderson (1978) a étudié expérimentalement les ressauts hydrauliques pour lesquels. L'auteur a conclu que ces ressauts ne répondent pas aux exigences d'un bassin de dissipateur d'énergie ; les ressauts correspondants sont dits ondulés, présentant tantôt une surface libre régulièrement perturbée et lisse, tantôt une surface libre irrégulièrement ondulée. Pour des nombres de Froude, en excluant les formes du ressaut obtenues à des profondeurs initiales variant entre h_1 et h_2 , ont proposé quatre formes distinctes, correspondant chacune à une gamme du nombre de Froude.

Chapitre I: Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

Le ressaut faible ou le pré-ressaut, le ressaut oscillant ou de transition, le ressaut stationnaire ou stable et le ressaut fort ou clapoteux. Les caractéristiques du ressaut sont principalement :

Les longueurs **L_r** et **L_j** qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut.

Les hauteurs **h₁** et **h₂**, appelées également hauteurs conjuguées. La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ses sections. L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un nombre de Froude **Fr₁>1** étroitement lié au débit volumique, à la hauteur initiale **h₁** ainsi qu'à la forme géométrique du canal. Le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation **Y=h₁/h₂**. [31]

I.2.1. classification du ressaut hydraulique classique

Selon la classification proposée par **Bradley et Peterka (1957)**, le ressaut classique peut se présenter sous quatre configurations distinctes. Cette classification se base principalement sur la valeur du nombre de Froude **Fr₁** caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, en excluant les formes obtenues pour **Fr₁ < 1,7**. Ces dernières sont décrites par plusieurs auteurs tel que **Anderson (1978)** et ne répondent pas aux exigences d'un bassin de dissipation d'énergie ; les ressauts correspondants sont dits ondulés présentant tantôt une surface libre régulièrement perturbée et lisse (**1<Fr₁<1,4**), tantôt une surface libre irrégulièrement ondulée (**1,4<Fr₁<1,7**). (Figure 1.2.a). [16]

I. 2.1.1. Le pré - ressaut

Il est obtenu pour la gamme **1,7< Fr₁ <2,5** (figure 1.2.b). La surface du ressaut est composée d'une série de petits rouleaux pour **Fr₁ =1,7** ; ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude **Fr₁** augmente. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible.

I. 2.1.2. Ressaut de transition

Le ressaut de transition est Obtenu pour la gamme **2,5<Fr₁<4,5** (figure 1.2.c). Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très Irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

I.2.1.3. Ressaut stable

Il est Obtenu pour la gamme **4,5<Fr₁< 9** (la figure 1.2.d). C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans les bassins de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre **45 et 70%**), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

Chapitre I : Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

I.2.1.4. Ressaut agité ou clapoteux

Obtenu pour $Fr_1 > 9$ (la figure 1.2.e). Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très grande. Il présente une instabilité, verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.

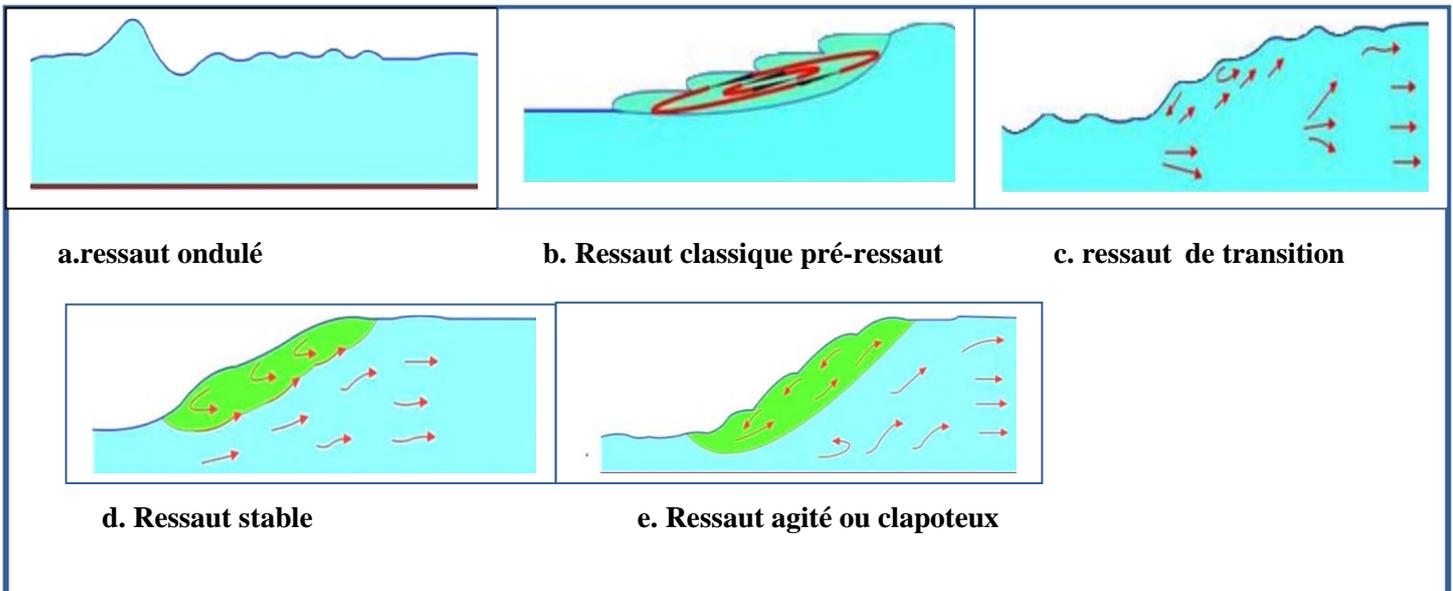


Figure 1.2 : classification du ressaut hydraulique classique. [4]

I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure (1.3) montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiales et finales 1 et 2.

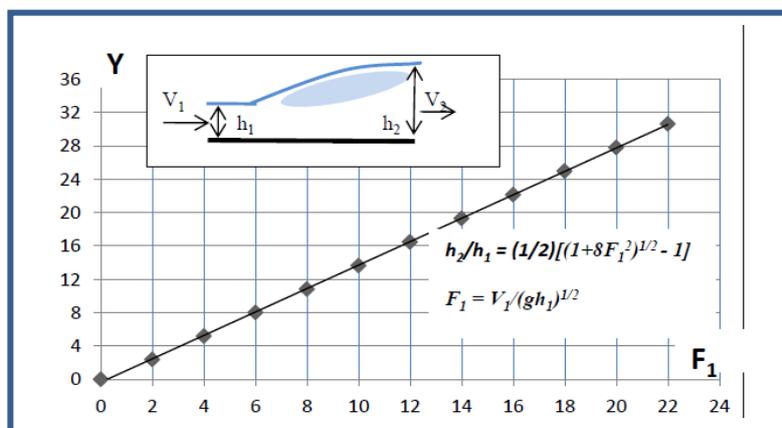


Figure .13: rapport des hauteurs du ressaut en fonction du nombre de Froude en amont pour un canal rectangulaire horizontal.

Chapitre I : Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

L'écoulement à l'amont du ressaut (à l'origine) est caractérisé par une profondeur h_1 et une vitesse moyenne V_1 . L'équation de continuité permet d'écrire :

$$V_1 = Q/A_1 \quad (1.1)$$

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

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

b : est la largeur du canal rectangulaire.

Comme nous l'avons déjà dit 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.

D'après **Belanger (1828)** ; **Hager (1980)**, l'application du **théorème d'Euler** nécessite quelques hypothèses simplificatrices :

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

Sachant que $\rho.Q.v$ représente la quantité de mouvement, l'application de la **loi de Newton** mène à écrire :

$$\varpi.b.h_1^2/2 + \rho.Q.v_1 = \varpi.b.h_2^{*2}/2 + \rho.Q.v_2^* \quad (1.3)$$

h_2^* : hauteur final de ressaut classique.

V_2^* : vitesse d'écoulement de ressaut classique.

Où $\varpi = \rho.g$, ρ est la masse volumique du liquide et g l'accélération de la pesanteur.

En tenant compte des relations (1.1) et (1.2) et sachant que le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut est tel que :

$$Fr_1 = (Q^2 / g.b^2 .h_1^3) \quad (1.4)$$

Chapitre I :

Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

$$Y^* = h_2^* / h_1$$

$$Fr_1^2 (b \cdot h_1^2) + (h_1^2 \cdot b) / 2 = Fr_1^2 (b \cdot Y^{*2} \cdot h_1^2) / Y^{*3} + (Y^{*2} \cdot h_1^2 \cdot b) / 2$$

$$Fr_1^2 \left(1 - \frac{1}{Y^*}\right) = \left(\frac{Y^{*2}}{2} - \frac{1}{2}\right)$$

$$Fr_1^2 \left(\frac{Y^* - 1}{Y^*}\right) = \left(\frac{1}{2}\right) (Y^* + 1)(Y^* - 1)$$

$$2Fr_1^2 = (Y^* + 1) Y^*$$

$$8Fr_1 + 1 = 4 Y^{*2} + 4 Y^* + 1$$

$$8Fr_1 + 1 = (2 Y^* + 1)^2$$

La relation (1.3) conduit à écrire :

$$Y^* = h_2^* / h_1 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 Fr_1^2} - 1 \right] \quad (1.5)$$

La relation (1.5) est connue sous le nom d'équation de **Bélangier** et 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 $Fr_1 > 2$:

$$Y^* = h_2 / h_1 = \sqrt{2} \cdot Fr_1 - \frac{1}{2} \quad (1.6)$$

I.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut

Le ressaut hydraulique est caractérisé par la longueur L_r^* de son rouleau ainsi que par la longueur L_j^* sur laquelle il s'étend. Ces caractéristiques n'ont pu être évaluées que par la voie de l'expérimentation, (**figure.1.4**). [32]

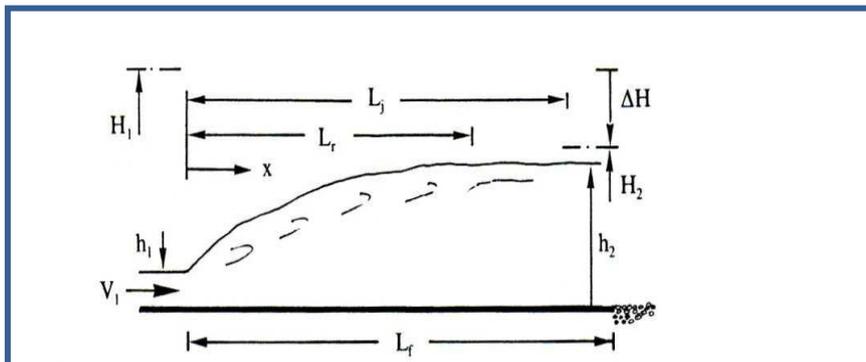


Figure 1.4 : Longueur caractéristiques du ressaut

Chapitre I : Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

I.2.3.1. Longueur du ressaut

En effet, on estime que la longueur L_j^* doit être mesurée toujours entre le pied du ressaut et la section aval de sorte que :

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

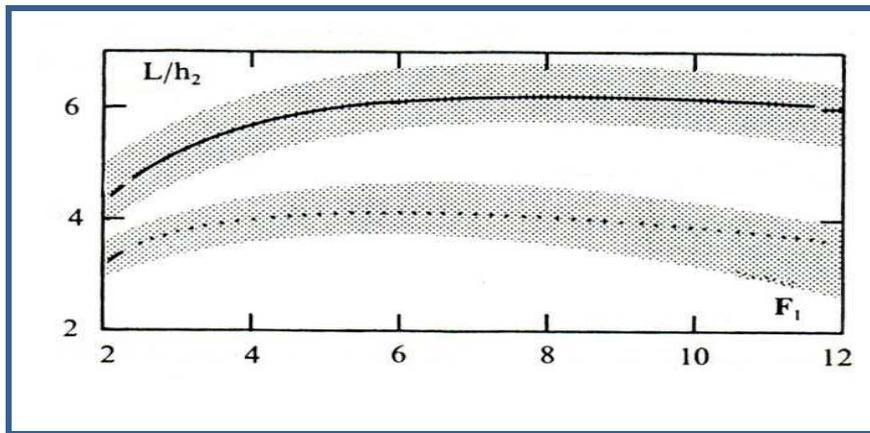


Figure 1.5 : Notations adoptées pour le ressaut hydraulique sur fond horizontal en canal prismatique.

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:

$$L_j^* / h_1 = 220. \operatorname{Tgh} [(F_1-1)/22] \quad (1.7)$$

D'après **Hager et al (1990)**, la variation de la longueur relative L_j^*/h_2 en fonction du nombre de Froude F_{R1} indique que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à **6** pour la gamme pratique $4 < F_{R1} < 12$.

$$L_j^*/h_2^* = 6 \quad (1.8)$$

Chapitre I : Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

I.2.3.2. Longueur du rouleau

En 1990, Hager et al (1990) définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisant ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé. (Figure 1.6) montre ces deux types de ressaut et les longueurs L_r^* qui leur correspondent. [33]

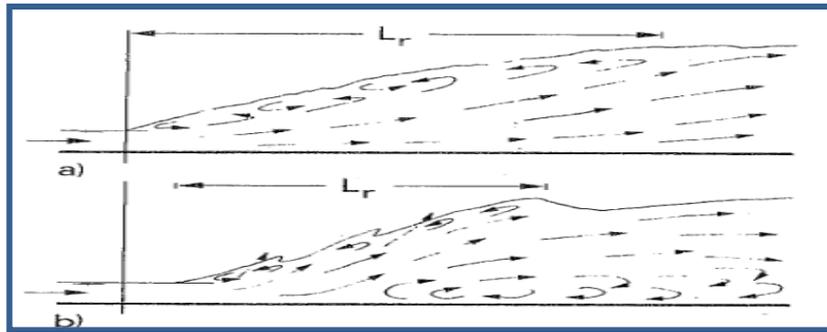


Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique.

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. [17]

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. [17]

Les essais effectués par Hager et al (1990) indiquent que, pour le cas du ressaut classique, le rapport $\lambda_r^* = L_r^* / h_1$ dépend du nombre de Froude F_{r1} et du rapport d'aspect

$W = h_1/b$. Les auteurs proposent les relations suivantes:

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

(1.9)

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

(1.10)

Chapitre I: Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

Tgh: désigne la tangente hyperbolique.

Les auteurs notent que pour $F_1 < 8$, les relations (1.7) et (1.8) peuvent être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

$$\lambda r^* = Lr^* / h_1 = 8 \cdot (F_1 - 1,5) ; 2,5 < F_1 < 8 \quad (1.11)$$

I.3 : Ressaut contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse **Forster et Skrinde (1950)** ; **Achour (1997)**, continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative. Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau 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)**. [28]

L'analyse dimensionnelle montre que la relation liant :

- le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident
- la hauteur géométrique s du seuil
- la hauteur initiale h_1 du ressaut
- la hauteur h_2 à l'amont immédiat du seuil
- la position x du seuil comptée à partir du pied du ressaut
- la profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval du seuil

I.3.1. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince

Approche de **Forster et Skrinde (1950)** 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 (**figure 1.7**) : [3]

- 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

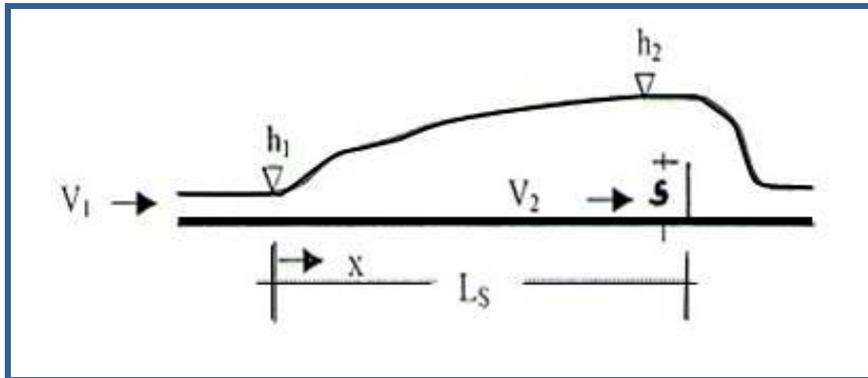


Figure 1.7: Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince

1.3.2. Seuil continu à paroi épaisse

Le seuil est considéré comme épais lorsque le profil liquide s'y écoulant est presque parallèle au fond, pour peu que la longueur L du seuil soit suffisante (**figure 1.8**). 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 :

$$0,1 \leq (h_2 - s/l) \leq 0,35$$

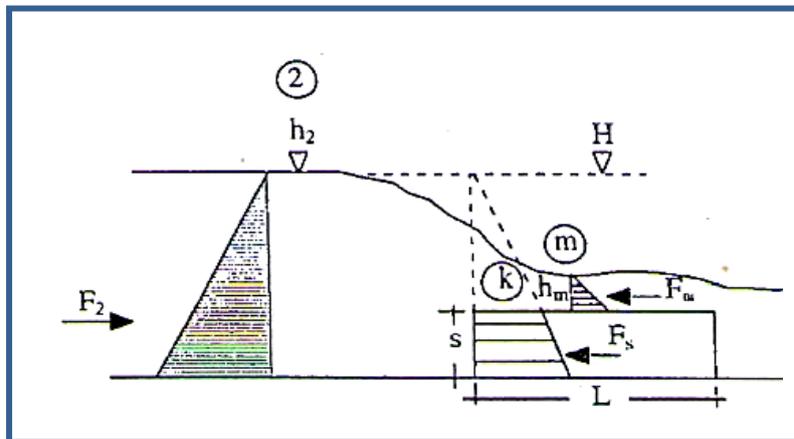


Figure 1.8 : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L. Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions

Chapitre I : Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

I.3.Rendement du ressaut hydraulique :

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. [8]

Par l'application du théorème de **Bernoulli (1738)** on peut déterminer la perte d'énergie, $\Delta H_{12} = H_1 - H_2$ produite par le ressaut en admettant que $Z_1 = Z_2$ (canal horizontal), (**figure 1.9**).

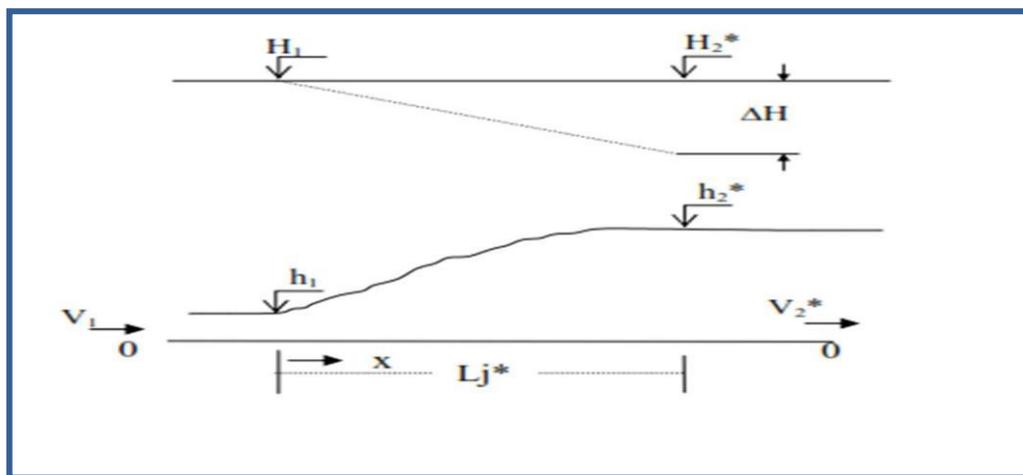


Figure 1.9 : Schéma de charge totale le long de ressaut classique

La figure (1.9) on obtient :

$$\Delta E = \Delta H_{1-2} = H_1 - H_2$$

(1.12)

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

$$H_1 = \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} + h_1$$

(1.13)

Et la charge totale dans la section aval est :

$$H_2 = \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + h_2$$

(1.14)

Chapitre I : Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

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

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

$$\Delta H = H_1 - H_2 \quad (1.15)$$

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

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (1.16)$$

Où $A_1 = b \cdot h_1$ et $A_2 = b \cdot h_2$. En tenant compte des relations (1.13), (1.14) et (1.15), (1.16)

S'écrit:

$$\Delta H = (h_1 - h_2) + \frac{(h_1^2 - h_2^2)}{(q \cdot (2 \cdot g))} \quad (1.17)$$

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

$$q^2 / (2 \cdot g) = (h_1 \cdot h_2^2 + h_1^2 \cdot h_2) / 4 \quad (1.18)$$

On remplaçant la relation (1.18) dans (1.17) on obtient :

$$\Delta H_{12} = \frac{(h_2 - h_1)^2}{(4 h_2 \cdot h_1)} \quad (1.19)$$

Donc à partir de la relation (1.15) 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 η :

Chapitre I: Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

$$\eta = \frac{\Delta H_{12}}{H_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (1.20)$$

Le rapport $\frac{h_2}{h_1}$ est appelé efficacité du ressaut. Donc pour déterminer les charges totales dans les sections amont et aval on utilise les relations (1.13) et (1.14) et en tenant compte de la relation (1.4) du nombre de Froude on obtiendra :

$$H_1 = h_1 \cdot \left[1 + \frac{F_1^2}{2} \right] \quad (1.21)$$

$$H_2 = h_1 \cdot \left[Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right] \quad (1.22)$$

En remplaçant (1.21) et (1.22) dans l'expression du rendement du ressaut (1.20) on obtiendra :

$$\eta = 1 - \left[\frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \right] \quad (1.23)$$

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

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2 \quad (1.24)$$

Chapitre I: Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

Les relations (1.23) et (1.24) sont représentées graphiquement sur un système des coordonnées cartésiennes, illustrés par la figure (1.10).

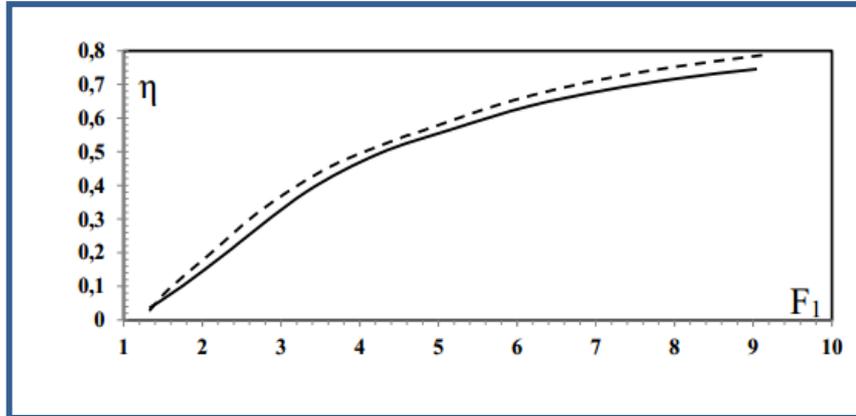


Figure 1.10 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude Fr_1 (—) Courbe tracée selon la relation (1.18), (----) courbe tracée Selon la relation (1.19)

D'après l'analyse de la courbe $\eta = f(Fr_1)$ nous constatons que le rendement η du ressaut classique est supérieur à 50 % pour une valeur de nombre de Froude $Fr_1 \geq 5.1$ et que les rendements calculés par l'application de la relation (1.24) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.23) d'autre par; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%. [2]

Chapitre I : Ressaut Hydraulique En Canal Rectangulaire

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé, en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire (ressaut hydraulique classique). Nous avons présenté les différentes formes du ressaut, selon la classification de *Bradley et Peterka (1957)*.

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 .

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.

Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, (*Forster et Skrinde, 1950*), et contrôlé par seuil de paroi épais, (*Rao et Murlidhar, 1963*).

A la fin de chapitre, nous avons examiné, le rendement de ressaut hydraulique après la relation de perte de charge, (*Benmalek A, 2012*).

DEUXIEME CHAPITRE :

Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal

Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal

Chapitre II : Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

II.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 *Silvester (1964)* 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.

Ce chapitre a été divisé en deux parties.

La première partie concerne le ressaut dans le canal trapézoïdal symétrique.

Dans la deuxième partie, le ressaut hydraulique évoluant dans le canal trapézoïdal asymétrique sera exposé à travers les travaux de *d'Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954)*.

II.2. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal symétrique

Nous allons citer quelques travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. Nous citerons ceux effectués par *Wanoschek et Hager (1989)*. [27]

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

$$\left(\frac{L_j}{h_2 - h_1} \right) = 7.1 * (1 + 10M) \quad (2.1)$$

Avec :

- $M = \frac{mh_1}{b}$ = où : $m = \cotg(\theta)$, (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.

Chapitre II :

Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

II .2.1.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 pratique le canal trapézoïdal représente un cas particulier intéressant. [16]

II.2.1.1.Rapport des Hauteurs conjugués du ressaut :

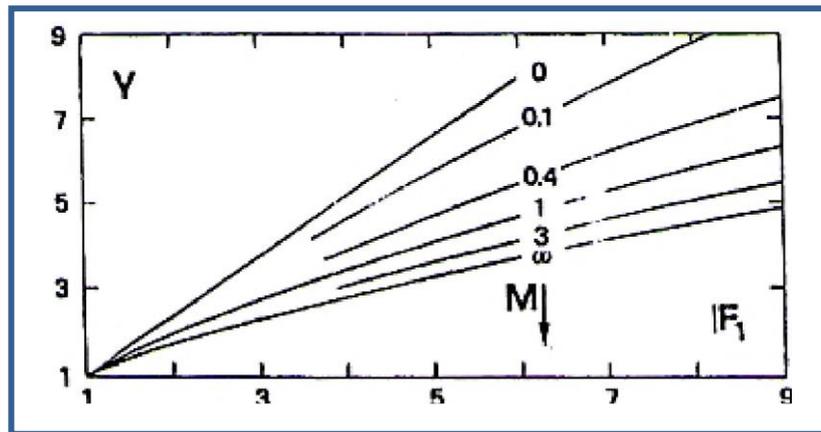


Figure 2.1: Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M .

$0 < M < \infty$: profil trapézoïdaux.

$M = 0$: profil rectangulaire.

$M \rightarrow \infty$: profil triangulaire

La figure (2.1) montre clairement que la plus faible valeur de rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut est obtenue dans le cas du profil triangulaire, pour une même valeur du nombre de Froude F_{r1} de l'écoulement incident.

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

$$A_1 = b.h_1 + m.h_1^2 \quad (2.2)$$

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

Chapitre II : Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

b : la base de la section du canal trapézoïdal.

h: la hauteur de l'eau

m : la cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal à section droite trapézoïdal.

L'application de cette équation nécessite quatre hypothèses simplificatrices:

- la répartition des pressions dans la section finale et initiale est hydrostatique;
- la distribution des vitesses est uniforme;
- la perte de charge par frottement est négligeable;
- la résistance de l'air est négligeable.

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

$$\frac{b \cdot h_1^2}{2} + \frac{m \cdot h_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b \cdot h_1 + m h_1^2)} = \frac{b \cdot h_2^2}{2} + \frac{m \cdot h_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b \cdot h_2 + m h_2^2)} \quad (2.4)$$

h₁ et **h₂** sont respectivement les hauteurs initiale et finale du ressaut, et **g** est l'accélération de la pesanteur.

On peut donc écrire que : Le nombre de Froude **F_{r1}** caractérisant l'écoulement dans la section initiale du ressaut est tel que :

$$F_{r1} = \sqrt{\frac{Q^2 [b(1+2M)]}{g [b h_1 (1+M)]^3}} \quad (2.5)$$

L'équation (2.5) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme :

$$F_{r1}^2 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (2.6)$$

Le paramètre **Y** est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, on peut aussi écrire :

$$Y = h_2/h_1 \text{ et } M = mh_1/b \quad (2.7)$$

Chapitre II : Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

II.2.1.1.1. Cas particulier du canal rectangulaire :

Pour le cas du ressaut hydraulique évaluant en canal rectangulaire, M ($m = 0$ et $M = 0$).

Belanger (1828), propose la relation suivante pour déterminer le rapport des hauteurs conjuguées:

$$Y = \frac{1}{2}[(1+8F_{r1}^2)^{1/2} - 1] \quad (2.8)$$

II.2.1.1.2. Cas particulier du canal triangulaire

Hager (1988) a donné une forme approchée pour déterminer les hauteurs conjuguées dans un canal triangulaire selon la relation suivante:

$$Y = (3/2 F_{r1}^2 - 1)^{1/3} \quad (2.9)$$

II.2.2. Caractéristique du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

II.2.2.1. Longueur du ressaut

La longueur du ressaut hydraulique L_j en canaux trapézoïdaux mesurée le long de l'axe du canal est trouvée moins détachée que celle en canal rectangulaire. [28]

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 $F_{r1} > 4$. Les dimensions de ce type de rouleau pourront être données par les grandeurs suivantes : (**figure 2.2**).

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

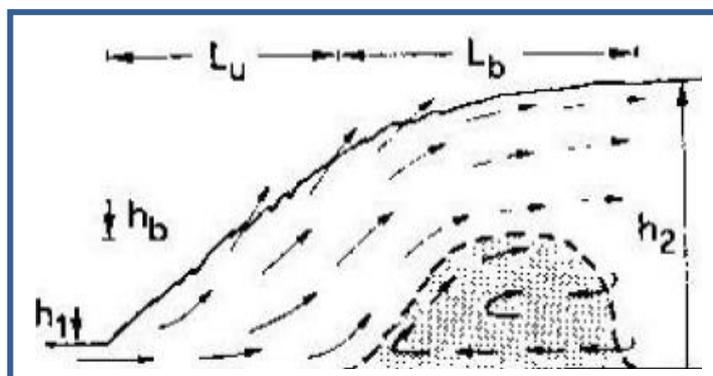


Figure 2.2: Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdal

Chapitre II : Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

II. 3. Rendement du ressaut :

La perte de charge ΔH du ressaut est par définition la différence des charges initiale et finale : $\Delta H = H_1 - H_2$. La perte de charge relative est par définition comme étant le rapport de ΔH à la charge initiale H_1 :

$$\eta = \Delta H / H_1 = H_1 - H_2 / H_1 \tag{2.10}$$

Pour : $H_1 = h_1 + Q^2 / 2gA_1^2$; $H_2 = h_2 + Q^2 / 2gA_2^2$

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

$$Y = h_2 / h_1 \text{ et de } M = mh_1 / b.$$

Ainsi que du nombre de Froude F_1 tel que : $F_1^2 = Q^2 (b + 2mh_1) / g (bh_1 + mh_1)^3$

On obtiendra :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \left[\frac{(1+M)^3}{(1+2M)(1+MY)^2} \right]}{1 + \frac{F_1^2}{2} \frac{(1+M)}{(1+2M)}} ; 0 < \eta < 1 \tag{2.11}$$

La relation (2.11) 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.

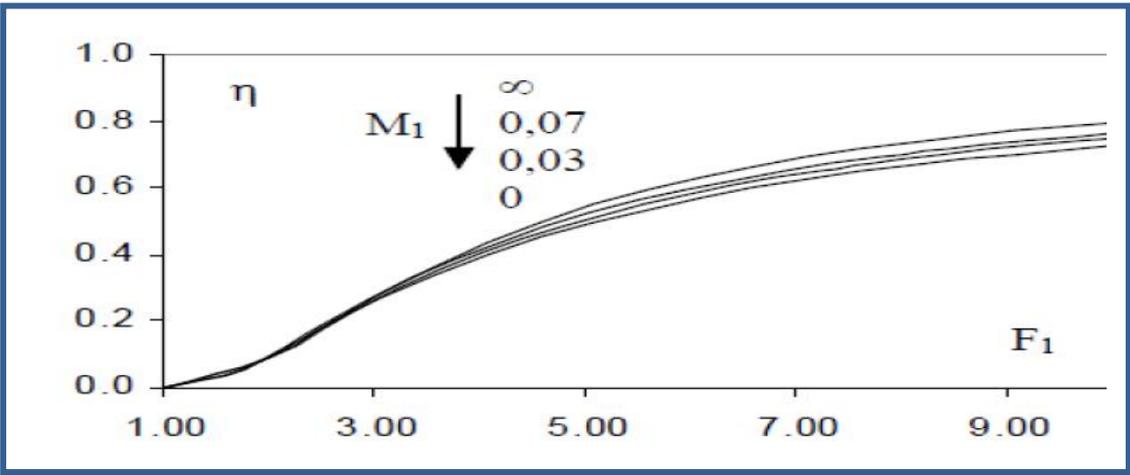


Figure 2.3 : Variation du rendement η du ressaut en canal trapézoïdal en fonction du nombre de Froude F_1 pour différentes valeurs de M_1 (Equation (2.11)).

Chapitre II : Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

II.3.1 Cas particulier du canal rectangulaire

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

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

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

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right]^2 \quad ; F_1 > 2.5 \quad (2.13)$$

II.3.2 Cas du canal triangulaire

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

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{1}{4}} \quad (2.14)$$

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

$$\eta = \left[\left(1 - \frac{12}{F_1^4}\right)^{1/3}\right]^2 \quad (2.15)$$

Chapitre II :

Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

II .4. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique

II .4.1. Approche d'Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954) :

Dans cette approche, **Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954)** 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 de la figure (2.4). [34]

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.

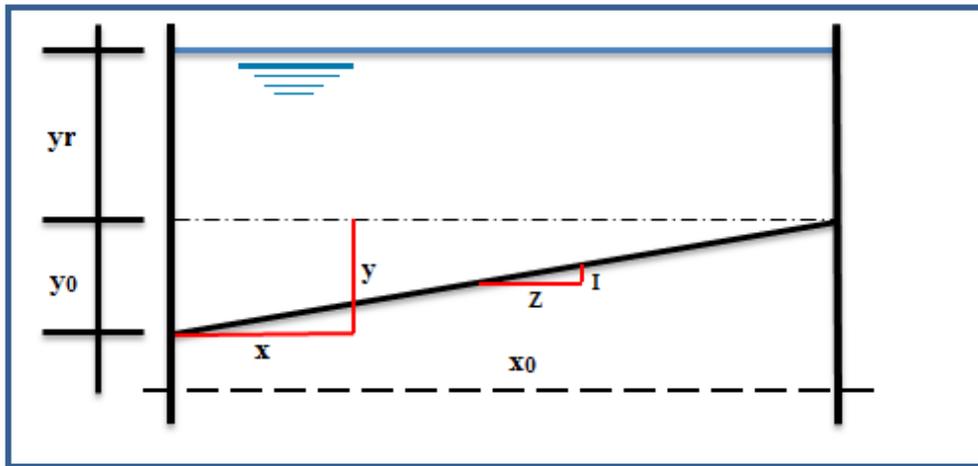


Figure 2.4: Section transversale du canal

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_r : 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_a : 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.

Chapitre II :

Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

$$\Psi = P + M/At.y_0/2$$

$$At = X_0 y_0$$

Surface du triangle (Air d'apparition du ressaut)

$$\Phi = y_r/y_0$$

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

F_1 : Nombre de Froude

γ : Poids spécifique de l'eau

ρ : 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.3.1.1. 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 :

$$P + M = 1/2.x_0y_r^2\gamma + 1/2.x_0y(y_r + y_0/3) + \rho Q^2/x_0y_r + (1/2.x_0y_0) \quad (2.16)$$

La forme adimensionnelle :

$$\Psi = \Phi^2 + \Phi + 1/3 + \theta/(1 + 2\Phi) \quad (2.17)$$

D'après l'équation de la quantité de mouvement, Ψ_1 (amont) = Ψ_2 (aval) :

$$(\Phi_1^2 + \Phi_1 + 1/3) + \theta/(1 + 2\Phi_1) = (\Phi_2^2 + \Phi_2 + 1/3) + \theta/(1 + 2\Phi_2) \quad (2.18)$$

Chapitre II :

Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

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.3.1.2. 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.

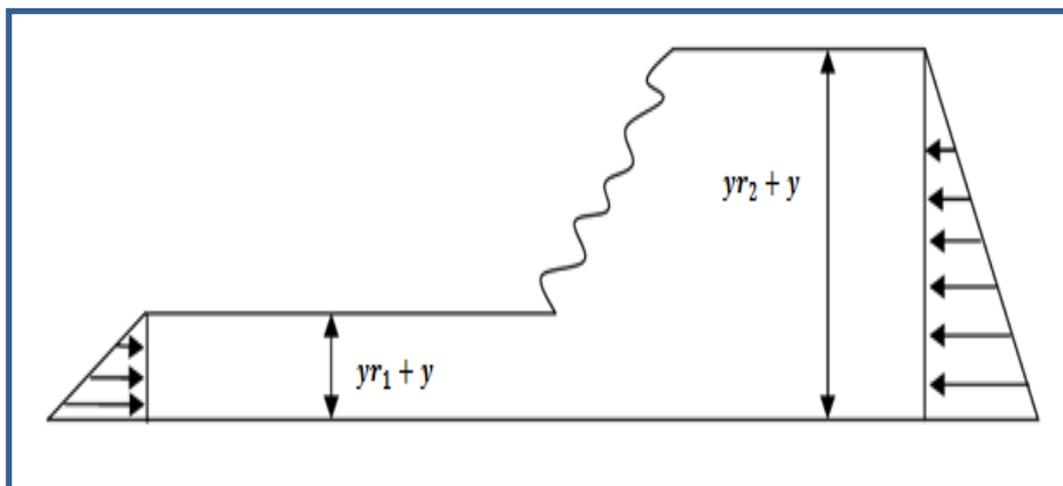


Figure 2.5: Section de la bande longitudinale

Chapitre II :

Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

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

$$\frac{1}{2} (y_{r1} + y) + V_1^2 (y + y_{r1}) = \frac{1}{2} \gamma (y_{r2} + y)^2 + V_2^2 (y + y_{r2}) \quad (2.19)$$

On a : $V = Q/(1 + 2\Phi)$, divisant par γy_0^2 , l'expression suivante est obtenue pour la bande.

$$P + M/\gamma y_0^2 = \frac{1}{2} (y/y_0 + \Phi_1)^2 + \theta (y/y_0 + \Phi_1) / (1 + 2\Phi_1)^2 = \frac{1}{2} (y/y_0 + \Phi_2)^2 + \theta (y/y_0 + \Phi_2) / (1 + 2\Phi_2)^2 \quad (2.20)$$

Pour l'équilibre : $(P + M) = (P + M)S_2$

On a :

$$G = (P+M)S_1 / (P+M)S_2 \quad (2.21)$$

$M = 1$ pour l'équilibre

$M > 1$ pour P+M déficience en amont

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

De la géométrie :

$$y/y_0 = 1 - X/X_0 \quad (2.22)$$

Remplaçant (2.20) dans (2.19) et (2.18) :

$$G_m = \frac{\frac{1}{2} (1 + X/X_0 + \Phi_2)^2 + \theta (1 - \frac{X}{X_0} + \Phi_2) / (1 + 2\Phi_2)^2}{\frac{1}{2} (1 + X/X_0 + \Phi_1)^2 + \theta (1 - \frac{X}{X_0} + \Phi_1) / (1 + 2\Phi_1)^2} \quad (2.23)$$

Chapitre II: Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

Le paramètre **Gm** ressemble au paramètre de forme **H** utilisé dans les études de la couche limite.

La valeur de **Gm** 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 $\frac{dG}{d(\frac{x}{X_0})}$ peuvent être des mesures valables si le ressaut hydraulique est possible.

La valeur maximale de **Gm** se produit au fond le peu profond, où $\frac{x}{X_0} = 1$

$$\mathbf{Gm} = \frac{\frac{1}{2}\phi_2^2 + \theta\phi_2 / (1+2\phi_2)^2}{\frac{1}{2}\phi_1^2 + \theta\phi_1 / (1+2\phi_1)^2} \quad (2.24)$$

Les valeurs de **Gm** par rapport à ϕ pour les différentes valeurs de θ sont illustrées dans la figure (2.5).

D'une manière similaire :

$$\frac{\frac{dG}{d(\frac{x}{X_0})}}{\frac{x}{X_0}} = \mathbf{1} = \frac{G(\phi_2 - \phi_1)}{\phi_1\phi_2} \quad (2.25)$$

Les valeurs $\frac{dG}{d(\frac{x}{X_0})} = \mathbf{1}$.

Sont tracés en fonction de ϕ_1 pour les différentes valeurs de θ représenté dans la figure (2.6).

Le diagramme de **Gm** et $\frac{dG}{d(\frac{x}{X_0})} = \mathbf{1}$ montre les valeurs correspondant aux essais.

Les essais sont effectués à cinq largeurs différentes de canal ou à cinq valeurs différentes de $Y_{r1}/Y_{r1}+Y_0$.

Chapitre II : Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

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_m 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.

Les valeurs théoriques calculées pour le rapport G_m et tracées dans la figure (2.5).

Sont toujours plus grandes que l'unité, ce qui veut dire qu'il y a une augmentation de la quantité de mouvement sur le coté profond du canal et une diminution sur le coté le peu profond.

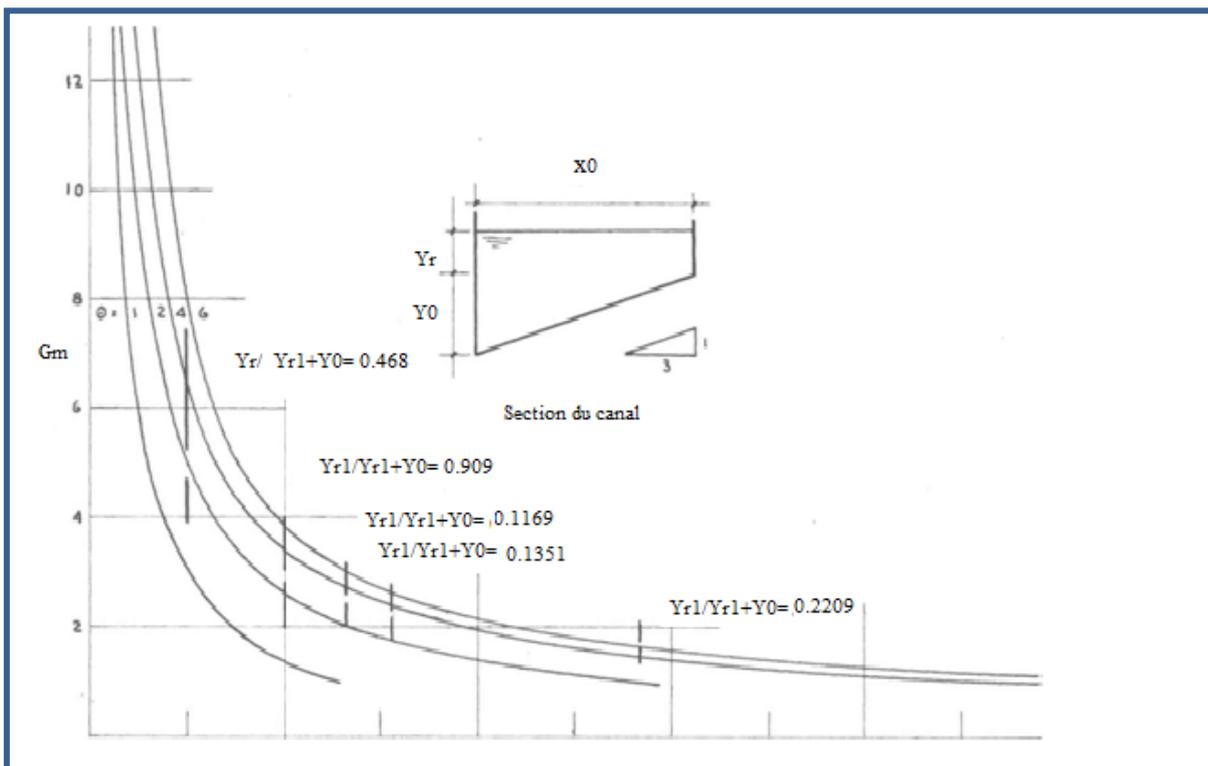


Figure 2.6 : Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté peu profond.

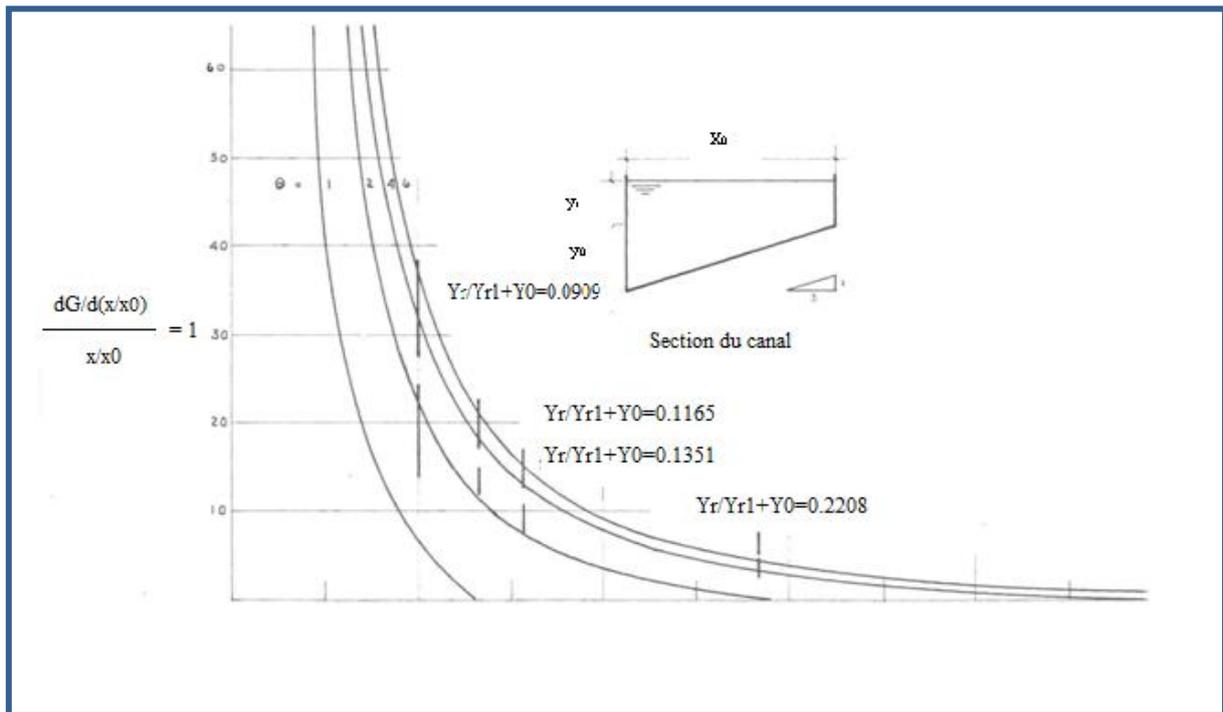


Figure 2.7: Diagramme adimensionnel du taux de changement de **M** sur le côté peu profond.

II.3.1.3. 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.

Chapitre II:

Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

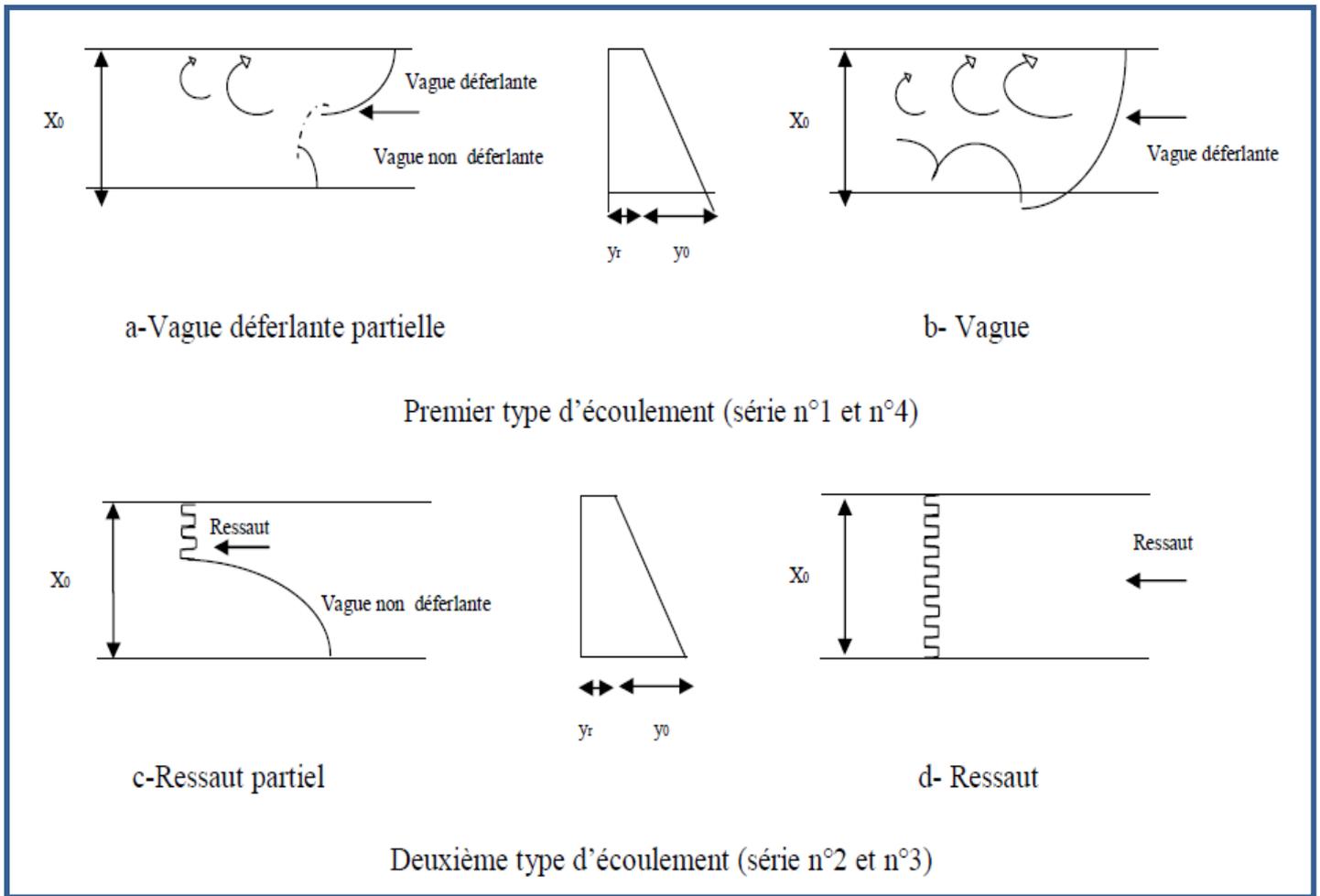


Figure 2.8: Schéma général d'écoulement

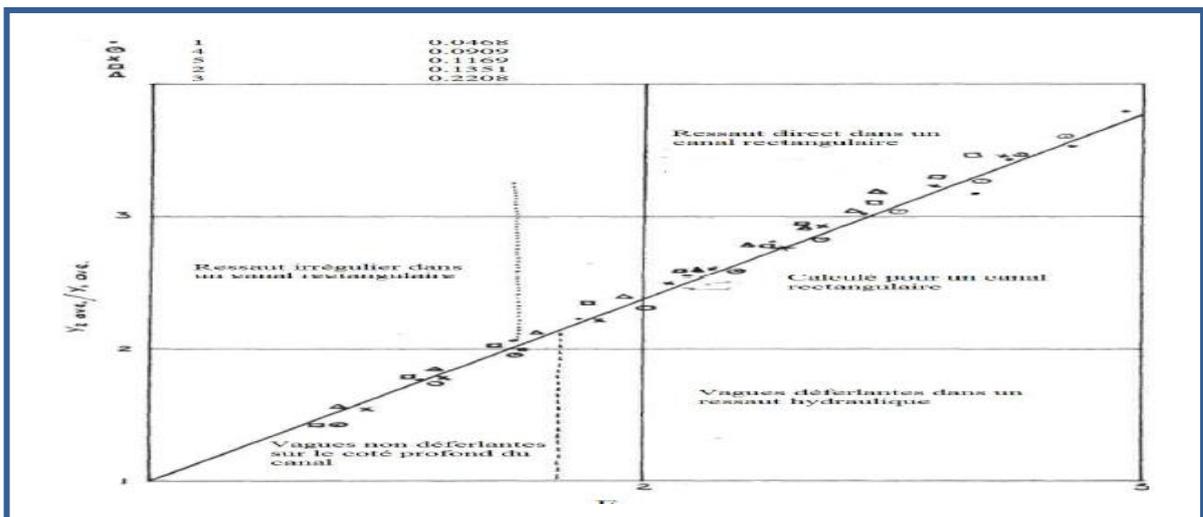


Figure 2.9: Rapports de profondeur moyenne en fonction de numéro de Froude.

Chapitre II :

Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

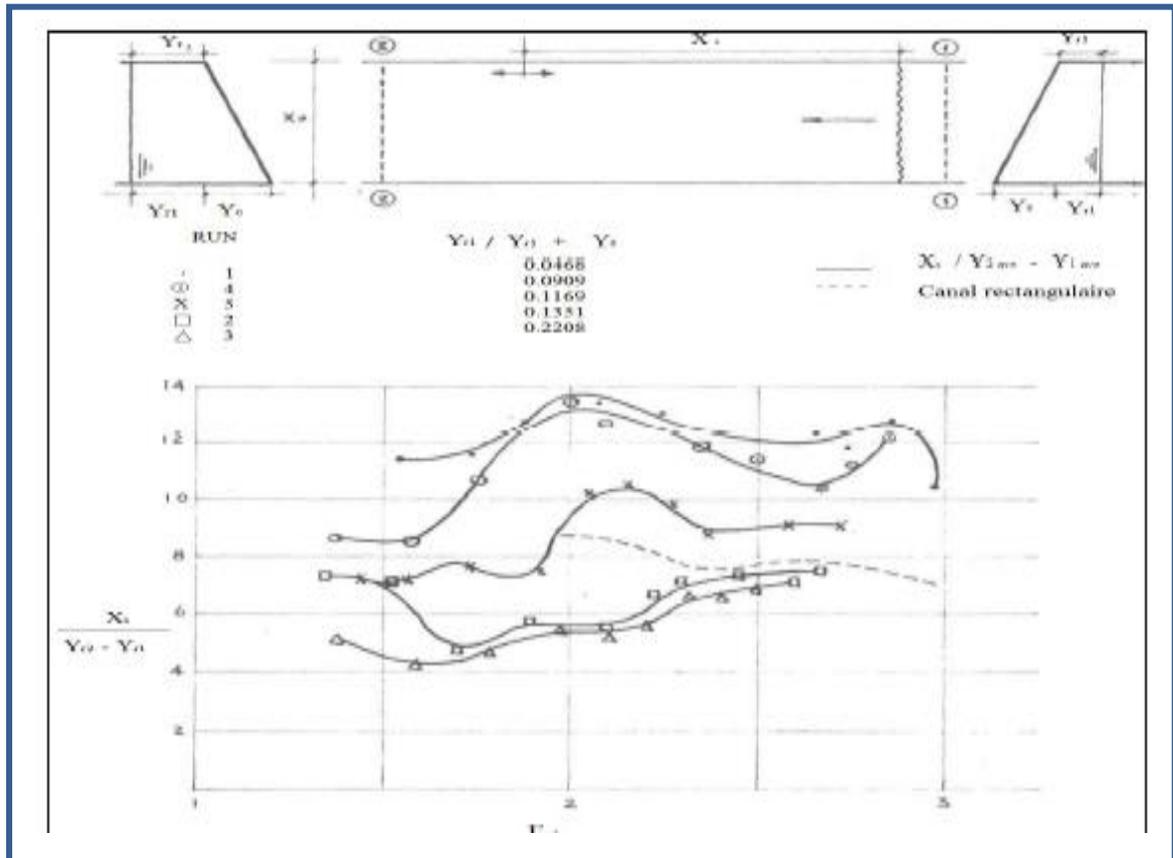


Figure 2.10: Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral du côté peu profond

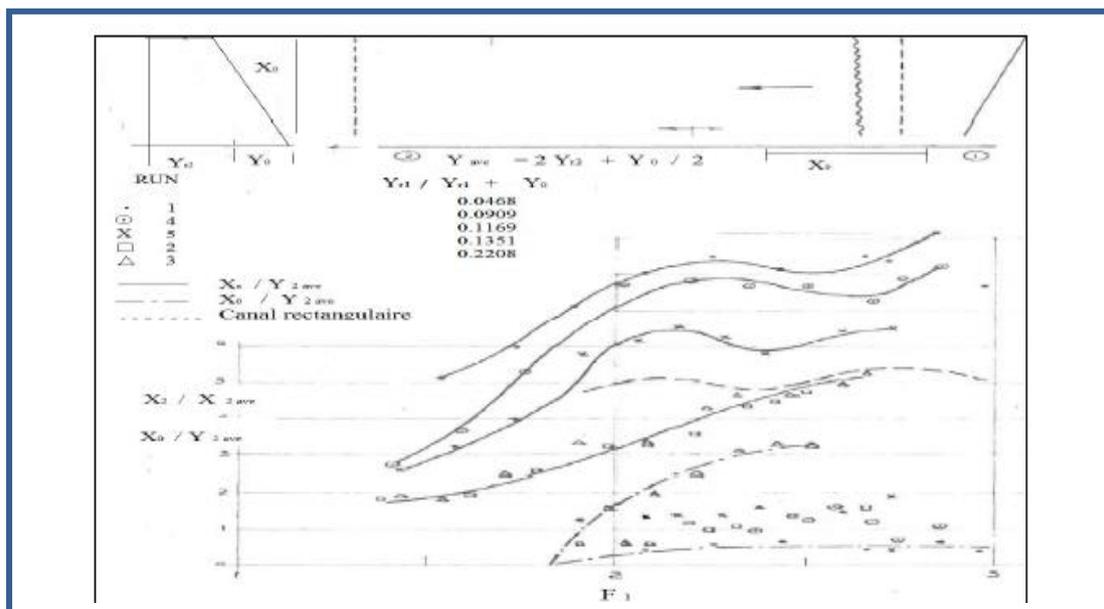


Figure 2.11: Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral des deux côtés du canal.

Chapitre II : Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoidal

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 (2.8), 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 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 **Matzk (1936)** pour la longueur sur la hauteur du ressaut dans un canal rectangulaire sont affichés en pointillés dans la figure (2.9) 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. (**Figures 8 et 9**).

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 **Bakhmeteff** et **Matzk (1936)** sont affichées en pointillés sur la figure (9). La valeur maximale de ce rapport est d'environ **5**.

A partir de la figure (9), 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.

Chapitre II :

Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

II.3.2.Approche d'Hubert Chanson

II.3.2.1. Propagation positive de ressaut dans un canal non rectangulaire (Canal trapézoïdal 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. [30]

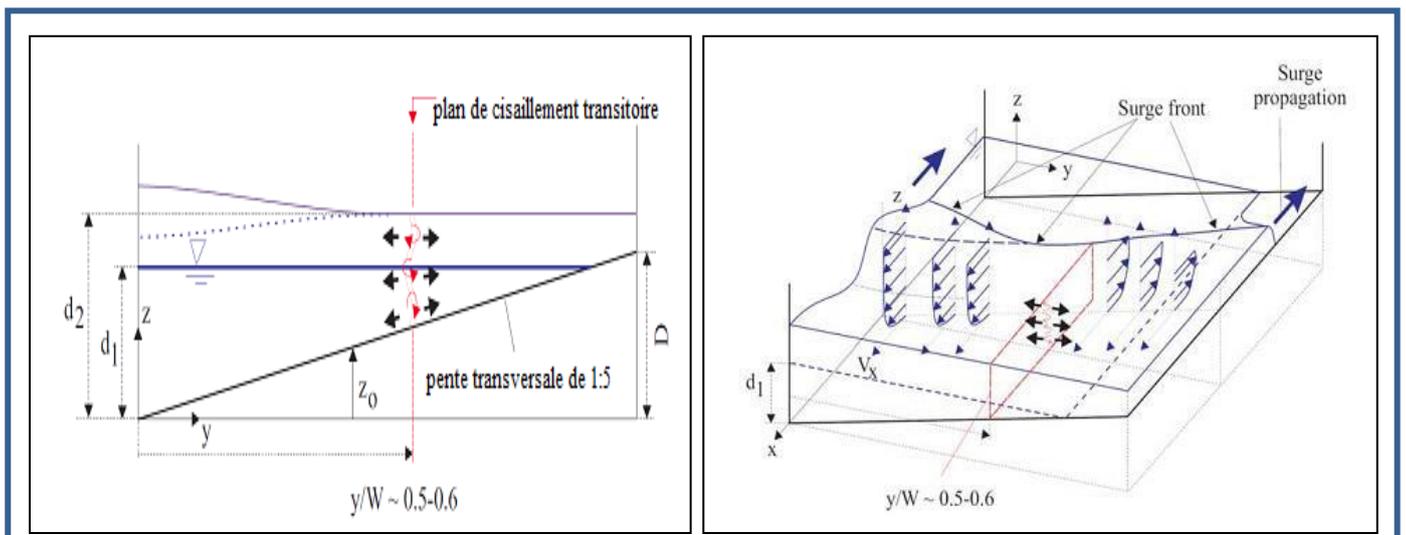


Figure 2.12: Modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la propagation positive du ressaut dans un canal composé prismatique ($d_1/D < 1$)

Chapitre II :

Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

II.3.2.2. 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 ($x = 18.1 \text{ m}$) 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 2.13).

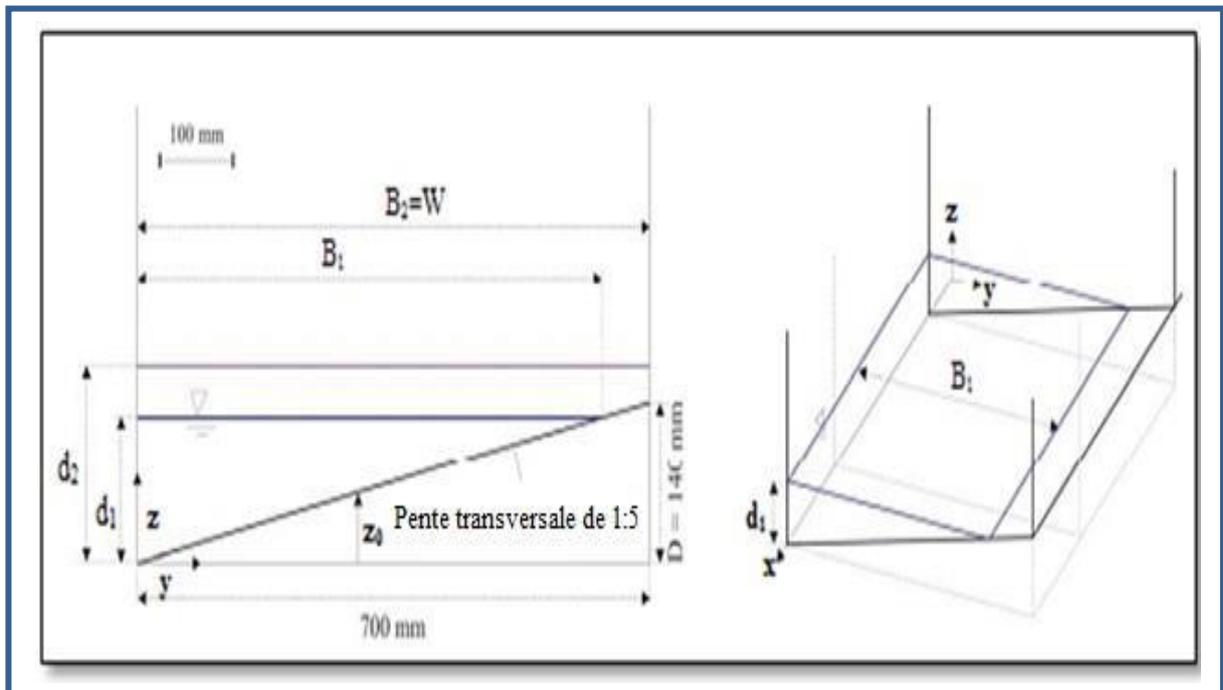


Figure 2.13: Modèle de la section transversale du canal - A gauche: en regardant vers l'amont



Figure 2.14: 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 impliquant 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 **Bousines**, ne permettent pas de modéliser le mouvement turbulent tridimensionnel complexe sous les surtensions dans les canaux irréguliers. Un modèle informatique complet de dynamique des fluides 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**).

Chapitre II :

Ressaut Hydraulique En Canal Trapézoïdal

II.4. Conclusion :

Ce chapitre de notre étude bibliographique présente les principaux travaux dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal.

Premier partie a étude la Canal trapézoïdal symétrique :

La détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique, a été souvent l'objectif principal des travaux de plusieurs auteurs.

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 .

A la fin, *Posey et Hsing (1938)* ; *Silvester (1964)*, et *Wanoschek et Hager (1989)*, ont mesuré la longueur du ressaut.

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

Deuxième sous- chapitre à étudier dans un canal trapézoïdal asymétrique. Une étude a été proposée qui est celle de *Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954)* et *Hubert Chanson(2018)*. Pour 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

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 trapézoïdal asymétrique.

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 trapézoïdal asymétrique.

L'expérimentation s'est intéressée, également, à évaluer le transfert de la quantité de mouvement latéral. Un paramètre généralisé pour mesurer le transfert 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**.

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 considéré 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 trapézoïdal asymétrique 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 :

$$G_m < 2.8 \quad \text{ou} \quad dG/d(x/x_0) = 1 < 18.4$$

4. Dans le cas de G_m est supérieur à **2.8**, la longueur de transfert 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 transfert latéral sur le coté 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 transfert latéral sur le coté peu profond pour un ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire (**F1 > 1.83 et $G_m < 2.8$**) est plus petite que la longueur du ressaut dans un canal rectangulaire.

7. Les conclusions **5** et **6** indiquent que le ressaut hydraulique dans une section trapézoïdal asymétrique est plus efficace en tant que dissipateur d'énergie que dans une section rectangulaire.

DEUXIEME PARTIE :

Étude expérimentale du ressaut hydraulique

en canal trapézoïdal asymétrique

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 les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal trapézoïdal asymétrique, on a fait des courbes expérimentales et leurs relations tirées d'essais au laboratoire seront proposées en terme adimensionnels afin de leur donner un caractère de validité générale.

Dans le but d'organiser ce travail, nous avons divisé cette partie en deux chapitres :

1. 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 prismatique.
2. 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 Expérimentale

I.1. Introduction :

Afin de mener à bien les expérimentations réalisées sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique à pente nulle, quelques appareils et instruments de mesures ont été nécessaires. Ce présent chapitre sera consacré à la description du modèle réduit physique, des appareils et des instruments utilisée pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique et un procédé de la détermination du débit volume Q à l'aide de débitmètre à diaphragme.

I.2. Description du modèle expérimental :

La figure (1.1) représente le schéma simplifié du canal trapézoïdal asymétrique de mesure, ayant servi à l'expérimentation. Tandis que la photographie de laboratoire d'hydraulique bloc "C" (figure 1.2), montre une vue d'ensemble du blanc d'essais. Ce dernier est constitué d'un canal de forme trapézoïdal asymétrique de **7m** de longueur et de **29,3 cm** de largeur, les parois latérales verticales sont en verre transparent permettant la visualisation du ressaut hydraulique et de l'écoulement. Le fond est incliné transversalement d'une pente de **1:3**.

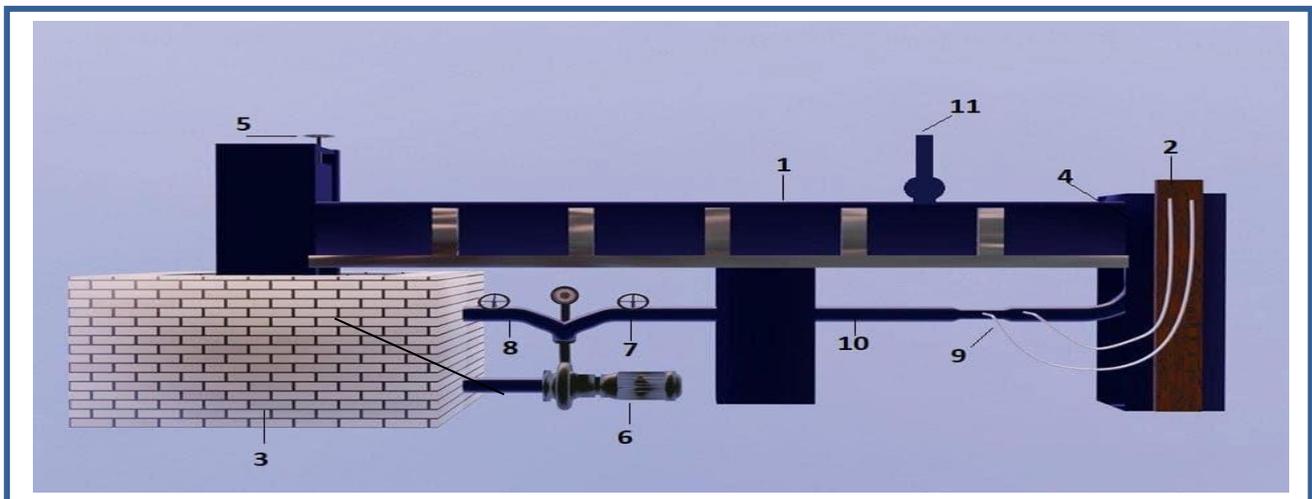


Figure 1.1: Schéma simplifié en 3D de l'ensemble du dispositif expérimental

- 1- Parois du canal trapézoïdal asymétrique. 2- Bassin d'alimentation.
3- Bassin d'accumulation (récupération). 4- vanne mobile en amont. 5- Vanne levante en aval.
6- la Pompe. 7- Vannes de régulation de débit. 8- Grille (tranquillisateur).
9- Manomètre différentiel. 10- Conduite de PVC. 11- Limnimètre.



Figure1.2: Photographie du model expérimentale du canal.

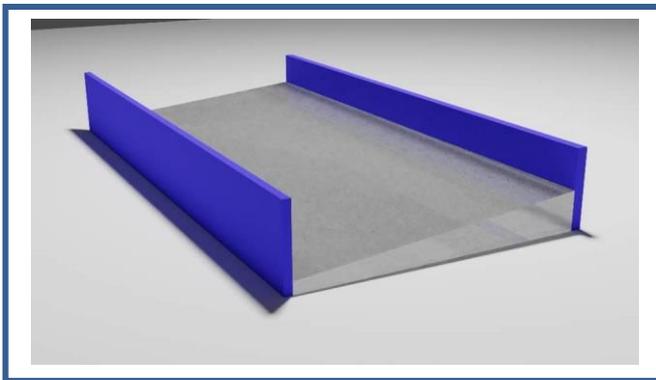


Figure 1.3: Modèle 3D les dimensionnements du canal non- rectangulaire.

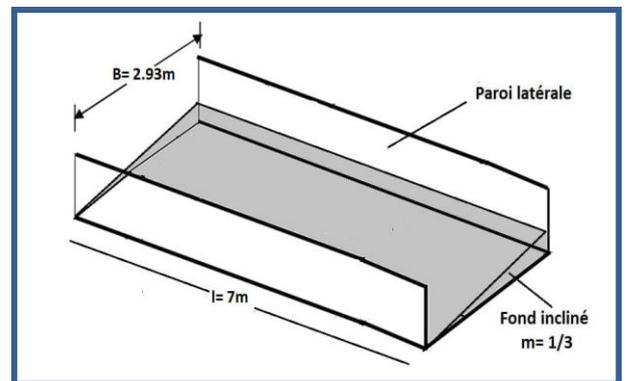


Figure 1.4 : Dimensionnements du canal non-rectangulaire.

Chapitre I:

Description du Modèle Expérimentale

Le canal est alimenté en circuit fermé par une pompe axiale les figures (1.5; 1.6). Celle-ci aspire de l'eau d'un réservoir ouvert de récupération et la refoule dans le canal qui déverse l'eau dans le même bassin d'alimentation qui joue le rôle de bassin de récupération les figures (1.7 ; 1.8).



Figure 1.5: pompe centrifuge axial en 3D



Figure 1.6: photographie du Pompe centrifuge axiale.

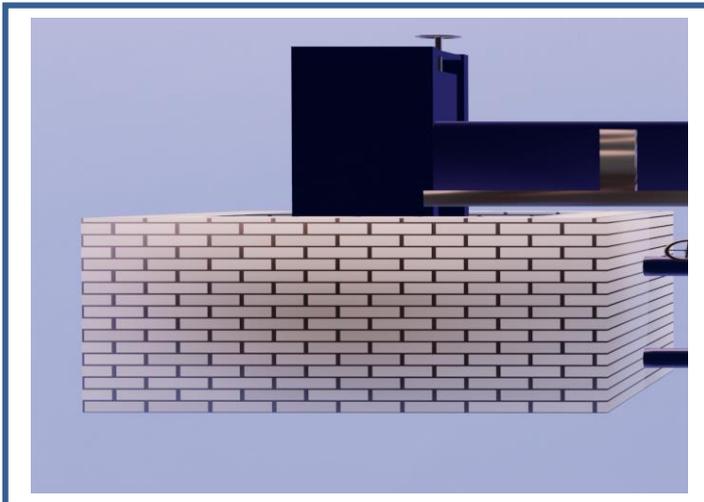


Figure 1.7: modèle 3D du bassin de récupération



Figure 1.8: photographie du bassin de récupération

Chapitre I:

Description du Modèle Expérimentale

Le système bassin de récupération- pompe- bassin d'alimentation est relié par une conduite circulaire en PVC d'un diamètre de 115 mm, dont sa partie aval est inséré un débitmètre à diaphragme permettant de mesurer le débit. Le bassin de récupération est doté d'un tranquilliser d'eau spécialement aménagé afin d'éviter les perturbations de la surface libre qui peuvent perturber le fonctionnement de la pompe la figure (1.9). Une plaque perforée, insérée dans le bassin d'alimentation, joue également le rôle de tranquillisation de l'écoulement avant son entrée dans le canal principal. Cette plaque perforée n'est pas représentée sur le schéma de la figure (1.1).



Figure 1.9: Grille (tranquillisateur).



Figure 1.10: photographie de la vanne en aval en aval

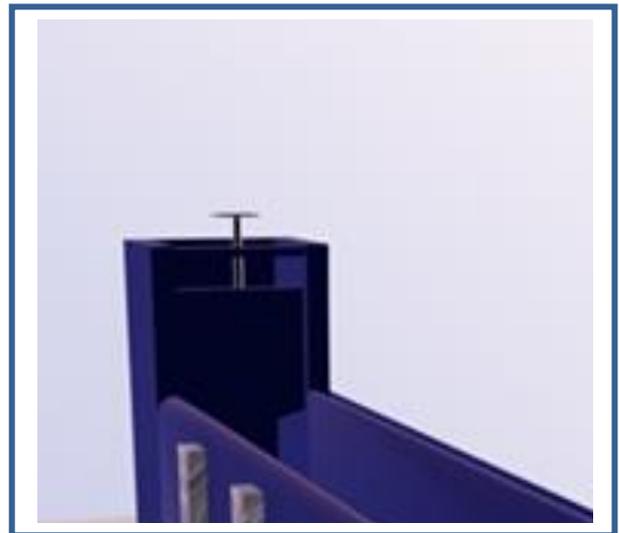


Figure 1.11: la vanne levante 3D

Chapitre I:

Description du Modèle Expérimentale

Le canal trapézoïdal asymétrique est relié, dans sa partie amont, à une vanne, les figures (1.12; 1.13).



Figure 1.12: photographie de la vanne en amont



Figure 1.13: la vanne 3D en amont



Figure 1.14: Photographie du modèle expérimental du canal en aval.



Figure 1.15: modèle expérimental 3D du canal en aval.

I.3 Appareillage de mesures

I.3.1 Débit mètre à diaphragme :

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

Le liquide en mouvement franchit un étranglement dans une conduit, il produit alors dans cet étranglement une chute de pression qui est liée à la vitesse de l'écoulement et pas conséquent au débit, la figure (1.16).



Figure 1.16: débitmètre à diaphragme

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

II.3.1.1 Technique de mesure de débit :

La méthode de mesure de débit à diaphragme est basée de deux étapes parallèles :

-1^{ère} étape : est de mesurer le débit volume par la méthode volumétrique (Bassina et Chronomètre).

-2^{ème} étape : est en même temps on lire la différence $\langle h \rangle$ des cotes des deux ménisques dans les tubes manométrique, a chaque fois on augmente le débit par une vanne et on répète le même travail. Les résultats sont organisés et détaille dans le tableau suivant: [30]

Chapitre I :

Description du Modèle Expérimentale

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

ESSAI N°	Δh (cm)	Δh (m)	t_{moy} (s)	V(l)	V(m ³)	Q(l/s)	Q(m ³ /s)
1	0,6	0.006	20.52	33	0.033	1.608	0.0016
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	0.425	6.22	100	0.1	16.077	0.0161

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

Ces considérations montrent que pour un diaphragme donné, le débit volume Q peut s'écrire $Q = a \cdot (h)^b$, 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 h . Les débits volumes Q ont été mesurés par la méthode volumétrique. Les couples des valeurs (Q, h) obtenus ont fait l'objectif d'un ajustement puissance par la méthode des moindres carrés non linéaire, la figure (1.17).

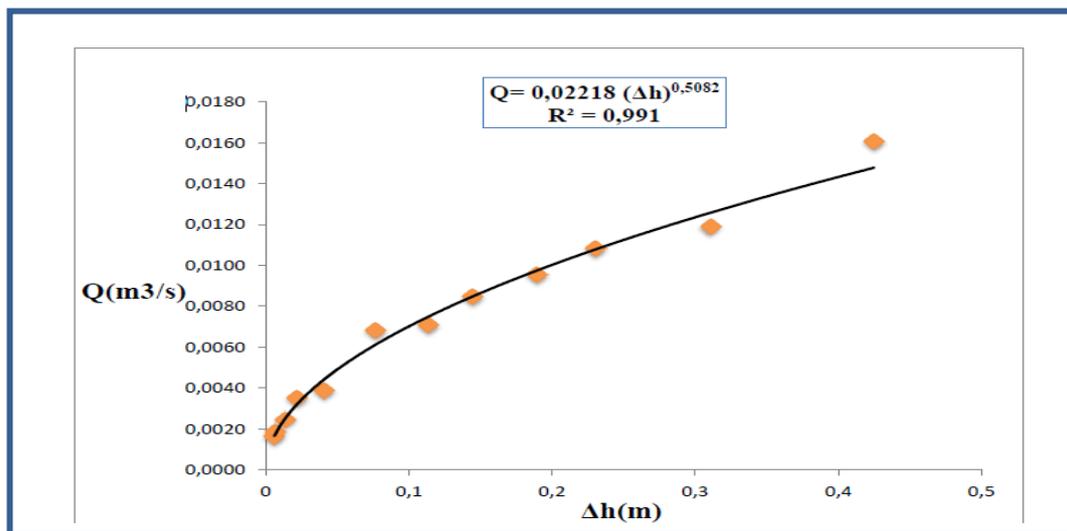


Figure 1.17: courbe d'étalonnage de la variation du débit volume Q en fonction de différence des cotes h (losanges orange) : points expérimentaux, (—) courbe d'ajustement.

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

(1.1)

Q en m³/s et Δh en mètre.

I.3.1.2 Vérification de la validité de la relation (1.1) :

La figure (1.18) confirme que la relation (1.1) représente un bon ajustement pour la détermination du débit volume, connaissant la différence de cotes Δh.

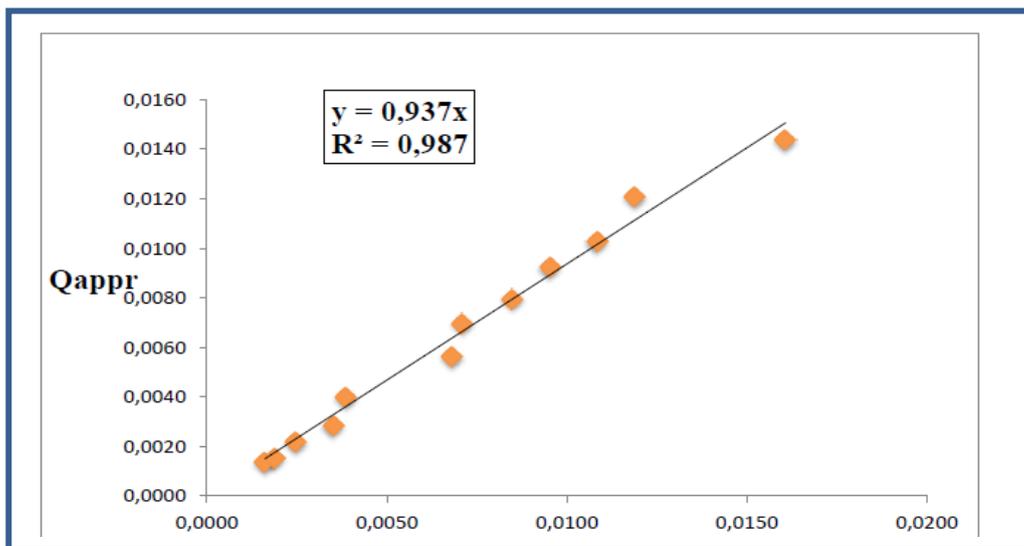


Figure 1.18 : courbe de la variation du débit volume Q_{appr} selon la relation (1.1) en fonction de débit volume Q expérimentale (■): points expérimentaux, (—) première bissectrice.

II.3.2. Limnimètre :

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

L'instrument est formé d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnométrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau, les figures (1.19; 1.20).

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 du zéro du vernier, puis on effectue la lecture du nombre de cinquantième en face de la division qui coïncide ou qui est la plus rapprochée d'une division de la règle. [4]

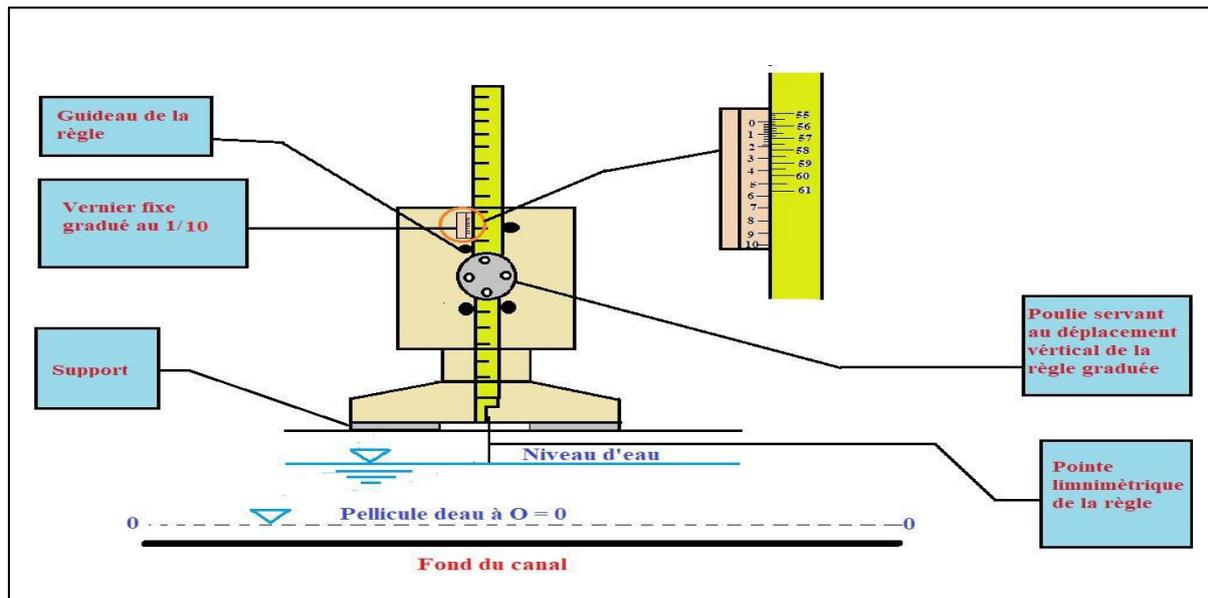


Figure 1.19: Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique



Figure 1.20: photographie de l'limnimètre

Chapitre I:

Description du Modèle Expérimentale

La figure (1.21) qui représenté les positions de limnimtre dans les parois du canal.

Cette position donnée sur quelques distances (1m, 1.5m, 2m, 2.5m, ...,6m).

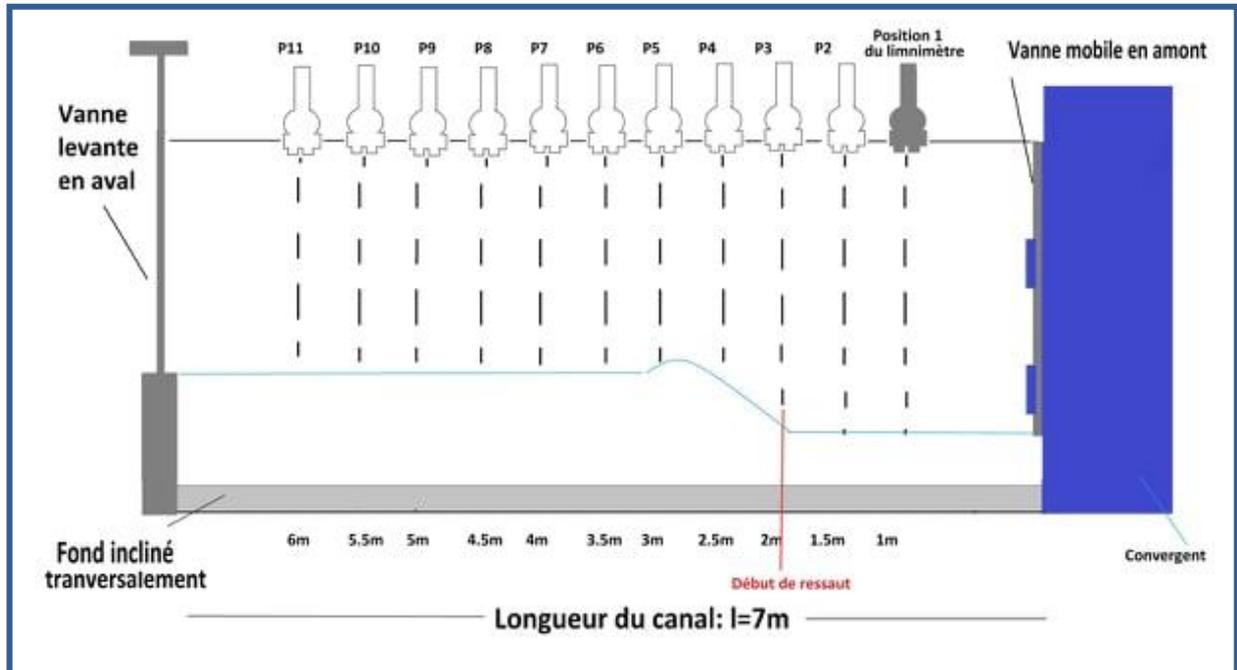


Figure 1.21: position de Limnimètre

Chapitre I :

Description du Modèle Expérimentale

I.4 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 trapézoïdal asymétrique avec convergent trapézoïdal.

Dans ce chapitre nous avons abordé les appareils de mesure utilisés dans ce travail de laboratoire par des schémas et des photographies, dans le but de prendre toutes les mesures nécessaires quant aux longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal trapézoïdal asymétrique.

CHAPITRE II :

Etude expérimentale

Chapitre II :

Etude Expérimentale

I. Résultats expérimentaux :

II.1. Introduction :

Ce chapitre a pour déterminer expérimentalement les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé évoluant dans le canal non-rectangulaire asymétrique avec convergent trapézoïdal.

La formation du ressaut est conditionnée par la rotation de la vanne en aval du canal

Comme s'est indiqué dans la première partie de notre étude, la longueur relative du ressaut λ_j est le rapport entre la longueur du ressaut et la hauteur initiale du ressaut $\lambda_j = L_j/h_1$.

II.2. Procédure expérimentale :

L'objet de notre étude expérimentale est l'analyse, le ressaut hydraulique contrôlé évoluant dans un canal non-rectangulaire asymétrique avec convergent trapézoïdal. L'expérimentation a été menée sur six ouvertures (**8cm, 8.5cm, 9cm, 9.5cm, 10cm, 10.5cm**), figure (2.1), la formation du ressaut a été menée par quatre «04» débit par ouverture, une fois la position du ressaut on mesure les hauteurs à chaque position, (figure 1.17).

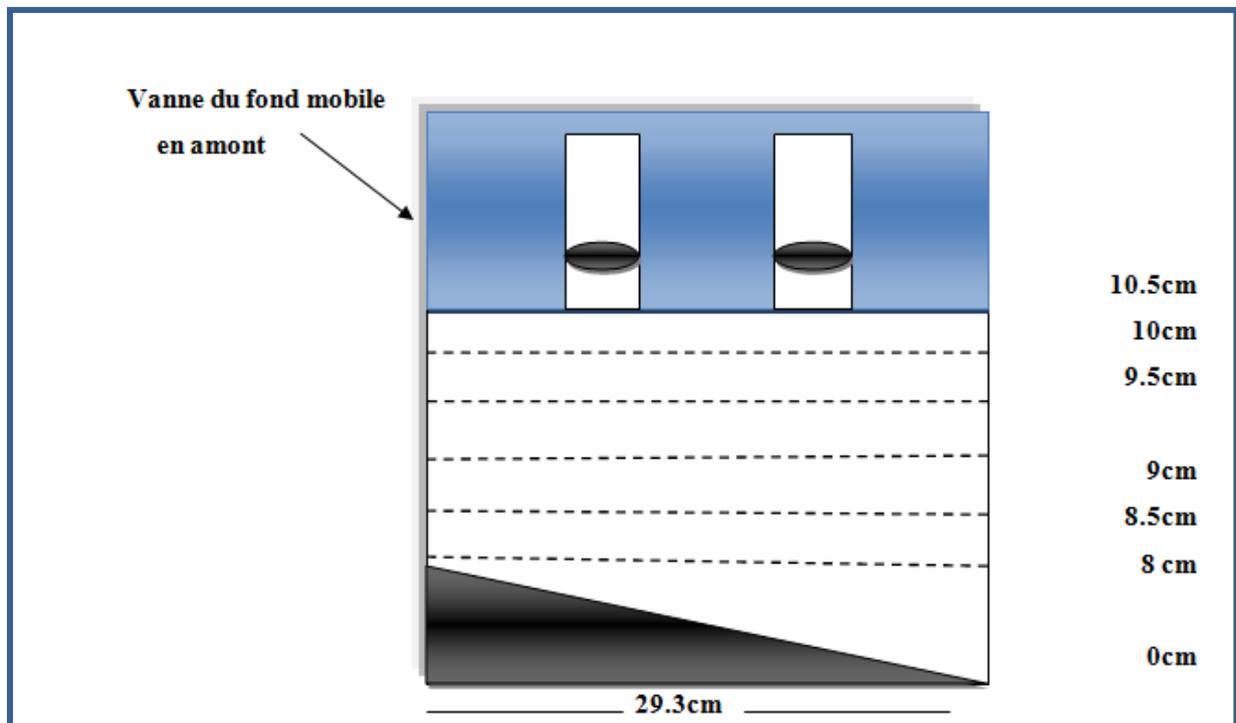


Figure 2.1: position des ouvertures sur le canal non- rectangulaire

Chapitre II :

Etude Expérimentale

II.3. Analyse des résultats expérimentaux :

Comme nous l'avons souligné dans la procédure expérimentale, les débits des tous ouvertures «08cm, 8.5cm, 9cm, 9.5cm, 10cm, 10.5cm » montrent dans les figures suivants :

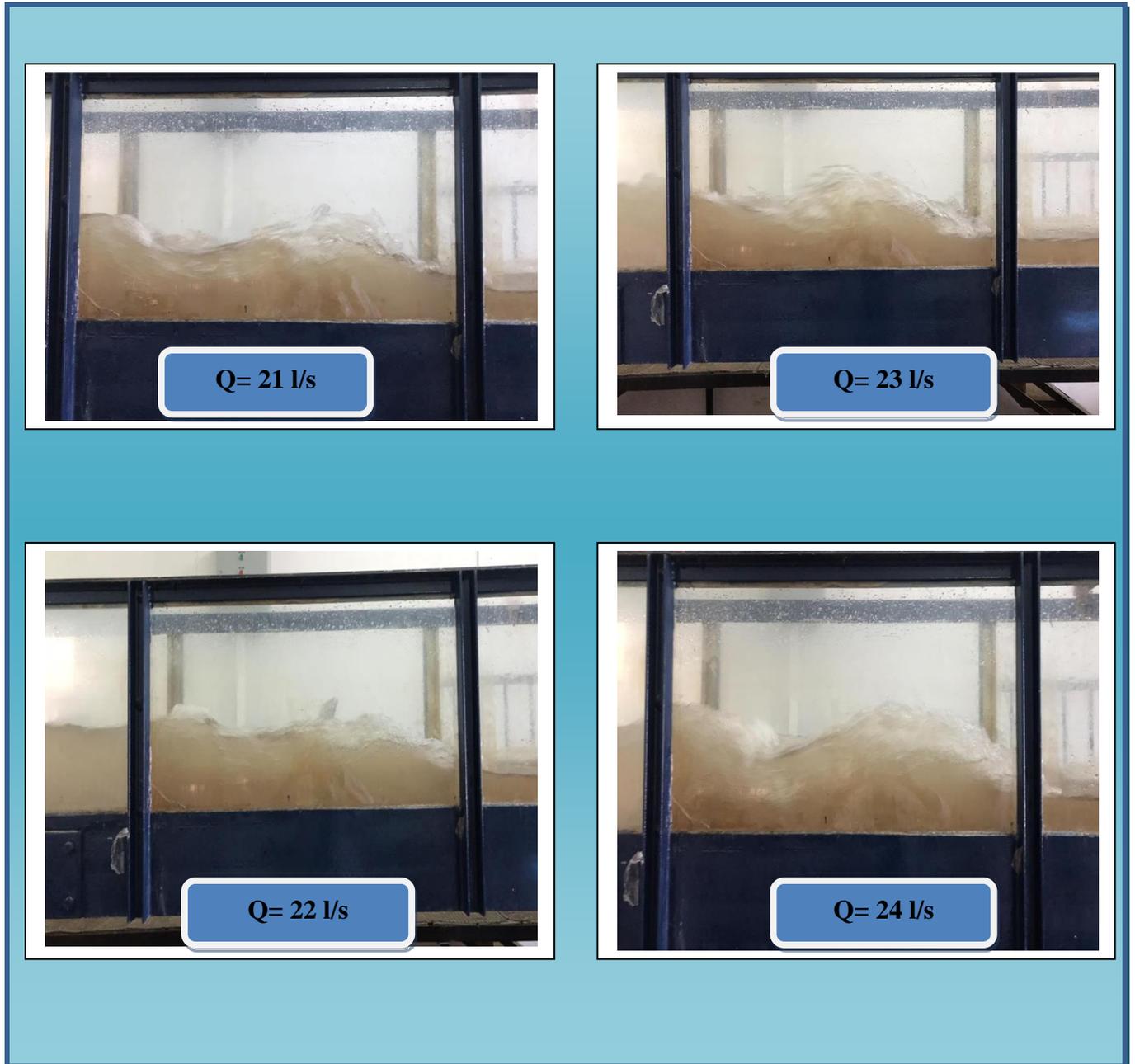


Figure 2.2 : Ressaut hydraulique évaluant dans un canal non-rectangulaire «ouverture 8 cm»

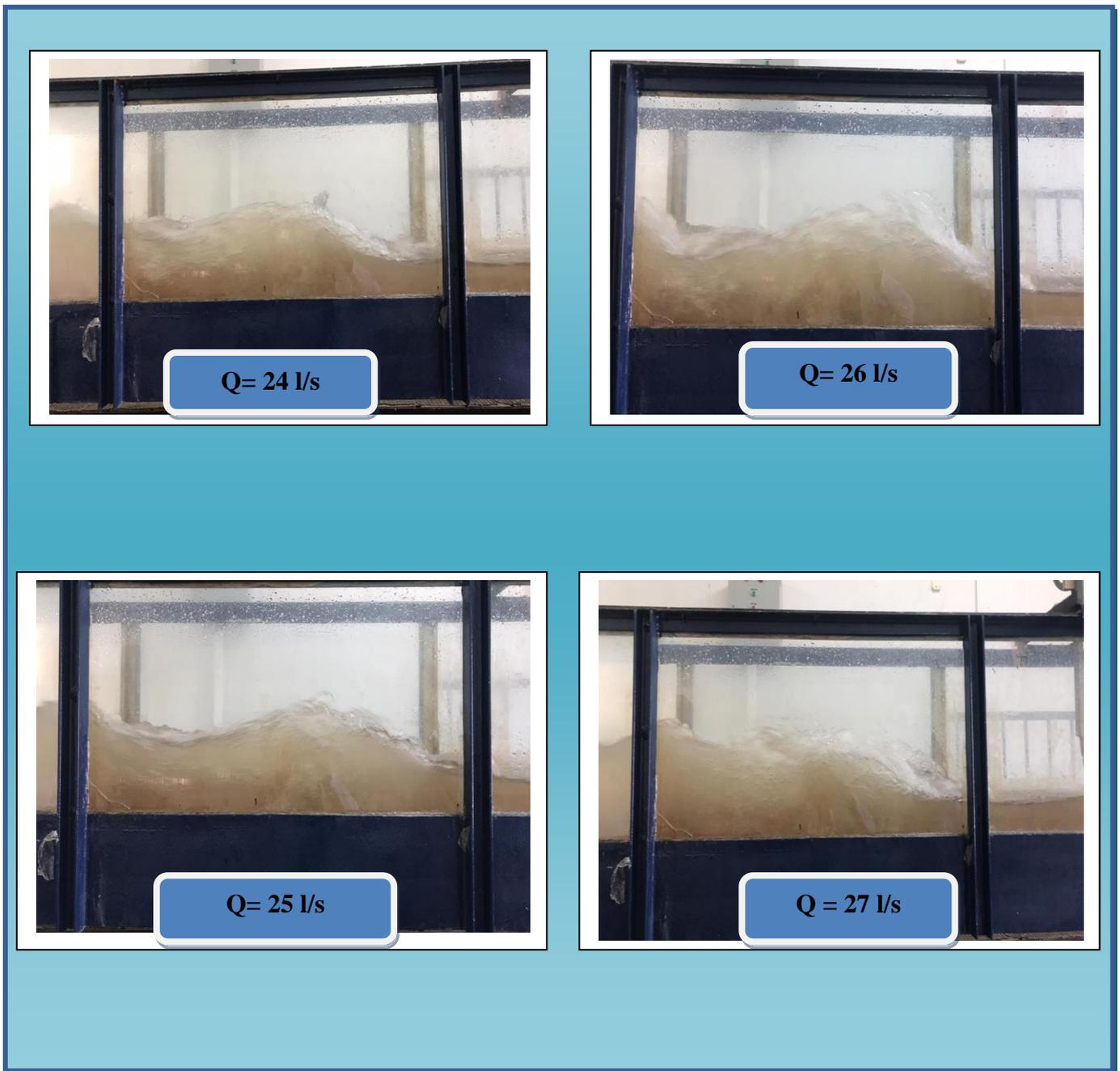


Figure 2.3 : Ressaut hydraulique évaluant dans un canal non-rectangulaire «ouverture 8.5 cm»

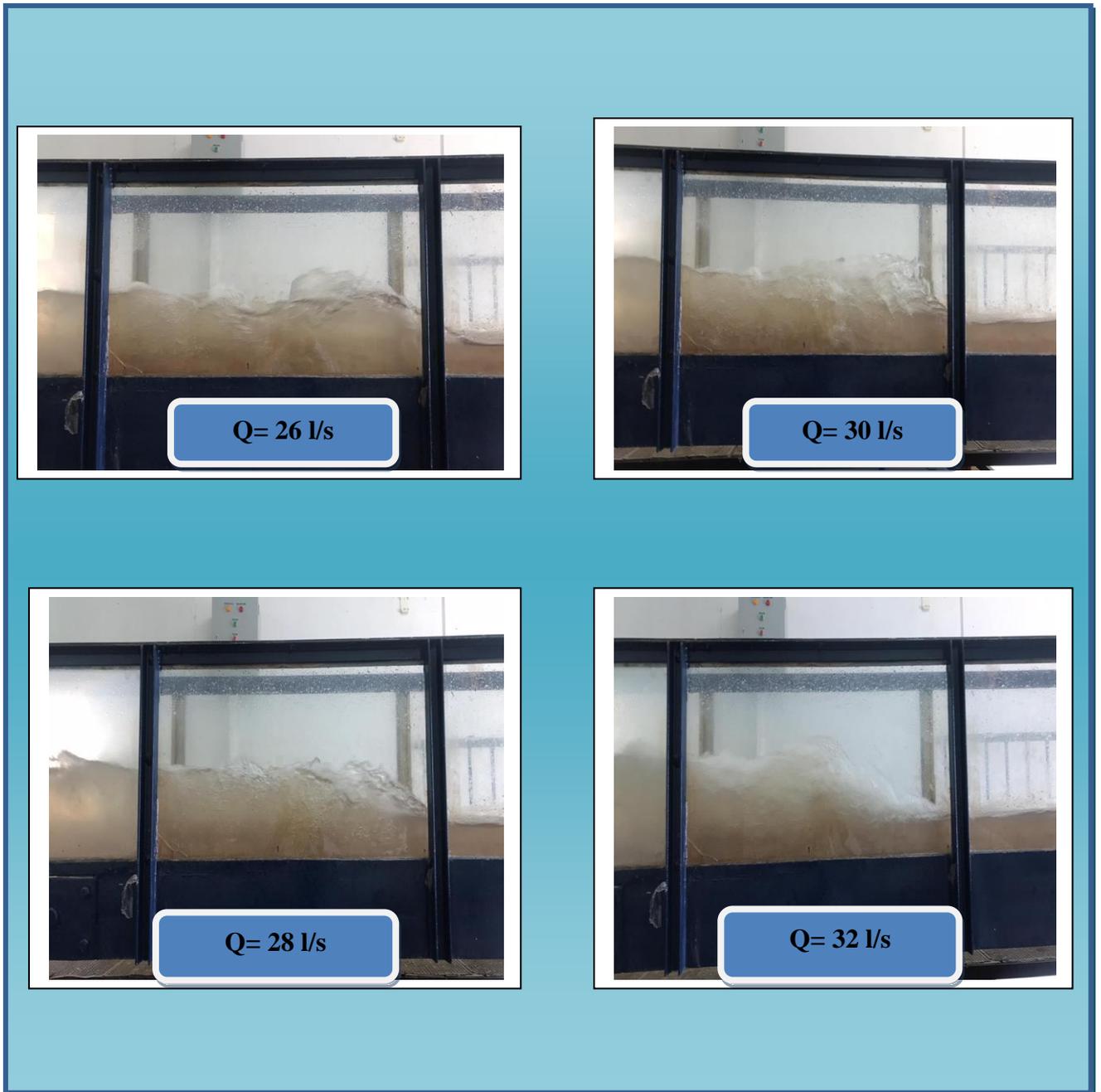


Figure 2.4 : Ressaut hydraulique évaluant dans un canal non-rectangulaire «ouverture 9 cm



Figure 2.5 : Ressaut hydraulique évaluant dans un canal non-rectangulaire «ouverture 9.5 cm»

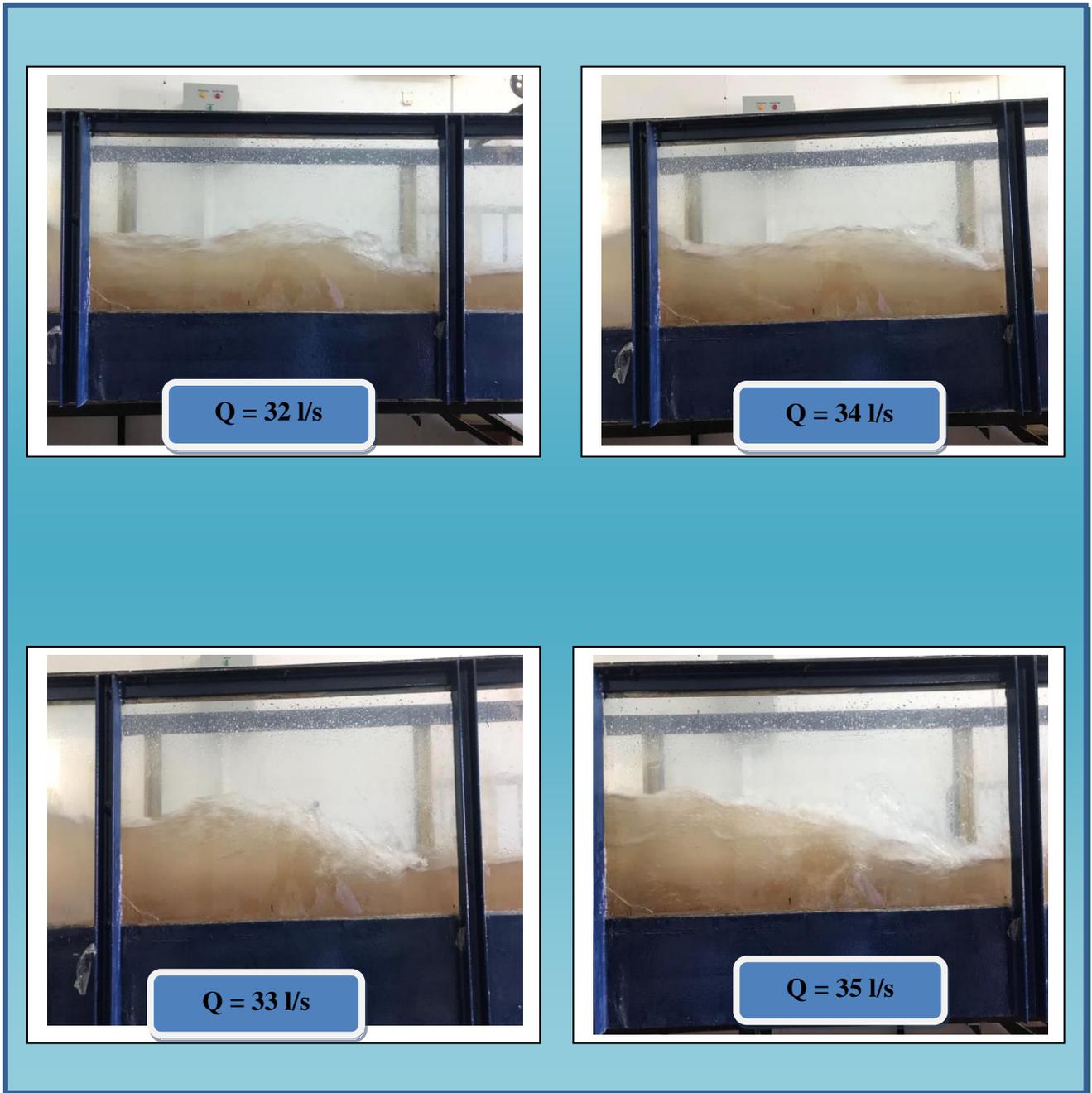


Figure 2.6: Ressaut hydraulique évaluant dans un canal non-rectangulaire «ouverture 10cm»

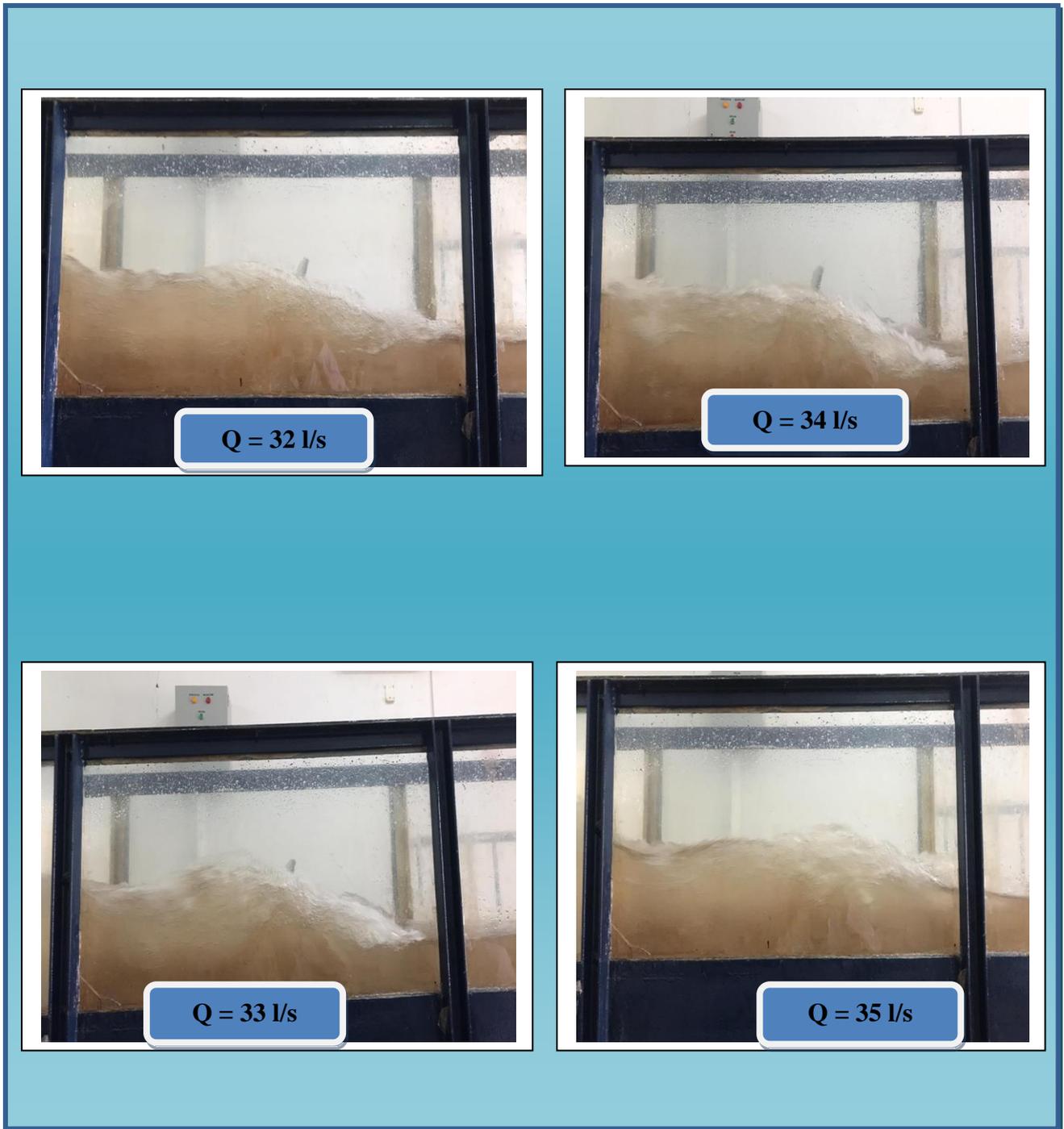


Figure 2.7 : Ressaut hydraulique évaluant dans un canal non-rectangulaire «ouverture 10 cm»

II.3.1 Variation de la longueur du ressaut (L_j) pour toute la gamme :

La figure (2.8) représente la variation de la longueur du ressaut (L_j) en fonction de débit pour toutes les ouvertures. On observe que pour chaque ouverture, la longueur de ressaut mesurée augmente avec l'augmentation du débit.

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

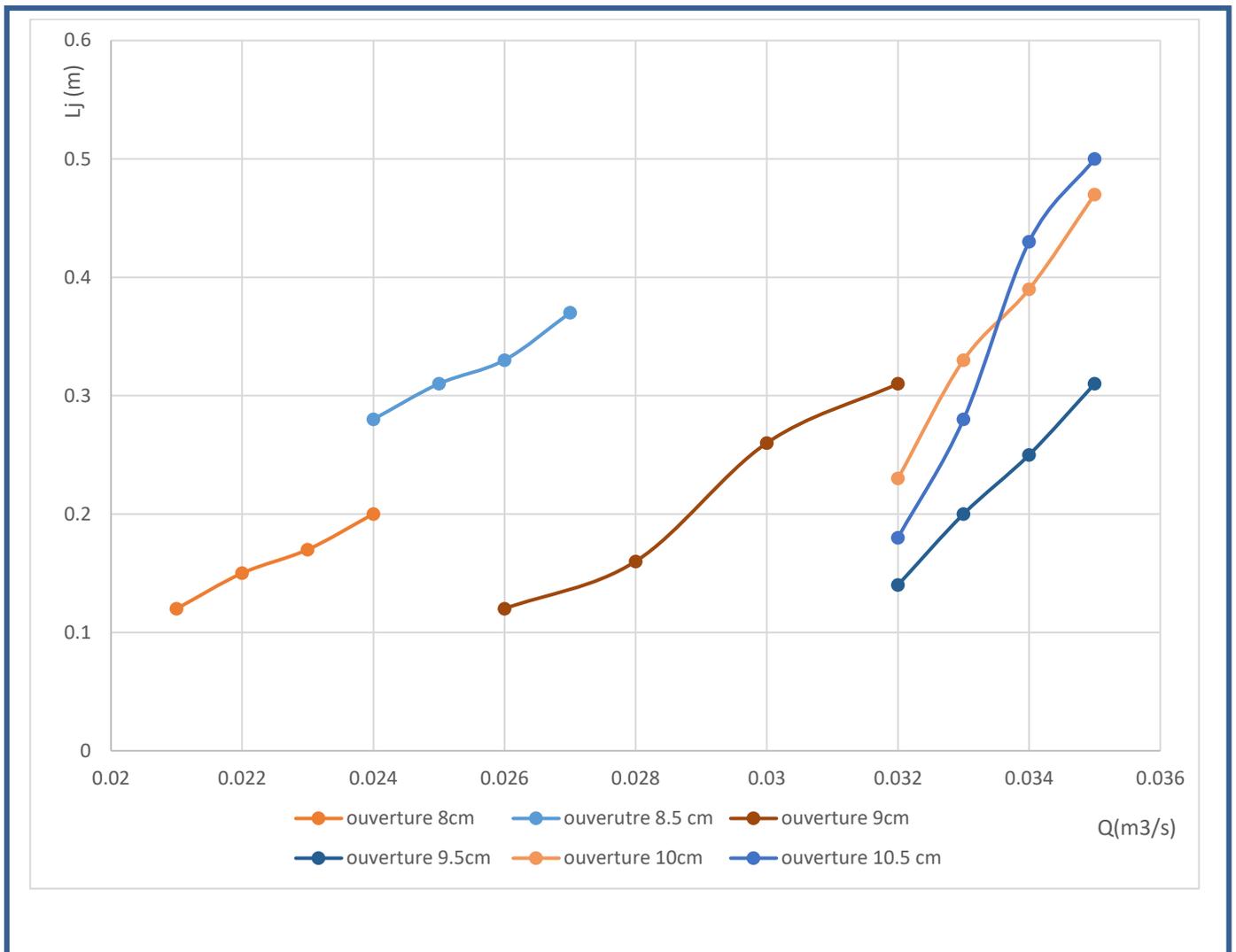


Figure 2.8: Variation de la longueur du ressaut (L_j) en fonction du débit pour toute la gamme

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

Ouvertures	Débits (l/s)	L_j
8 cm	21	0,12
	22	0,15
	23	0,17
	24	0,2
8.5 cm	24	0,28
	25	0,31
	26	0,33
	27	0,37
9 cm	26	0,12
	28	0,16
	30	0,26
	32	0,31
9.5 cm	32	0,14
	33	0,2
	34	0,25
	35	0,31
10 cm	32	0,23
	33	0,33
	34	0,39
	35	0,47
10.5 cm	32	0,18
	33	0,28
	34	0,43
	35	0,5

II.3.2 Longueurs relatives du ressaut :

II .3.2.1 Variation de la longueur relative du ressaut $\lambda_{j1} = L_j/h_1$ en fonction de nombre du Froude F_1 :

La position de la longueur du ressaut hydraulique (L_j) a été définie par un colorant. Elle correspond à la fin du ressaut, à l'aval de cette section, la turbulence est pratiquement diminuée et l'écoulement devient uniforme. Toutefois, il existe toujours certains effets des courants latéraux.

La position finale de la longueur L_j du ressaut est définie comme la limite au-delà de laquelle la protection du bassin amortisseur n'est plus nécessaire. Il est à noter que la longueur du ressaut est un paramètre difficile à mesurer, surtout quand le pied du ressaut se situe à la section élargie.

Les difficultés primordiales peuvent être attribuées à :

- ✓ L'asymétrie du ressaut (canal non rectangulaire);
- ✓ La fluctuation du pied de ressaut ;
- ✓ La pulsation et la turbulence.

La longueur relative du ressaut λ_{j1} correspond bien évidemment au rapport de la longueur de ressaut L_j sur la hauteur initiale h_1 , dont : $\lambda_j = L_j/h_1$

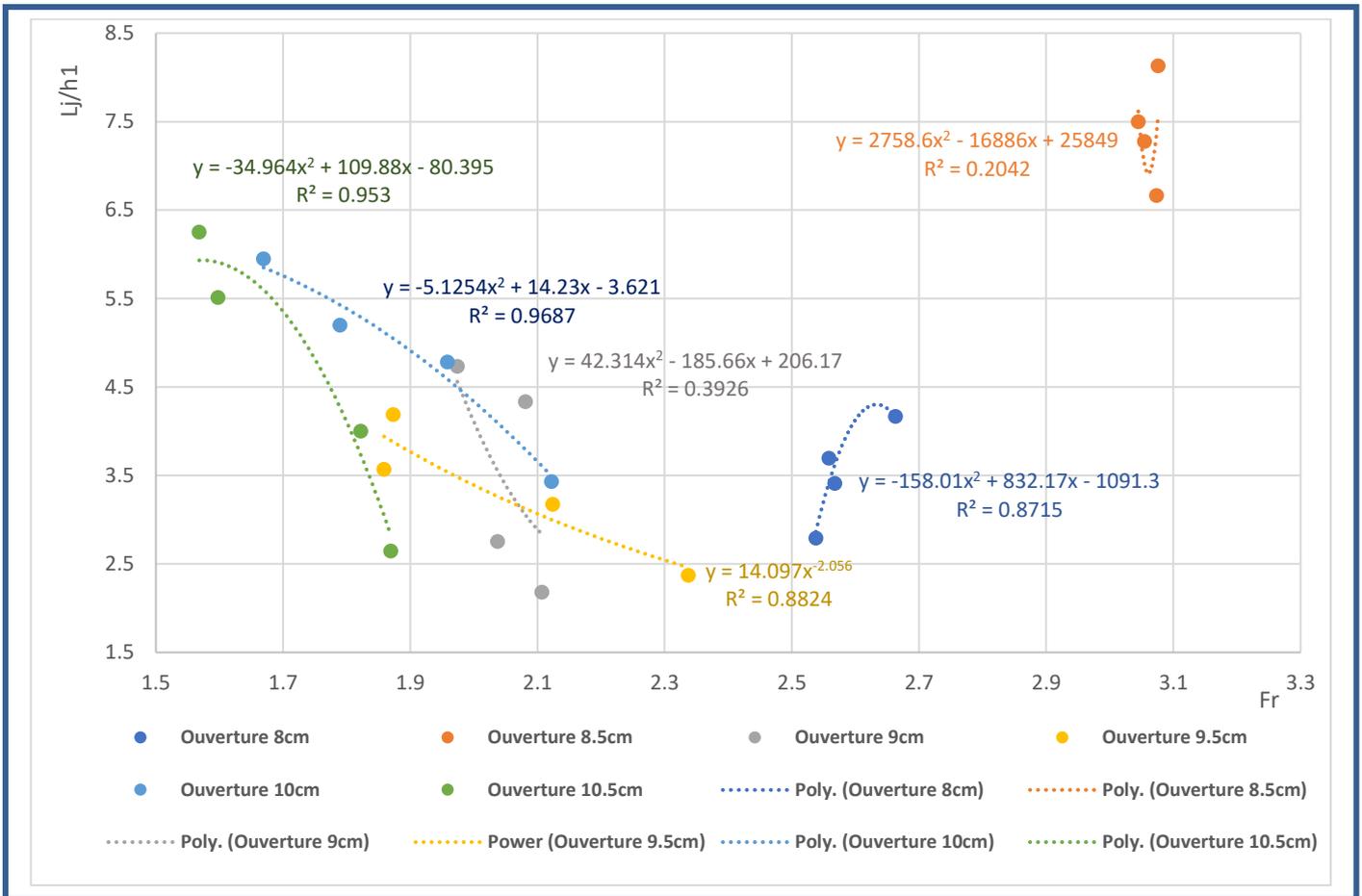


Figure 2.9 : Variation de la longueur relative $\lambda_{j1} = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident

La figure (2.9) représente la variation de la longueur relative $\lambda_{j1} = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

L'analyse des résultats obtenus par notre étude expérimentales ont montré qu'il y a une 6 relations (pour 6 ouvertures) entre la longueur relative $\lambda_{j1} = L_j/h_1$ du ressaut et le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident (figure 2.9).

Chapitre II :

Etude Expérimentale

- **Pour l'ouverture 8 cm :**

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $L_j/h_1 = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous (2.1):

$$L_j/h_1 = -158,01Fr^2 + 832,17 Fr - 1091,3 \quad (2.1)$$

Le coefficient de corrélation: $R^2 = 0,8715$

- **Pour l'ouverture 8.5 cm :**

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $L_j/h_1 = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous (2.2):

$$L_j/h_1 = 2758,6 Fr^2 - 16886 Fr + 25849 \quad (2.2)$$

Le coefficient de corrélation: $R^2 = 0,2042$

- **Pour l'ouverture 9 cm :**

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $L_j/h_1 = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous (2.3):

$$L_j/h_1 = 42,314 Fr^2 - 185,66 Fr + 206,17 \quad (2.3)$$

Le coefficient de corrélation : $R^2 = 0,3926$

Chapitre II :

Etude Expérimentale

- **Pour l'ouverture 9.5 cm :**

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que fonction $L_j/h_1 = f(Fr)$ est puissance dont l'équation est donnée ci-dessous (2.4):

$$L_j/h_1 = 14,097Fr^{-2,056} \quad (2.4)$$

Le coefficient de corrélation : $R^2 = 0,8824$

- **Pour l'ouverture 10 cm :**

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $L_j/h_1 = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous (2.5):

$$L_j/h_1 = -5,1254 Fr^2 + 14,23 Fr - 3,621 \quad (2.5)$$

Le coefficient de corrélation: $R^2 = 0,9687$

- **Pour l'ouverture 10.5 cm :**

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $L_j/h_1 = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous (2.6):

$$L_j/h_1 = -34,964 Fr^2 + 109,88 Fr - 80,395 \quad (2.6)$$

Le coefficient de corrélation: $R^2 = 0,953$

Chapitre II :

Etude Expérimentale

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la courbe $Lj/h_1 = f(F_1)$ est donné par le tableau (2.2) :

Tableau 2.2 : Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $Lj/h_1 = f(F_1)$

Ouvertures	Débits (l/s)	Lj/h_1	F_1
8 cm	21	2,790698	2,53774
	22	3,409091	2,567502
	23	3,695652	2,558332
	24	4,166667	2,663045
8.5 cm	24	6,666667	3,073475
	25	7,276995	3,054606
	26	7,5	3,044791
	27	8,131868	3,076212
9 cm	26	2,181818	2,107163
	28	2,752925	2,037246
	30	4,333333	2,081421
	32	4,73427	1,974042
9.5 cm	32	2,372881	2,337564
	33	3,174603	2,123826
	34	3,571429	1,858703
	35	4,189189	1,873421
10 cm	32	3,432836	2,121866
	33	4,782609	1,958513
	34	5,2	1,789391
	35	5,949367	1,669176
10.5 cm	32	2,647059	1,869133
	33	4	1,822148
	34	5,512821	1,597427
	35	6,25	1,567982

II.3.2.2 Variation de la longueur relative du ressaut $\lambda_{j2} = L_j/h_2$ en fonction de nombre du Froude F_1 :

La longueur relative du ressaut λ_{j2} correspond bien évidemment au rapport de la longueur de ressaut L_j sur la hauteur initiale h_2 , dont: $\lambda_{j2} = L_j/h_2$

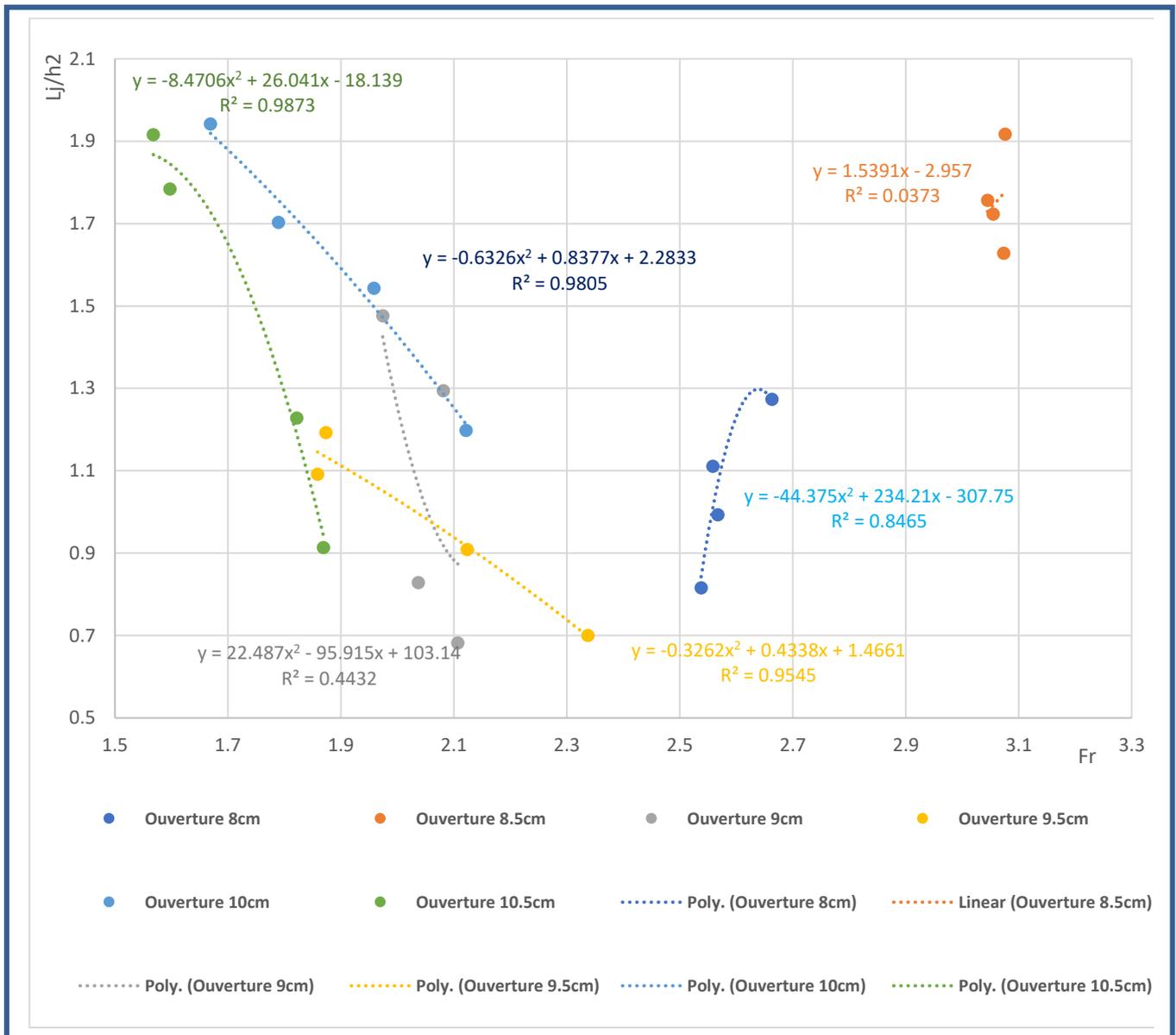


Figure 2.10 : Variation de la longueur relative $\lambda_{j2} = L_j/h_2$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident

Chapitre II :

Etude Expérimentale

La figure (2.10) représente la variation de la longueur relative $\lambda_{j2} = L_j/h_2$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident

L'analyse des résultats obtenus par notre étude expérimentales ont montré qu'il y a une **6** relations (pour **6 ouvertures**) entre la longueur relative $\lambda_{j2} = L_j/h_2$ du ressaut et le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident (**figure 2.10**).

- **Pour l'ouverture 8 cm :**

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $L_j/h_2 = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous (2.7):

$$L_j/h_2 = -44,375x^2 + 234,21x - 307,75 \quad (2.7)$$

Le coefficient de corrélation : $R^2 = 0,8465$

- **Pour l'ouverture 8.5 cm :**

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $L_j/h_2 = f(Fr)$ est linéaire ont l'équation est donnée ci-dessous (2.8):

$$L_j/h_2 = 1,5391x - 2,957 \quad (2.8)$$

Le coefficient de corrélation: $R^2 = 0,0373$

- **Pour l'ouverture 9 cm :**

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $L_j/h_2 = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous (2.9):

$$L_j/h_2 = 22,487Fr^2 - 95,915 Fr + 103,14 \quad (2.9)$$

Le coefficient de corrélation: $R^2 = 0,4432$

Chapitre II :

Etude Expérimentale

- **Pour l'ouverture 9.5 cm :**

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $Lj/h_2 = f(Fr)$ est puissance dont l'équation est donnée ci-dessous (2.10):

$$Lj/h_2 = 4,2525 Fr^{-2,098} \quad (2.10)$$

Le coefficient de corrélation: $R^2 = 0,9547$

- **Pour l'ouverture 10 cm :**

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $Lj/h_2 = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous (2.11):

$$Lj/h_2 = -0,6326 Fr^2 + 0,8377 Fr + 2,2833 \quad (2.11)$$

Le coefficient de corrélation: $R^2 = 0,9805$

- **Pour l'ouverture 10.5 cm :**

L'ajustement des points par la méthode des moindres carrées a montré que la fonction $Lj/h_2 = f(Fr)$ est polynomiale dont l'équation est donnée ci-dessous (2.12):

$$Lj/h_2 = -8,4706 Fr^2 + 26,041 Fr - 18,139 \quad (2.12)$$

Le coefficient de corrélation: $R^2 = 0,9873$

Chapitre II :

Etude Expérimentale

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

$Lj/h_2 = f(F_1)$ est donné par le tableau (2.3) :

Tableau 2.3 : Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $Lj/h_2 = f(F_1)$:

Ouvertures	Débits (l/s)	Lj/h_2	F_1
8 cm	21	0,816327	2,53774
	22	0,993377	2,567502
	23	1,111111	2,558332
	24	1,273885	2,663045
	24	1,627907	3,073475
8.5 cm	25	1,723371	3,054606
	26	1,75644	3,044791
	27	1,917098	3,076212
	26	0,682283	2,107163
9 cm	28	0,829016	2,037246
	30	1,294305	2,081421
	32	1,47619	1,974042
	32	0,7	2,337564
9.5 cm	33	0,909091	2,123826
	34	1,091703	1,858703
	35	1,192858	1,873421
	32	1,197917	2,121866
10 cm	33	1,542921	1,958513
	34	1,703057	1,789391
	35	1,942149	1,669176
	32	0,913706	1,869133
10.5 cm	33	1,22807	1,822148
	34	1,784232	1,597427
	35	1,915709	1,567982

II.4. Conclusion

A travers ce chapitre nous avons étudié et analysé les résultats expérimentaux des longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal non-rectangulaire avec convergent trapézoïdal.

L'analyse des résultats obtenus par notre étude expérimentales ont montré qu'il y a une **6** relations (pour **6 ouvertures**) entre les longueurs relative $\lambda_{j1} = L_j/h_1$; $\lambda_{j2} = L_j/h_2$ du ressaut et le nombre de Froude **F₁** de l'écoulement incident.

Conclusion De La Deuxième Partie

A travers cette deuxième partie nous avons abordé la partie expérimentale de l'étude de la variation de longueur du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique contrôlé.

Deux chapitres ont été nécessaires : le premier a été consacré à la description du modèle expérimental, qui a servi de base à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique classique dans un canal trapézoïdal asymétrique avec du convergent trapézoïdal.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'analyse expérimentale des résultats obtenus.

A travers cette analyse nous avons proposé des relations expérimentales régissant sur la variation de longueur relative λ_j en fonction du nombre de Froude F_1 du ressaut évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique.

L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a mené à l'établissement des relations simples à l'emploi liant les quatre variables adimensionnels (F_1, h_1, h_2, L_j).

Conclusion Générale

Notre étude présente une analyse expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé, évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique avec un convergent trapézoïdal. L'étude a pour but de déterminer expérimentalement des longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé. Deux parties ont été nécessaires :

La première partie est la partie bibliographique qui se divise en deux chapitres a concerné les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond horizontal et trapézoïdal (symétrique et asymétrique).

L'étude bibliographique a examiné dans un premier temps, les travaux de **Bradley et Peterka (1957)** concernant la forme du ressaut et ceux de **Hager et al (1990)** relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. A la fin de ce premier chapitre, nous avons examiné, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, et nous avons cité les travaux de **Forster et Skrinde (1950)** concernant le seuil à paroi mince et épais.

Le deuxième chapitre présente l'étude de **Wanoschek et Hager (1989)** sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique, des relations seront données pour la quantification des longueurs caractéristiques du ressaut se produisant dans canal rectangulaire et triangulaire ainsi que la longueur du ressaut hydraulique pour le canal trapézoïdal symétrique.

Dans le deuxième sous-chapitre le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique a été exposé a travers les travaux de **José Vasques Diaz (1954)** et **Hubert chanson (2018)**. 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**.

PRINCIPALES NOTATIONS

A₁	L'aire de la section mouillée initiale [m²]
A₂	L'aire de la section mouillée finale [m²]
A_(x)	L'aire de la section mouillée correspondant à x [m²]
b₁	Base du canal trapézoïdal on amont [m]
Fr₁, F₁	Nombre de Froude incident [-]
P₁	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut [N]
P₂	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut [N]
g	Accélération de la pesanteur [m.s⁻²]
h₁	Hauteur initiale du ressaut [m]
h₂	Hauteur finale du ressaut [m]
h₂*	Hauteur finale du ressaut classique rectangulaire [m]
h_(x)	Profondeur de l'eau à la distance x du pied du ressaut [m]
L_r	Longueur du retour latéral du courant [m]
L_j	Longueur du ressaut [m]
L_r*	Longueur du rouleau classique rectangulaire [m]
L_j*	Longueur du ressaut classique rectangulaire [m]
m	Cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale [-]
M	Coefficient de forme [-]
Q	Débit volume [m³.s⁻¹]
Re	Nombre de Reynolds [-]
s	Hauteur du seuil [m]
S	Hauteur relative du seuil [-]
V	Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiale et finale [m³]
V₁	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale [m.s⁻¹]
V₂	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale [m.s⁻¹]
N	Viscosité cinématique [m².s⁻¹]
λ_j	longueur relative du ressaut [-]
λ_r	longueur relative du rouleau [-]
ω	Poids spécifique du liquide [N.m⁻³]
ρ	Masse volumique du liquide [kg.m⁻³]

γ	Compacité du ressaut $=Lr/h_1$ [-]
H_1	Perte de charge initiale [-]
H_2	Perte de charge finale [-]
ΔH_{12}	Perte de charge du ressaut; la différence des charges initiale et finale [-]
η	Rendement de ressaut hydraulique [-]

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (1.1) : valeurs des mesures du débit par l'étalonnage.....	50
Tableau (2.1): Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $L_j = f(Q)$	64
Tableau (2.2): Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $L_j/h_1 = f(F_1)$	69
Tableau (2.3): Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $L_j/h_2 = f(F_1)$	73

LISTE DES FIGURE

PREMIERE PARTIE

CHAPITRE I :

Figure 1.1: Ressaut hydraulique dans un canal horizontal rectangulaire.....	3
Figure 1.2 : classification du ressaut hydraulique classique.....	5
Figure .13: rapport des hauteurs du ressaut en fonction du nombre de Froude en amont pour un canal rectangulaire horizontal.....	5
Figure 1.4 : Longueur caractéristiques du ressaut.....	7
Figure 1.5 : Notations adoptées pour le ressaut hydraulique sur fond horizontal en canal prismatique.....	8
Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique. a) rouleau développé. b) rouleau non développé.....	9
Figure 1.7: Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.....	11
Figure 1.8 : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur S et de longueur L Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions...11	
Figure 1.9 : Schéma de charge totale le long de ressaut classique.....	12
Figure 1.10 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude Fr_1 (—) Courbe tracée selon la relation (1.18), (----) courbe tracée Selon la relation (1.19).....	15

CHAPITRE II :

Figure 2.1: Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M	19
Figure 2.2: Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdal.....	21
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 (2.11)).....	22
Figure 2.4: Section transversale du canal.....	24
Figure 2.5: Section de la bande longitudinale.....	26
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.....	29

Figure 2.7: Diagramme adimensionnel du taux de changement de M sur le côté peu profond.....	30
Figure 2.8: Schéma général d'écoulement.....	31
Figure 2.9: Rapports de profondeur moyenne en fonction de numéro de Froude.....	31
Figure 2.10: Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral du côté peu profond.....	32
Figure 2.11: Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral des deux côtés du canal.....	32
Figure 2.12: Modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la propagation positive du ressaut dans un canal composé prismatique ($d1/D < 1$).....	34
Figure 2.13: Modèle de la section transversale du canal - A gauche: en regardant vers l'amont.....	35
Figure 2.14: Photographie de l'installation expérimentale en aval.....	36

DEUXIEME PARTIE

CHAPITRE I :

Figure 1.1: Schéma simplifié en 3D de l'ensemble du dispositif expérimental.....	44
Figure 1.2: Photographie du model expérimentale du canal.....	45
Figure 1.3: Modèle 3D les dimensionnements du canal non-rectangulaire	45
Figure 1.4 : Dimensionnements du canal non-rectangulaire.....	45
Figure 1.5: pompe centrifuge axial en 3D.....	46
Figure 1.6: photographie du Pompe centrifuge axiale.....	46
Figure 1.7: modèle 3D du bassin de récupération	46
Figure 1.8: photographie du bassin de récupération.....	46
Figure 1.9: Grille (tranquillisateur).....	47
Figure 1.10: photographie de la vanne en aval	47
Figure 1.11: la vanne levant 3D en aval	47
Figure 1.12: photographie de la vanne en amont.....	48
Figure 1.13: la vanne 3D en amont.....	48
Figure 1.14: Photographie du model expérimental du canal en aval.....	48
Figure 1.15: model expérimental3D du canal en aval.....	48
Figure 1.16: débitmètre à diaphragme.....	49

Figure 1.17: courbe d'étalonnage de la variation du débit volume Q en fonction de différence des cotes h (■) : points expérimentaux, (—) courbe d'ajustement.....	50
Figure 1.18 : courbe de la variation du débit volume Q_{appr} selon la relation (1.1) en fonction de débit volume Q expérimentale (■): points expérimentaux, (—) première bissectrice.....	51
Figure 1.19: Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnométrique.....	52
Figure 1.20: photographie de l'Limnimètre.....	52
Figure 1.21: position de Limnimètre.....	53

CHAPITRE II :

Figure 2.1 : position des ouvertures sur le canal non-rectangulaire.....	56
Figure 2.2 : Ressaut hydraulique évaluant dans un canal non-rectangulaire «ouverture 8 cm».....	57
Figure 2.3 : Ressaut hydraulique évaluant dans un canal non-rectangulaire «ouverture 8.5 cm».....	58
Figure 2.4 : Ressaut hydraulique évaluant dans un canal non-rectangulaire «ouverture 9 cm».....	59
Figure 2.5 : Ressaut hydraulique évaluant dans un canal non-rectangulaire «ouverture 9.5 cm».....	60
Figure 2.6 : Ressaut hydraulique évaluant dans un canal non-rectangulaire «ouverture 10cm ».....	61
Figure 2.7 : Ressaut hydraulique évaluant dans un canal non-rectangulaire «ouverture 10.5cm ».....	62
Figure 2.8: Variation de la longueur du ressaut (L_j) en fonction du débit pour toute la gamme.....	63
Figure 2.9 : Variation de la longueur relative $\lambda_{j1} = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.....	66
Figure 2.10 : Variation de la longueur relative $\lambda_{j2} = L_j/h_2$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.....	70

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1- **Achour, B. (1997)**, *Dissipation d'énergie par ressaut, thèse d'état, Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil.*
- 2- **Achour, B., Debabeche, M., Khattaoui, M., & Bedjaoui, A. (2002)**. *Ressaut Hydraulique Classique Et Contrôle Dans Quelques Profils De Canaux (Première partie). LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (1).*
- 3- **Achour, B., & Mohammed, K. (2008)**, *Hystérésis du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire.*
- 4- **Ancer, S. E. (2018)**, *Le ressaut hydraulique forcé de type A dans un canal trapézoïdal à base rectangulaire. Mémoire de master, département de génie civil et d'hydraulique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie.*
- 5- **Andersen, V. M. (1978)**, *Undular Hydraulic Jump, Proc. ASCE, J.H.D., 104, 1185-1188.*
- 6- **Bakhmeteff, B. A., & Matzeke, A. E. (1936)**, *The hydraulic jump in terms of dynamic similarity, Trans. Asce, 101,630-680.*
- 7- **Belanger, J.B. (1828)**, *Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes, Carilian-Goeury, Paris.*
- 8- **Benmalek, A. (2012)**. *Etude du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal. Mémoire de magister, département de génie civil et d'hydraulique, Université de Mohamed Khider de Biskra, Algérie.*
- 9- **Bousmar, D., Rivière, N., Proust, S., Paquier, A., Morel, R., and Zech, Y. (2005)**, *Upstream discharge distribution in compound-channel flumes, J.H.Eng, ASCE, 131(5), 408-412.*
- 10- **Bradley, J. N., & Peterka, A. (1957)**. *The hydraulic design of stilling basins: hydraulic jumps on a horizontal apron (basin i). Journal of the hydraulics division , 83(5), 1-24.*
- 11- **Bretz, N.-V. (1959)**. *Dissipation d'énergie à l'aval d'un évacuateur, Ingénieurs et architectes suisses, vol.3,39-46.*
- 12- **Bretz, N.,V. (1988)**, *Ressaut hydraulique forcé par seuil, laboratoire de contraction hydraulique, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de Génie-Civil, Communication N°.2.*
- 13- **Carlier, M. (1980)**. *Hydraulique générale et appliquée (éd. Eyrolles). paris, France.*

- 14- Chanson, H. (2008).** *Jean- Baptiste, Charles Joseph BÉLANGER (1790-1874), the Back waters Equation and the Bélanger Equation. Hydraulic Model Report No CH69/08, Div of Civil Engineering. The University of Queensland, Brisbane, Australia. 40. La Houille Blanche N°5.*
- 15- Chanson, H.(2018).** *Positive surge propagation in a non-rectangular asymmetrical Channel. School of civil engineering.*
- 16- Cherhabil., S. (2010),** *Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à pente variable, Doctorat en sciences, Département de Génie Civil et Hydraulique, Université de Biskra.*
- 17- Debabeche, M. (2003).** *Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie..*
- 18- Debabeche, M., Ghomri, A., & Kateb, S. (2017-2018).** *Experimental study of the hydraulic jump in a hydraulic jump in a sloped rectangular channel. journal of fundamental and applied sciences , 10(1), 216-225.*
- 19- Forster, J.W., and Skrinde, R.A. (1950),** *Control of Hydraulic Jump by Sills. Trans. ASCE 115, 973–987.*
- 20- Ghomri, A. (2005).** *Ressaut hydraulique contrôlé par seuil voulant en canal profil• en 'U', Mémoire de Magister en Sciences Hydrauliques, Département d'Hydraulique, Université de Biskra.*
- 21- Hager, W., Bremen, R. H., and Kawogoshi, N.(1990).** *Classical hydraulic jump ; length of roller, J. Hydraulic research 28(5), 591-608.*
- 22- Hager, W.H., Bretz, N.V. (1987),** *Hydraulic jumps at positive and negative steps. Journal Hydraulic Research, 24(4): 237-253. Discussion 25(3): 407-413.*
- 23- Hager, W. H., & Li, D. (1992),** *Sill-controlled Energy Dissipator, J. Hydraulic Research, vol.30.*
- 24- 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.*
- 25- Hager, W. H., & Sinniger, R. (1989).** *Constructions hydrauliques (éd. 1ére). Presses polytechniques Romande: Lausanne, France.*
- 26- Hager, W. H., & Wanoschek, R. (1987).** *Hydraulic jump in Triangular Channel. Journal of hydraulic research , 25(5), 549-564.*

- 27- Kateb, S., Debabeche, M., & Benmalek, A. (2013).** *Étude expérimentale de l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal.* *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(10), 1014-1018.
- 28- Kateb, S. (2014).** *Etude théorique et expérimentale de quelques types de ressauts hydrauliques dans un canal trapézoïdal (Doctorat dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).*
- 29- Khattaoui, M., & Achour, B. (2014).** *Ressaut hydraulique en lit composé/ Hydraulic jump in compound channel.* *Revue ljee*, (20).
- 30- Kourim, A. (2019).** *Etude expérimentale des longueurs caractéristiques et du profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique à convergent triangulaire. Mémoire de master, département de génie civil et d'hydraulique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie.*
- 31- Lakehal, M., Debabeche, M., & Mansri, N. (2010).** *Effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire.* *LARHYSS Journal*, P-ISSN, 1112-3680/E-ISSN, 252- 9782, (8).
- 32- Mansri, N. (2006).** *Ressaut Hydraulique Contrôlé par marche Positive Dans un Canal triangulaire (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).*
- 33- Medakene, R., Bakki, A. (2018),** *Approche théorique de l'effet de la rugosité sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans les canaux prismatique (Rectangulaire, triangulaire, trapézoïdale). (Mémoire de master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla).*
- 34- Meziani Mahmoud. (2018).** *Etude expérimentale de l'effet de la compacité sur le profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique. Mémoire de Master. Département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.*
- 35- Posey, C.J., & Hsing, P.S. (1938).** *The hydraulic jump in trapezoidal channel.* *Engineering News Record*, 121, 797-798.
- 36- Rao, N.S.G., & Murlidhar, D. (1963).** *Discharge characteristics of weirs of limit crest width, La houille Blanche.* 18, 537-545.
- 37- Rodriguez-Diaz, A. J. (1954).** *The hydraulic jump in a non-rectangular open channel. Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology.*
- 38- Silvester, R. (1964),** *Hydraulic jump in all shapes of horizontal channels, Proc. ASCE, J. Hyd. Div., Vol. 90, (HY1), pp. 23-55.*
- 39- Wanoschek, R & Hager, W. H., (1989).** *Hydraulic jump in trapezoidal channel, j. hydr. Research, Vol. 27, 429-446.*