

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie civil et d'Hydraulique  
Référence : ...../2019



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية و الري  
المرجع ...../2019

## Mémoire de Master

Spécialité : Hydraulique

Option : Hydraulique Urbaine

Thème

**Etude expérimentale des longueurs caractéristiques et du profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique a convergent triangulaire**

Nom et Prénom de l'étudiant :  
Kourim Abdellah

Encadreur :  
Dr: Cherhabil Sonia

Promotion Juillet 2019

## *Dédicace*

*Louange à Dieu Le tout puissant*

*Je dédie le fruit de mon modeste travail :*

*A mes très chères parents, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moraux, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but.*

*A mon père l'exemple de sincère amour et du sacrifice pour ses encouragements son amour et son sacrifice afin que rien ne entrave les déroulements de mes études*

*A ma cher Grande Mère (Que Dieu la protège).*

*A mes Chère Frères, et mes Sœurs.*

*A toute ma famille. KOURIM*

*À tous mes amies*

*À tous ceux qui j'aime et qui je respecte.*

*À ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour*

*À ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans les moments les plus difficiles et ceux à qui je dois tant Je vous aime tous et j'espère que la vie vous réservera plein de bonheur, De réussite, de prospérité et une très bonne santé.*

*Kourim Abdellah*

## *Remerciements*

*Nous tenons tout d'abord à remercions Dieu Tout Puissant,  
Pour toute la puissance qu'il nous a donnée Pour réaliser ce modeste  
travail.*

*Nous exprimons notre plus vif remerciement à notre  
encadreur Dr. **Cherhabil Sonia** qui nous a aimablement orienté et  
assidûment dirigé notre travail.*

*Dans l'impossibilité de citer tous les noms, mes plus vifs  
remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près  
ou de loin à la réalisation de ce travail.*

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

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

## Résumé :

Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier, d'un point de vue expérimental, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal asymétrique. Cette étude était divisée en deux parties : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine ; une seconde partie à caractère expérimental. Nous voulons. Par le biais de cette étude, trouver des relations fonctionnelles générales exprimant les longueurs caractéristiques et le profil de surface de ce type de ressaut hydraulique. Les équations obtenues sont représentées en termes adimensionnels, afin de leur donner un caractère de validité générale.

## ملخص:

هذه الأطروحة تهدف إلى الدراسة التجريبية للقفزة الهيدروليكية المراقبة بعناية رقيقة داخل قناة مفتوحة شبه منحرفة الشكل غير متناظرة. جرت هذه الدراسة إلى قسمين : يختص القسم الأول بالأبحاث المتعلقة بالأعمال المنجزة في هذا المجال، أما القسم الثاني ذو طابع تجريبي. نريد من خلال هذه الدراسة، إيجاد علاقات عامة تُظهر الأطوال المميزة وتحديد المظهر السطحي لهذا النوع من القفزات الهيدروليكية. المعادلات التي تم الحصول عليها بدون أبعاد لمنحها طابع صلاحية العامة.

---



---

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION GENERALE

#### Première partie

### ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

#### Chapitre I

I. RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE.....	1
I.1.Introduction :.....	1
I.2.Définition :.....	1
I.3. Ressaut hydraulique classique : .....	2
I.3.1.Classification du ressaut classique : .....	2
I.3.1.1.Le Pré-ressaut ou le ressaut faible :.....	2
I.3.1.2. Le ressaut de transition ou oscillatoire.....	2
I.3.1.3.Le ressaut stable ou établie.....	3
I.3.1.4.Le ressaut agité (Fort) .....	3
I.3.2. Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut .....	3
I.3.3. Caractéristiques géométriques du ressaut.....	6
I.3.3.1. Hauteur du ressaut .....	6
I.3.3.2. Longueur du rouleau .....	7
I.3.3.3. Longueur du ressaut .....	8
I.3.3.4. Rendement du ressaut.....	8
I.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire .....	12
I.4.1. Approche de Forster et Skrinde (1950) .....	12
I.4.1.1. Seuil continue à paroi mince.....	12
I.4.1.2. Seuil continue à paroi épaisse.....	13
I.5. Conclusion.....	14

#### ChapitreII

### RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOIDAL

---

II .Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal .....	15
II 1. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal symétrique.....	15
II 1.1. Introduction.....	15
II.1.2.Détermination du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut .....	16
II.1.2.1. Cas particulier du canal rectangulaire .....	18
II.1.2.2. Cas particulier du canal triangulaire .....	19
II. 1.3.Caractéristique du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal ...	20
II.1.3.1. Longueur du ressaut.....	20
II.1.3.2. Rendement.....	21
II.1.3.2.1. Cas particulier du canal rectangulaire .....	22
II.1.3.2.2. Cas du canal triangulaire.....	22
II .2.Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique .....	24
II .2.1. Approche d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954.....	24
II.2.1.1.Analyse de la section totale.....	25
II.2.1.2. Analyse de bande longitudinale (volume de contrôle).....	26
II.2.1.3. Discussion des résultats.....	29
II.2.2.Approche d'Hubert Chanson.....	31
II.2.2.1. Propagation positive de ressaut dans un canal non rectangulaire (Canal trapézoïdal asymétrique).....	31
II.2.2.2.Installation expérimentale:.....	32
II.2.3. Conclusion .....	34
Deuxième Partie.....	35
ETUDE EXPERIMENTALE.....	35
Chapitre I .....	36
Étude expérimentale du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique.....	36
II.1.Introduction.....	35
II.2.Description du canal .....	35
II.3. Appareillages de mesure.....	41
II.3.1. Débitmètre à diaphragme .....	41

---

II.3.1.1 Technique de mesure de débit .....	41
II.3.1.2 Vérification de la validité de la relation (1.1) .....	43
II.3.2. Limnimètre.....	44
II.4. Les seuils minces .....	45
II.5. Description des essais :.....	46
II.5.1. Procédure expérimentale.....	46
II.6. Analyse des résultats expérimentaux.....	47
II.6.1. Variation de la longueur relative $L_r/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ incident, cas du côté plus profond : .....	47
II.6.2. Variation de la longueur relative $L_j/h_2$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ incident; cas du côté plus profond :.....	52
II.6.3. Variation du profil de surface $Y=f(x)$ du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique; Cas du côté plus profond.....	57
II.6.3.a. Position $x=03$ m : .....	57
II.6.3.b. Position $x=04$ m : .....	62
II.6.3.c. Position 4.6 m : .....	67
II.6.3.d. Position 6 m : .....	72
I.7. Conclusion.....	77

## Conclusion générale

Liste des figures

Liste des Tableaux

Références bibliographiques

Principales notation

# **INTRODUCTION GENERALE**



## INTRODUCTION GENERALE

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

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

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

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

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

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

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

Notre présent mémoire comporte deux parties :

➤ La première partie est divisée en deux chapitres :

\*Le premier chapitre consiste à passer en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique en canal rectangulaire, nous étudierons la classification effectuée par **Bradley et Peterka(1957)**. Nous citerons aussi les travaux de **Hager et Sinniger (1986)**, **Hager et al.(1990)** et ceux de **Forster et Skrinde(1950)** en deuxième lieu, nous examinerons les travaux les plus récents de **Debabeche (2003)** concernant le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal rectangulaire.

\*Le deuxième chapitre concerne le ressaut hydraulique évoluant dans le canal de forme trapézoïdale autrement dit non rectangulaire. Ce chapitre sera divisé en deux sous chapitres. Le premier concerne le ressaut dans le canal trapézoïdal symétrique dont on exposera les travaux de **Hager et Wanocek (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 et Vasquez Diaz(1954)** ainsi que ceux de **Chanson(2018)**.

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

**Première partie**

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **Chapitre I**

# **RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE**

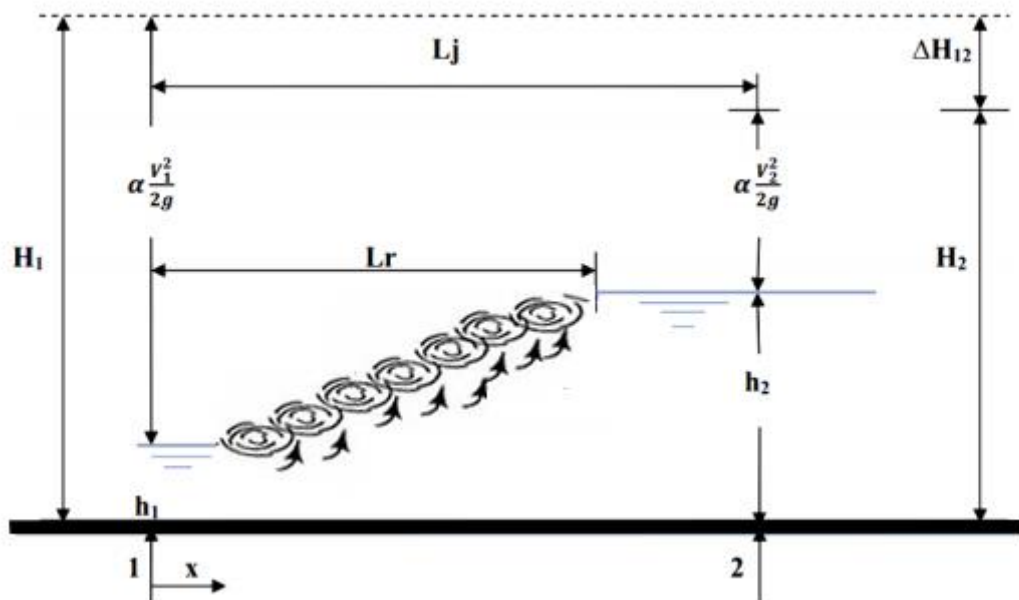
## I. RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

### I.1.Introduction :

Le ressaut hydraulique a fait l'objet de nombreuses études, aussi bien théoriques qu'expérimentales. C'est surtout le canal rectangulaire qui a attiré l'attention de nombreux chercheurs. L'expérimentation a montré qu'en règle générale, le ressaut est bien régi par l'équation de la quantité de mouvement quel que soit la forme du canal considéré. Cette équation nécessaire pour la détermination des hauteurs conjuguées du ressaut.

### I.2.Définition :

La définition donnée par Elevatorski , à savoir: « Le ressaut hydraulique est le passage brutal et turbulent d'un écoulement de liquide à partir d'un bas niveau situé au-dessous de la « hauteur critique » à un haut niveau situé au-dessus de la « hauteur critique » et pendant lequel la vitesse d'écoulement passe d'un état supercritique à un état subcritique. » Ce passage est caractérisé par une brusque discontinuité de la surface libre c'est la formation d'un « rouleau » qui a pour résultats la création de fortes intensités de turbulence, l'entraînement d'air c'est la dissipation de l'énergie cinétique.[7]



**Figure 1.1:** Schématisation d'un ressaut hydraulique avec les principales notations

Les longueurs  $L_r$  et  $L_j$ , qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut. Les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$ , 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 ces sections initiales et finales à la charge totale dans sa section initiale.

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

### I.3. Ressaut hydraulique classique :

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

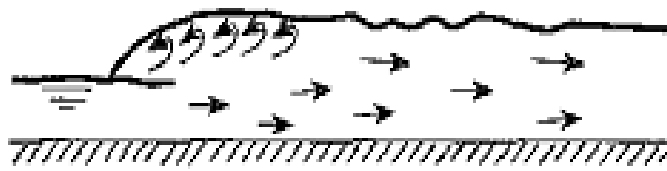
#### I.3.1. Classification du ressaut classique :

La classification du ressaut est basée sur la variation du nombre de Froude  $F_1$  caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut. [14]

Selon la classification de **Bradley et Peterka (1957)** on distingue quatre configurations de ressaut :

##### I.3.1.1. Le Pré-ressaut ou le ressaut faible : (Bradly et Peterka 1957)

Avec  $1,7 < F_1 < 2,5$  (Figure 1.2.1). La surface du ressaut est composée d'une série de petits rouleaux pour  $F_1 = 1,7$  ; ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude  $F_1$  augmente. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible. [11]



**Figure 1.2.1 :** *Le Pré-ressaut ou le ressaut faible* [3]

##### I.3.1.2. Le ressaut de transition ou oscillatoire

Pour des valeurs comprises entre environ 2,5 et 4,5 (Figure 1.2.2). l'écoulement est pulsatoire ; la plus grande turbulence se vérifie soit près du fond, soit à la surface: c'est le

ressaut oscillant. Chaque pulsation produit une onde de période irrégulière, qui dans la nature peut se propager sur plusieurs kilomètres, ce qui peut causer des dommages aux berges.[3]



Figure 1.2.2 : Le ressaut de transition ou oscillatoire[3]

### I.3.1.3. Le ressaut stable ou établie

Obtenu pour  $4,5 < F_1 < 9$  (Figure 1.2.3). Le ressaut hydraulique est dit établi ou stationnaire. Il est bien localisé et efficace en terme de dissipation de l'énergie pour son bon rendement (45% et 70%). (Bradly et Peterka 1957)

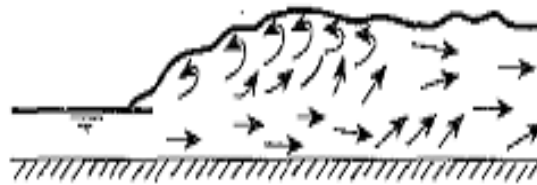


Figure 1.2.3: Le ressaut stable ou établie[3]

### I.3.1.4. Le ressaut agité (Fort)

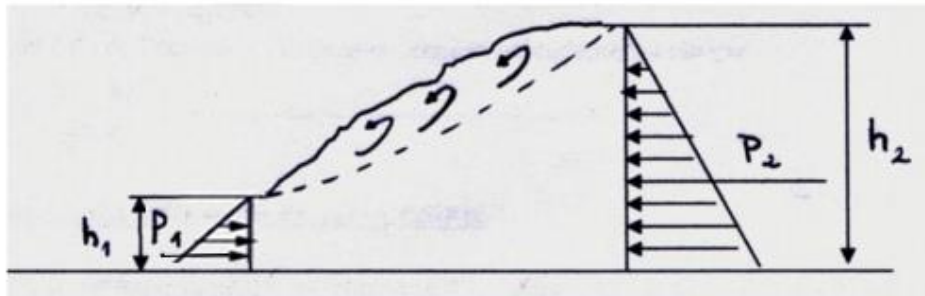
Obtenu pour  $F_1 > 9$  (Figure 1.2.4). Il est caractérisé par un écoulement amont ayant une très faible profondeur et une vitesse relativement élevée [14]. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.[11]



Figure 1.2.4: Le ressaut agité (Fort) [3]

### I.1.3.2. Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut

L'utilisation du théorème de la quantité de mouvement est nécessaire pour la détermination des hauteurs conjuguées du ressaut. Ce théorème énonce que : "**La quantité de mouvement sortant à travers la surface d'un volume fluide est équivalente à la somme des forces qui lui sont appliquées**". Soit le ressaut hydraulique donné par la figure (Figure 1.3) [2]



**Figure 1.3 :** Schéma d'un ressaut hydraulique ( Hager,1988)

Les hypothèses faites pour l'établissement de cette relation adimensionnelle sont les suivantes:[4]

- La répartition des pressions dans la section finale et initiale est hydrostatique.
- les pertes de charges dues aux frottements sont négligées.
- les vitesses des différents filets liquides dans chacune des sections (A1) et (A2) sont parallèles à la vitesse moyenne  $V$ , et considérées uniformes.
- La résistance de l'air est négligeable.

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

L'application du théorème de la quantité de mouvement à la masse liquide contenue entre (A1) et (A2), avec projection suivant la direction de l'écoulement, donne :

$$\sum F_{ext} = F_{p1} + F_{p2} + G \sin \theta - f = \rho QV_2 - \rho QV_1 \quad (1.1)$$

Où :

$\rho$  :La masse volumique du liquide en mouvement.

$Q$  : débit volume.

$V$  : vitesse d'écoulement.

$g$  : accélération de la pesanteur.

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



$F_{p1}$  et  $F_{p2}$  : forces des pressions hydrostatiques.

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

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

Avec : 
$$F_{p1} = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_1 \cdot A_1 \quad (1.2)$$

$$F_{p2} = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_{*2} \cdot A_2 \quad (1.3)$$

$\bar{\omega}$  : Désigne le poids spécifique du liquide

$\bar{h}_1$  et  $\bar{h}_{*2}$  : Respectivement la position du centre de gravité des sections A1 et A2 par rapport à la surface libre de l'écoulement dans ces sections.

On peut ainsi écrire que :  $\bar{h}_1 = h_1/2$  et  $\bar{h}_{*2} = h_{*2}/2$

On a l'équation de continuité permet d'écrire : 
$$V_1 = Q/A_1 \quad (1.4)$$

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

$$A_1 = b \cdot h_1 \quad (1.5)$$

$b$  : étant la largeur du canal rectangulaire.

Sachant que  $\rho \cdot Q \cdot V$  représente la quantité de mouvement

En tenant compte de tous ces paramètres la relation (1.1) s'écrit :

$$\frac{1}{2} \bar{\omega} \cdot b \cdot h_1^2 + \rho Q V_1 = \frac{1}{2} \bar{\omega} \cdot b \cdot h_2^2 + \rho Q V_2 \quad (1.6)$$

Où :

$\bar{\omega} : \rho \cdot g$ ,  $g$  est l'accélération de la pesanteur

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

$$F_1^2 = Q^2 / (g \cdot b^2 \cdot h_1^3) \quad (1.7)$$

Après avoir introduit les relations (1.4), (1.5) et (1.7) dans la relation (1.6) on obtiendra :

La relation de **Bélangier** :

$$Y = \frac{h_{*2}}{h_1} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (1.8)$$

La relation (1.8) est représentée graphiquement dans le système d'axes à coordonnées cartésiennes dans la figure (1.4).

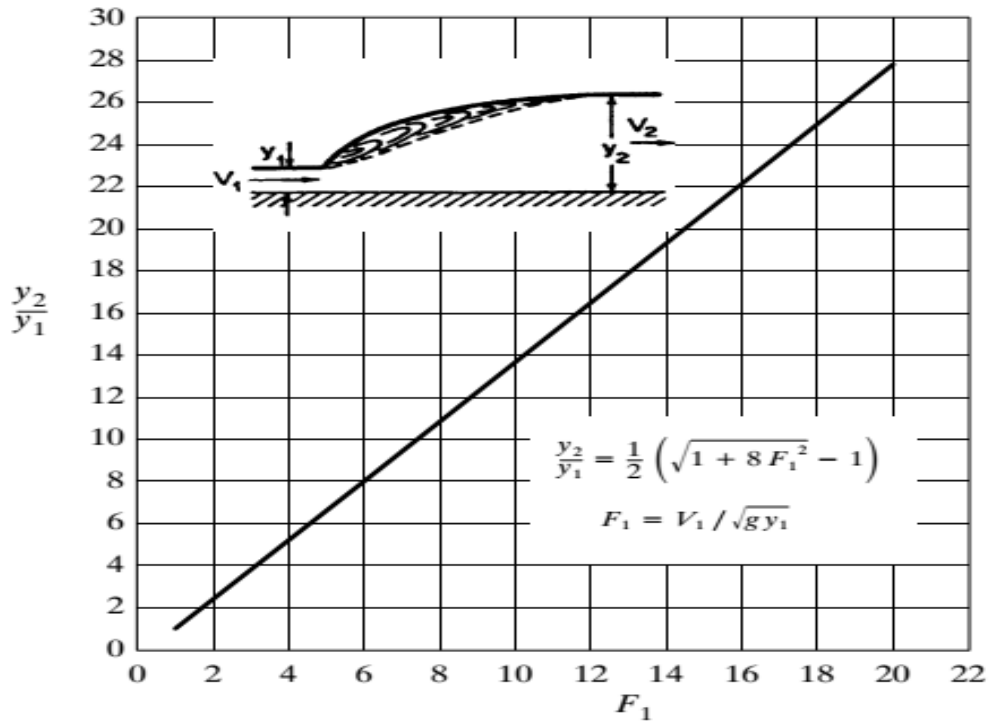


Figure 1.4 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828)

Hager et Sinniger (1986), ont donné une relation plus simple que la relation (1.8), et applicable pour un nombre de Froude  $F_1 > 3$

$$Y = \frac{h^*_{2}}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2} \tag{1.9}$$

### I.3.3. Caractéristiques géométriques du ressaut

#### I.3.3.1. Hauteur du ressaut

La hauteur du ressaut est donnée comme suit :

$$h = h_2 - h_1 \tag{1.10}$$

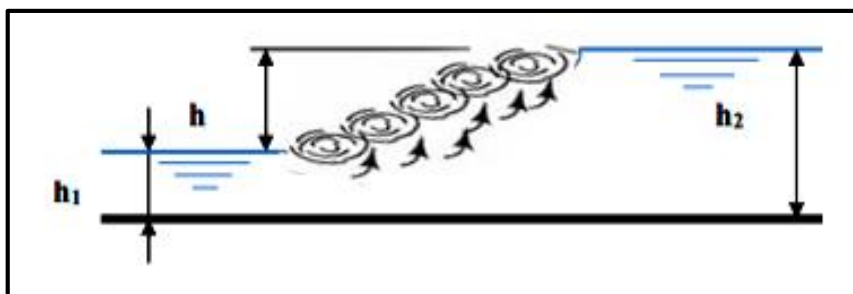


Figure 1.5 : Hauteur du ressaut

I.3.3.2. Longueur du rouleau

En 1990 HAGER et al définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudiée introduisent ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé.

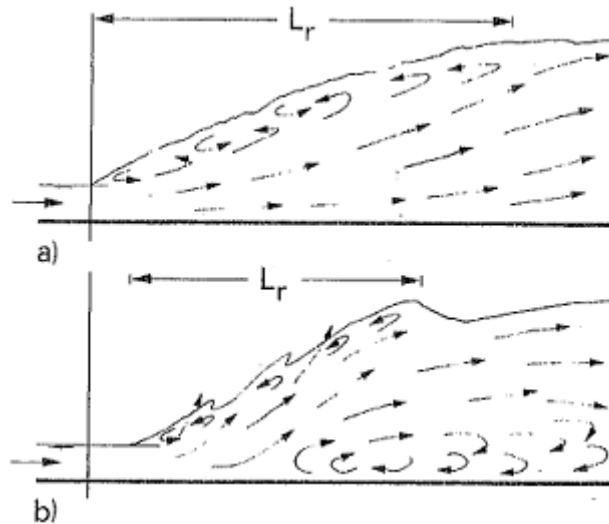


Figure 1.6 :Aspect du ressaut classique.

a) rouleau développé. b) rouleau non développé. Hager(1990)

- a- **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.
- b- **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.[11]

Les essais effectués par Hager et al. (1990), montrent que le rapport  $\lambda_{r^*} = L_{r^*}/h_1$  dépend du nombre de Froude  $Fr_1$  et du rapport d'aspect  $w = h_1/b$ . Les auteurs proposent les relations suivantes :

$$\lambda_{r^*} = -12 + 160 \operatorname{Tgh}(Fr_1/20) \quad \text{pour } w < 0,1 \quad (1.6) \quad (1.11)$$

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

« **Tgh** » désigne la tangente hyperbolique.

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

$$\lambda r^* = Lr^* / h_1 = 8(Fr_1 - 1,5) \quad (1.13)$$

### I.3.3.3. Longueur du ressaut

La longueur du ressaut dite  $L_j^*$  est la distance entre les deux hauteurs conjuguées  $h_1$  et  $h_2$ , [14] La longueur  $L_j^*$  est la caractéristique du ressaut la plus difficile à déterminer, mais on estime que cela est possible que si :

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

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

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

D'après **Hager et al. (1990)**, la variation de la longueur relative  $L_j^*/h_2^*$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  indique que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à 6 pour la gamme pratique  $4 < Fr_1 < 12$ .

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

Pour un nombre de Froude au-delà de  $F_1 = 3$  selon **Sinniger et Hager (1985)**, on peut également appliquer la formule empirique suivante.

$$\frac{L_j^*}{h_2} = \frac{35.\sqrt{Fr_1}}{8+Fr_1} \quad (1.16)$$

### I.3.3.4. Rendement du ressaut

Par l'application du théorème de **Bernoulli (1738)** on peut déterminer la perte d'énergie,  $\Delta H_{12}$  produite par le ressaut en admettant que  $Z_1 = Z_2$  (canal horizontal), la figure (1.7) on obtient :

$$\Delta E_{12} = \Delta H_{12} = H_1 - H_2 \quad (1.17)$$

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

$$H_1 = a_1 \cdot \frac{v_1^2}{2.g} + h_1 \quad (1.18)$$

Et la charge totale dans la section aval est :

$$H_2 = a_2 \cdot \frac{v_2^2}{2.g} + h_2 \quad (1.19)$$

Après avoir introduire les relations (1.18), (1.19) dans la relation (1.17) on obtiendra :

$$\Delta H_{12} = \left( a_1 \cdot \frac{v_1^2}{2.g} + h_1 \right) - \left( a_2 \cdot \frac{v_2^2}{2.g} + h_2 \right) \quad (1.20)$$

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

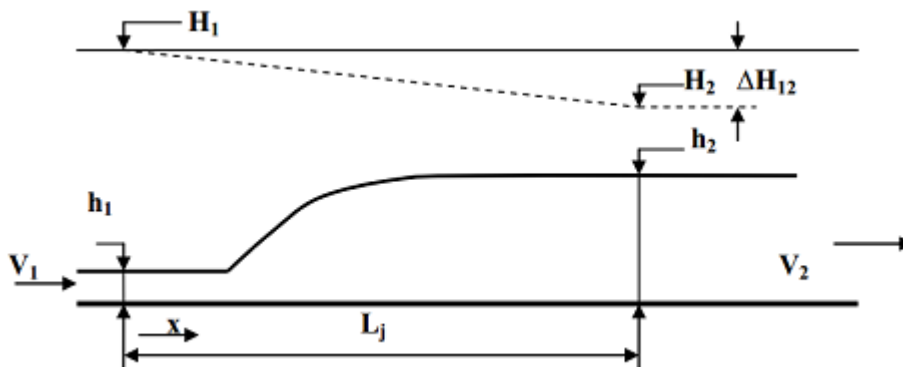


Figure 1.7 : (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (1.21)$$

Avec :  $A_1 = b \cdot h_1$

$A_2 = b \cdot h_2$

En tenant compte des relations (1.21) s'écrit :

$$\Delta H_{12} = (h_1 - h_2) + \left( \frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) \cdot \left( \frac{q^2}{2.g} \right) \quad (1.22)$$

$q = Q/b$  est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'équation de la quantité de mouvement définie par la relation (1.6) :

$$\frac{q^2}{2.g} = \frac{(h_1.h_2^2 + h_2.h_1^2)}{4} \quad (1.23)$$

Ainsi, l'équation (1.22) s'écrit sous sa forme définitive :

$$\Delta H_{12} = \frac{(h_1 - h_2)^3}{(4.h_2.h_1)} \quad (1.24)$$

Donc à partir de la relation (1.22) 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  $\eta$  :

$$\eta = \frac{\Delta H_{12}}{H_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (1.25)$$

Donc pour déterminer les charges totales dans les sections amont et aval on utilise les relations (1.16) et (1.19) et en tenant compte de la relation (1.7) du nombre de Froude on obtiendra :

$$H_1 = h_1 \cdot \left[ 1 + \frac{Fr_1^2}{2} \right] \quad (1.26)$$

$$H_2 = h_1 \cdot \left[ Y + \frac{Fr_1^2}{2Y^2} \right] \quad (1.27)$$

$Y$  est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique définit par la relation (1.9) de **Bélangier**

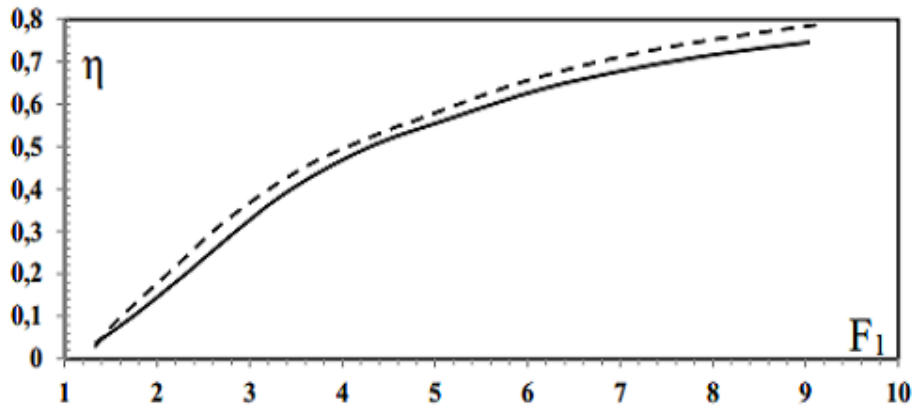
En remplaçant (1.26) et (1.27) dans l'expression du rendement du ressaut (1.25) on obtiendra :

$$\eta = 1 - \frac{\left[ Y + \frac{Fr_1^2}{2Y^2} \right]}{\left[ 1 + \frac{Fr_1^2}{2} \right]} \quad (1.28)$$

**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  $Fr_1 > 2$ .

$$\eta = \left[ 1 - \frac{\sqrt{2}}{Fr_1} \right]^2 \quad (1.29)$$

Les relations (1.28) et (1.29) sont représentées graphiquement dans le système d'axes de coordonnées cartésiennes de la figure (1.8).



**Figure 1.8 :** Rendement  $\eta$  du ressaut classique en fonction du nombre de **Froude**  $F_1$  (—) Courbe tracée selon la relation (1.28), (-----) courbe tracée Selon la relation (1.29) [9]

### I.3.3.5. Profil de surface :

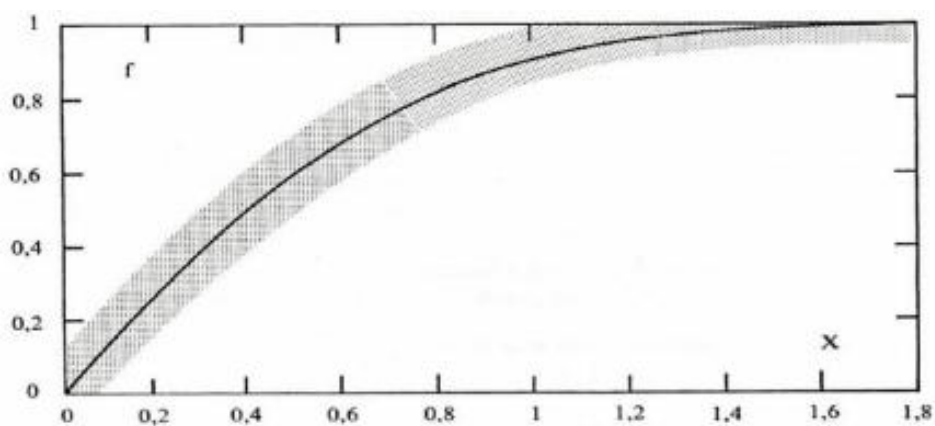
Selon les essais de **Rajaratnam** et **Subramanya** (1968) et Schröder [1969], la représentation adimensionnelle du profil de surface est possible si  $3.5 < F_1 < 10$  et  $h_1 > 0.05\text{m}$ . Selon **Schröder**, on introduit

$$X = x / L_r, \quad f = (h - h_1) / (h_2 - h_1) \quad (1.30)$$

Où  $x$  est la coordonnée longitudinale avec origine au pied du ressaut

La figure (1.13) permet la détermination du profil de la surface  $h(x)$ , en supposant que  $h_1, h_2$  sont connus.

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



**Figure 1.9 :** Profil de la surface ressaut hydraulique plan ; définition selon les équations (1.30). [13]

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

##### I.4.1. Approche de Forster et Skrinde (1950)

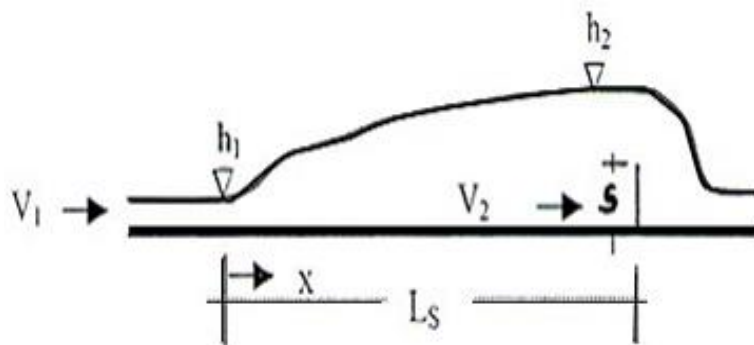
###### I.4.1.1. Seuil continu à paroi mince

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

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

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

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



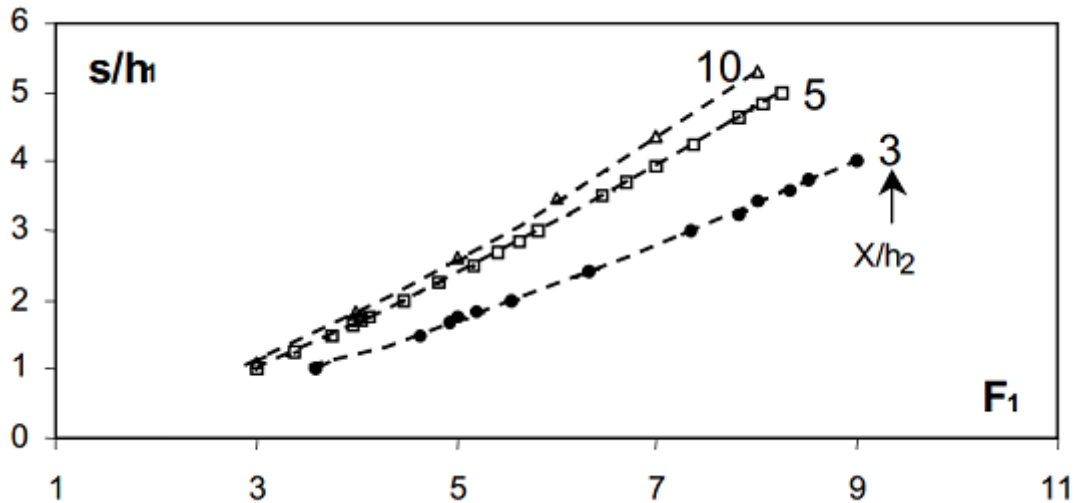
**Figure 1.10:** Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince. [9]

Le seuil de hauteur  $s$  est dénoyé et fonctionne comme un déversoir, la profondeur  $h_3$  de l'écoulement à l'aval n'a ainsi aucune influence sur le débit franchissant le seuil. Cette condition est satisfaite lorsque :[6]

$$h_3 < h_2 - 0.75.s$$

La figure (1.10) montre la variation expérimentale de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour les valeurs 3, 5 et 10 de la position relative  $X/h_2$  du seuil.





**Figure 1.11:** Variation expérimentale de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude  $Fr_1$  de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative  $X/h_2$  du seuil (Forster et Skrinde, 1950).

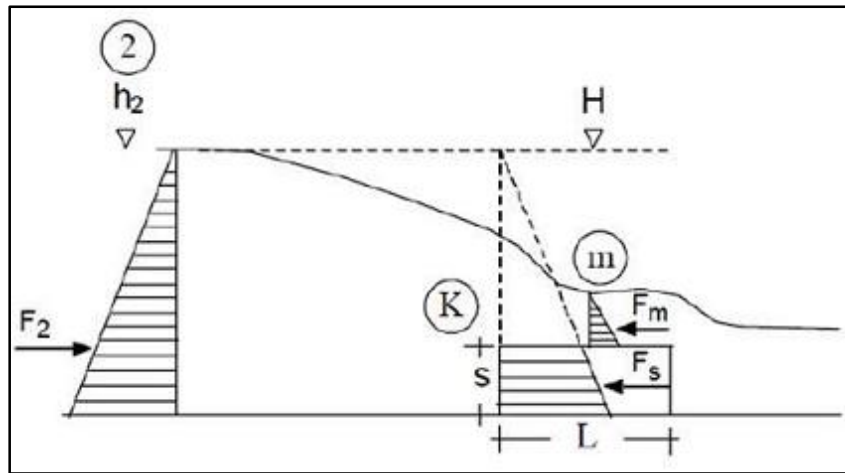
Trois courbes sont alors déterminées pour des valeurs 3,5 et 10 de  $x/h$ . On peut constater que pour l'ensemble des valeurs du nombre de **Froude**  $Fr_1$ .

Les courbes expérimentales obtenues se rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que  $x/h_2$  augmente et pour  $x/h_2$  compris entre 5 et 10, la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil ne subit pas des grandes variations. Pratiquement, on considère que la position relative  $x/h_2$  du seuil est approximativement égale à 6.[6]

#### I.4.1.2. Seuil continue 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  $L_s$  du seuil soit suffisante (figure 1.11). La notion de seuil épais est également liée aux caractéristiques de l'écoulement et suivant la classification de **Raoet Murlidhar(1963)**, le seuil est considéré comme étant épais lorsque :

$$0.1 \leq \frac{(h_2 - s)}{L} \leq 0.35 \quad (1.31)$$



**Figure 1.12 :** *Écoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur  $s$  et de longueur  $L$ . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions) [10]*

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

### I.5. Conclusion

A travers ce chapitre nous avons examiné, en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire (ressaut hydraulique classique),

Nous avons présenté les différentes formes du ressaut, selon la classification de **Bradley** et **Peterka (1957)**, qui dépendent de la variation du nombre de Froude  $F_1$ , à l'amont du ressaut. Nous avons également examiné, les travaux de **Hager et al. (1990)** relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement, cette équation mène à la relation de **Bélanger** qui exprime le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  à l'amont du ressaut.

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

## **ChapitreII**

# **RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOIDAL**

## II .Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal

### II 1. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal symétrique

#### II 1.1. Introduction

Ce chapitre a été divisé en deux parties.

La première partie concerne le ressaut dans le canal trapézoïdal symétrique. Les caractéristiques de ce type de ressaut sont exposées, et la détermination des rapports des hauteurs conjuguées du ressaut est expliquée.

Dans la deuxième partie, le ressaut hydraulique évoluant dans le canal trapézoïdal asymétrique sera exposé à travers les travaux de **D'Alberto et José Vasquez Diaz(1954)** et **Hubert Chanson (2018)**.

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

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

$$\frac{L_j}{(h_2-h_1)} = 7,1 \cdot (1 + 10M) \quad (3.1)$$

Avec :

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

La relation de **Silvester (1964)** montre clairement que, la longueur du ressaut est d'autant plus grande que  $M$  tend vers l'infini. Les valeurs croissantes de  $M$  indiquent un profil trapézoïdal géométriquement rétréci à la base en tendant vers le profil triangulaire ( $b \rightarrow 0$ ). Par contre, les valeurs décroissantes de  $M$  aboutissent à des profils trapézoïdaux d'autant plus refermés vers le haut en tendant vers le profil rectangulaire ( $M \rightarrow \infty$ ). Ces considérations laissent penser que le ressaut en canal triangulaire devrait s'étendre sur une longueur beaucoup plus grande que son homologue du rectangulaire.

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

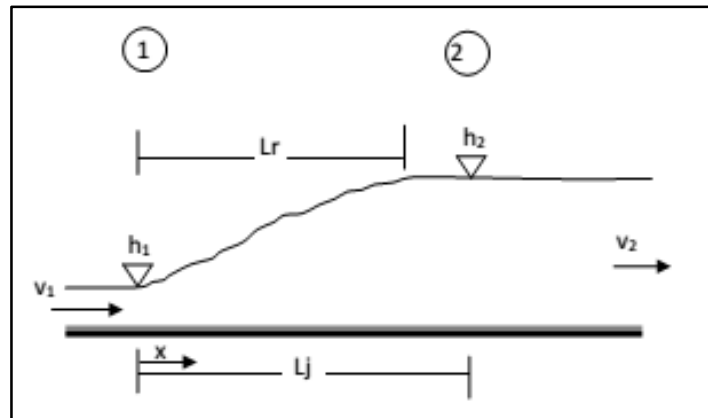
$M \leq 0,4$  . Les observations ont révélé l'existence d'un rouleau du fond, jusqu'alors jamais détecté, et dont les caractéristiques géométriques, telles que la longueur à la base, la hauteur ainsi que la position sont définies.[15]

Les essais ont montré que la longueur relative  $L_j/h_2$  du ressaut dépend à la fois de la valeur du nombre de **Froude**  $Fr_1$  et de la valeur de la hauteur relative initiale  $M$  : les courbes de la variation de  $L_j/h_2$ , obtenues pour  $0,1 \leq M \leq 0,4$ , issues des essais de **Peterka** pour le ressaut en canal de section droite triangulaire.[15]

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

### II.1.2.Détermination du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

En négligeant toutes les forces de frottement et en considérant une distribution uniforme pour les vitesses et hydrostatique pour les pressions dans les sections (1) et (2),( figure (3.1)),de part et d'autre du ressaut.



**Figure (3.1) :** Ressaut hydraulique classique. [11]

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

$$\sum F_{ext} = F_{p1} + F_{p2} + G \sin \theta - f = \rho QV_2 - \rho QV_1 \quad (3.2)$$

Où :

$\rho$  :la masse volumique du liquide en mouvement.

$Q$  : débit volume.

$V$  : vitesse d'écoulement.

$g$  : accélération de la pesanteur.

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

$F_{p1}$  et  $F_{p2}$  : forces des pressions hydrostatiques.

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

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

Avec :

$$F_{p1} = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_1 \cdot A_1 \quad (3.3)$$

$$F_{p2} = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_{*2} \cdot A_2 \quad (3.4)$$

$\bar{\omega} = \rho \cdot g$  . Désigne le poids spécifique du liquide

$g$  : est l'accélération de la pesanteur

$\bar{h}_1$  et  $\bar{h}_{*2}$  : respectivement la position du centre de gravité des sections  $A_1$  et  $A_2$  par rapport à la surface libre de l'écoulement dans ces sections.

On peut ainsi écrire que:

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6} \left( \frac{3b+2mh_1}{A_1} \right) \quad (3.5)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6} \left( \frac{3b+2mh_2}{A_2} \right) \quad (3.6)$$

Les sections initiale et finale sont:

$$A_1 = b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2 \text{ et } A_2 = b \cdot h_2 + m \cdot h_2^2 \quad (3.7)$$

tel que:

$b$  : la largeur du canal trapézoïdal.

$m = \text{Co tang}(\theta)$

L'application de cette équation donne :

$$\frac{bh_1^2}{2} + \frac{mh_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g*(b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2)} = \frac{bh_2^2}{2} + \frac{mh_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g*(b \cdot h_2 + m \cdot h_2^2)} \quad (3.8)$$

Le nombre de **Froude**  $Fr_1$  caractérisant l'écoulement dans la section initiale du ressaut est tel que :

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2)^3} \quad (3.9)$$

En introduisant le paramètre  $Y$  définissant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut. L'équation devient :

$$Fr_1^2 \left[ 1 - \frac{(1+M)}{Y(1+M.Y)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[ Y^2 \left( 1 + \frac{2.M.Y}{3} \right) - \left( 1 + \frac{2.M}{3} \right) \right] \quad (3.10)$$

Tels que:  $Y = h_2/h_1$  et  $M = mh_1/b$

La figure (3.2) montre le rapport des deux hauteur conjuguées,  $Y = h_2/h_1$  en fonction de  $M$  et  $Fr_1$ . Pour  $Fr_1$  fixé,  $Y$  décroît lorsque  $M$  croît. [13]

Une approximation explicite pour  $Y$  de l'équation ( ) est donnée par

$$Y = \frac{\frac{1}{2^2} Fr_1 - \left(\frac{1}{2}\right)}{\left(1 + \frac{1}{2} M Fr_1\right)^2} \quad (3.11)$$

L'équation (3.11) dévie de L'équation (3.10) de moins de 5% pour  $M < 0.50$ , et de moins de 10% pour  $M < 1$ . On constat que le paramètre  $M$  réduit le rapport des hauteurs conjuguées par rapport au cas  $M=0$ .

L'équation (3.10) a cinq variables est réduite à trois variables ( $Fr_1^2$ ,  $M$ ,  $Y$ ). Les éléments connus sont  $Q$ ,  $h_1$ ,  $b$  et  $m$  qui forment la relation (3.9).

L'élément inconnu est  $h_2 = ?$

Connaissant  $Fr_1^2$  et  $M$  on peut tirer à partir du graphique, le rapport  $Y = h_2/h_1$  d'où

$$h_2 = Y.h_1$$

### II.1.2.1. Cas particulier du canal rectangulaire

Pour obtenir la fonction  $Y(Fr_1)$  pour le cas du ressaut hydraulique évaluant en canal rectangulaire, il suffit d'annuler dans l'équation (3.10)  $m$  et  $M$  ( $m = 0$  et  $M = 0$ ). L'équation

(3.10) devient.

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

Ou encore :

$$Fr_1^2 = \frac{Y(Y-1)}{2} \quad (3.12)$$

Et  $Fr_1^2$  devient :

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

Eléments connus : Q, b, h1 donnent  $F_1$ .

L'équation (3.12) conduit à la relation :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right] \quad (3.13)$$

C'est l'équation de **Bélangier (1828)**, cette équation traduit un ressaut classique sans obstacle en aval. Elle a été reprise par **Hager (1988)** :

Valable pour  $Fr_1 > 3$

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot Fr_1 - \frac{1}{2}$$

Hager à vérifier expérimentalement que pour des ressauts où  $Fr_1 > 3$ ,  $\sqrt{1 + 8Fr_1^2} \approx \sqrt{8Fr_1^2}$

d'où a relation

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot Fr_1 - \frac{1}{2} \quad (3.14)$$

### II.1.2.2. Cas particulier du canal triangulaire

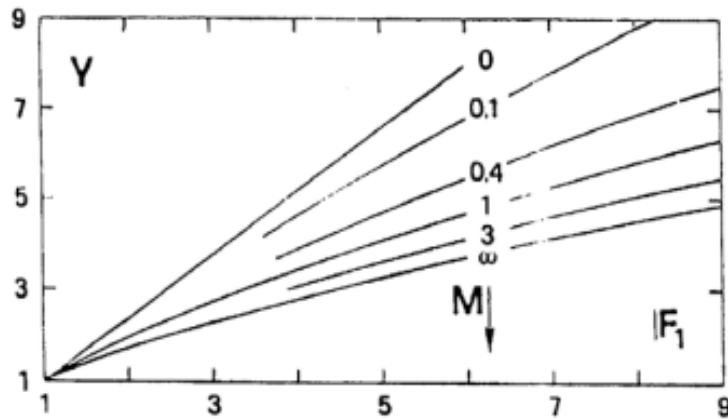
En remplaçant dans l'équation (3.10) :  $b = 0$  et  $1/M = 0$  ( $M \rightarrow \infty$ ), l'équation (3.10) donne :

$$Fr_1^2 = \frac{2Y^2(Y^2+Y+1)}{3(Y+1)} \quad (3.15)$$

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

$$Y = \left( \frac{3}{2} Fr_1^2 - 1 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.16)$$





**Figure (3.2) :** 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

## II. 1.3. Caractéristique du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

### II.1.3.1. Longueur du ressaut

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

La longueur du ressaut hydraulique en canaux trapézoïdaux mesurée le long de l'axe du canal est trouvée moins détachée que celle en canal rectangulaire.[15]

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

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_2} = 5 \left[ 1 + 4 \left( \frac{w_2 - w_1}{w_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3.17)$$

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

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

Une autre formule de la longueur du ressaut a été analysée par Silvester (1964), Wanoschek et Hager (1989) c'est la relation (3.1),  $\frac{L_j}{(h_2 - h_1)} = 7,1 \cdot (1 + 10M)$

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

$$\text{Log}_{10} \left( \frac{L_j}{\Delta H} \right) = 1.71\xi + 0.315m + 1.58 \quad (3.18)$$

Où :

- $\xi = \frac{\Delta H}{H_i}$  : est la perte d'énergie relative à travers le ressaut.
- $\Delta H$  : la perte d'énergie du ressaut.
- $H_i$  : la charge totale d'eau.

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

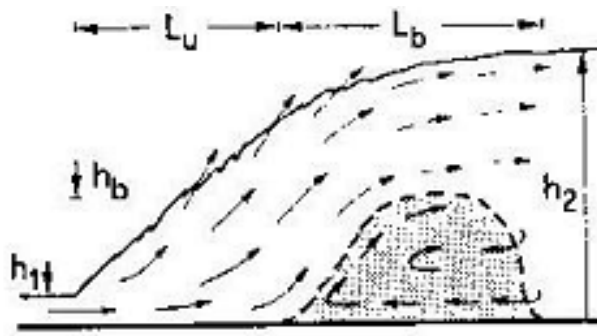


Figure (3.3) : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale

### II.1.3.2. Rendement

La perte de charge  $\Delta H$  du ressaut est par définition la différence des charges initiale et finale :  $\Delta H = H_1 - H_2$

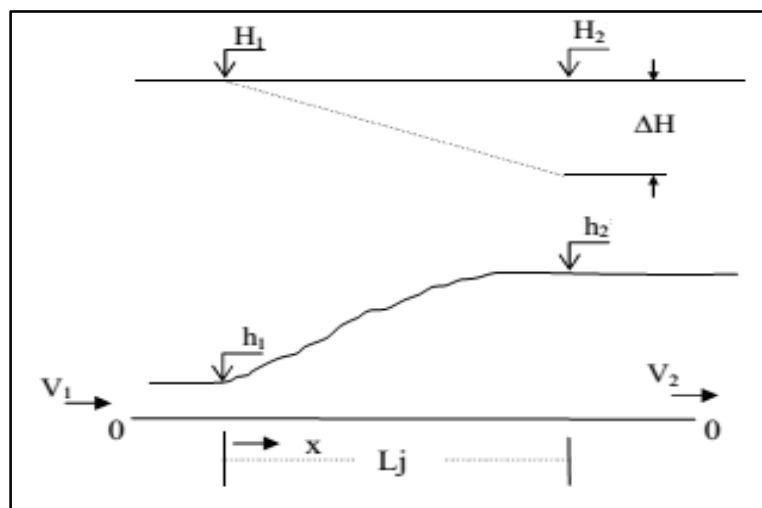


Figure (3.4) : (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

En raison du caractère permanent de l'écoulement, l'équation de continuité reste en vigueur et l'on peut écrire :  $Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2$ .

En se référant au plan 0-0, la charge totale dans la section amont est :

$$H_1 = \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A_1^2} + h_1 \quad (3.19)$$

Et la charge totale dans la section aval est :

$$H_2 = \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A_2^2} + h_2 \quad (3.20)$$

La perte de charge relative est par définition comme étant le rapport de  $\Delta H$  à la charge initiale  $H_1$  :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (3.21)$$

En tenant compte des relations donnant le rapport des hauteurs conjuguées.  $Y = h_2/h_1$  et  $M = mh_1/b$  et la relation (3.9) du nombre de Froude  $Fr_1$ . [12]

On obtiendra :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{Fr_1^2}{2Y^2} \left[ \frac{(1+M)^3}{(1+2M)(1+MY)^2} \right]}{1 + \frac{Fr_1^2}{2} \left( \frac{1+M}{1+2M} \right)} \quad (3.22)$$

Et  $0 < \eta < 1$

### II.1.3.2.1. Cas particulier du canal rectangulaire

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

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{Fr_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{Fr_1^2}{2}} \quad (3.23)$$

**Hager et Sinniger (1985)** ont proposé une expression approchée qui nous permet de calculer simplement le rendement du ressaut est cela pour un nombre de **Froude**  $Fr_1 > 2.5$

$$\eta = \left[ 1 - \frac{\sqrt{2}}{Fr_1} \right]^2 \quad (3.24)$$

### II.1.3.2.2. Cas du canal triangulaire

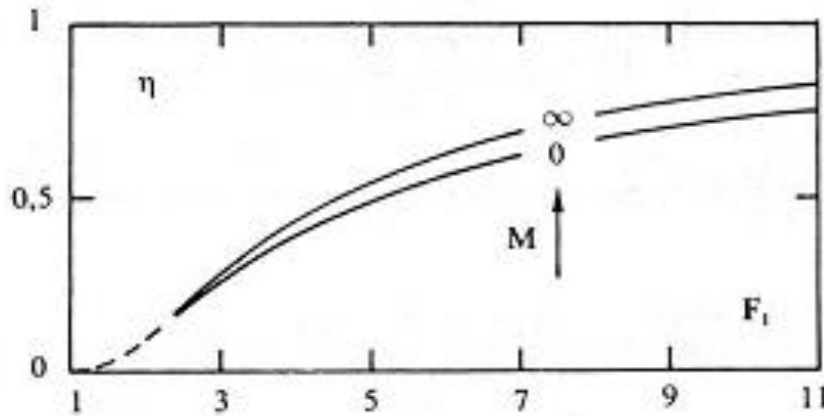
Pour le cas du canal triangulaire on a :  $1/M = 0$  ; ( $M \rightarrow \infty$ ). L'expression de la perte de charge relative sera :

$$\eta = 1 - \frac{1 + \frac{Fr_1^2}{4}}{1 + \frac{Fr_1^2}{4}} \quad (3.25)$$

En tenant compte de l'approximation (), on en déduit ,pour le profil triangulaire,(Hager et Wano-schek 1987) [13]

Pour  $Fr_1 > 2.5$

$$\eta = \left[ \left( 1 - \frac{12}{Fr_1^4} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \quad (3.26)$$



**Figure (3.5) :** Rendement  $\eta$  du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude.  
 $M \rightarrow \infty$  : Cas du canal triangulaire.  $M = 0$  : Cas du canal rectangulaire.

La figure (3.5) montre que le rendement du ressaut dans les canaux trapézoïdaux est compris entre les courbes de rendement du ressaut dans le canal triangulaire et du canal rectangulaire. Par ailleurs, pour le même nombre de **Froude**  $Fr_1$  le rendement  $\eta$  est important pour le canal triangulaire.[12]

## II .2.Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique

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

Dans cette approche, Alberto José et Rodriguez-Diaz ont étudié le ressaut dans un canal trapézoïdal dans lequel les parois latérales sont verticales, la surface de l'eau et le canal inférieur ne sont pas parallèles. La section non rectangulaire à étudier est présentée en coupe transversale dans la figure (3.6). [1]

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.

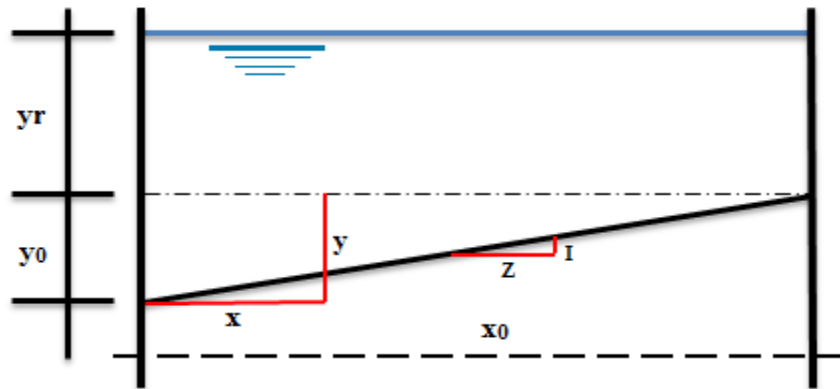


Figure (3.6): Section transversale du canal

$x_0$ : Largeur de la section transversale

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

$y_r$  : 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

$x_d$ : Longueur du retour latéral sur le côté profond du canal

$V$  : Vitesse

$Q$  : Débit

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

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

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

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

$$\Phi = y_r / y_0$$

$$\theta = (Q/At)^2 / g y_0$$

$F_1$  : Nombre de Froude

$\gamma$  : Poids spécifique de l'eau

$\rho$  : Densité de la masse

$g$  : Accélération de la gravité

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

### II.2.1.1. Analyse de la section totale

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

$$P + M = \frac{1}{2} x_0 y_r^2 \gamma + \frac{1}{2} x_0 y_0 \gamma (y_r + y_0/3) + \rho Q^2 / x_0 y_r + \left( \frac{1}{2} x_0 y_0 \right) \quad (3.27)$$

La forme adimensionnelle :

$$\Psi = \Phi^2 + \Phi + \frac{1}{3} + \theta / (1 + 2\Phi) \quad (3.28)$$

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

$$\Phi_1^2 + \Phi_1 + \frac{1}{3} + \theta / (1 + 2\Phi_1) = \Phi_2^2 + \Phi_2 + \frac{1}{3} + \theta / (1 + 2\Phi_2) \quad (3.29)$$

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

La solution de  $\Phi_2$  pour des valeurs données de  $\Phi_1$  et  $\theta$  a été réalisée graphiquement en traçant  $\Psi$  par rapport à  $\Phi$  pour une valeur donnée de  $\theta$ .

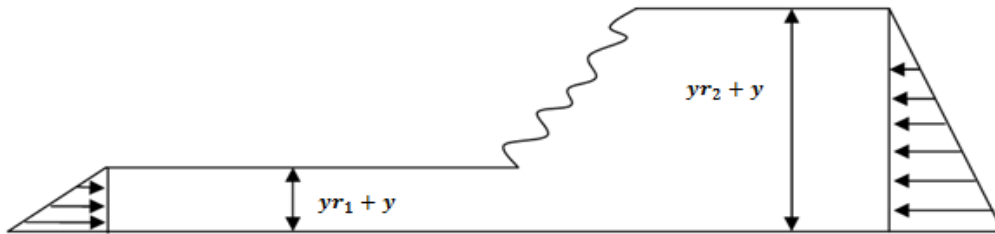
Une série de courbes de  $\Psi$  par rapport  $\Phi$  a été construite, chaque courbe représente une valeur différente de  $\theta$ .

D'après ces courbes, la valeur correcte de  $\Psi$  peut être déterminée pour donner la valeur de  $\Phi$  et de  $\theta$ , puisque la valeur est la même pour les sections amont et aval.

**II.2.1.2. 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 (3.7):** Section de la bande longitudinale

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

$$\frac{1}{2}\gamma(yr_1 + y)^2 + V_1^2(y + yr_1) = \frac{1}{2}\gamma(yr_2 + y)^2 + V_2^2(y + yr_2) \quad (3.30)$$

On a:  $V = Q/At(1 + 2\Phi)$ , divisant par  $\gamma y_0^2$ , l'expression suivante est obtenue pour la bande.

$$P + \frac{M}{\gamma y_0^2} = \frac{1}{2}\left(\frac{y}{y_0} + \Phi_1\right)^2 \theta \left(\frac{y}{y_0} + \Phi_1\right) / (1 + 2\Phi_1)^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{y}{y_0} + \Phi_2\right)^2 + \theta \left(\frac{y}{y_0} + \Phi_2\right) / (1 + 2\Phi_2)^2 \quad (3.31)$$

Pour l'équilibre

$$(P + M)_{s_1} = (P + M)_{s_2}$$

On a :

$$G = (P + M)_{s_1} / (P + M)_{s_2} \quad (3.32)$$

$M=1$  pour l'équilibre

$M>1$  pour P+M déficience en amont

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

De la géométrie :

$$y/y_0 = 1 - X/X_0 \quad (3.33)$$

Remplaçant (3.33) dans (3.31) et (3.32) :

$$G = \frac{\frac{1}{2}(1 - X/X_0 + \Phi_2)^2 + \theta(1 - X/X_0 + \Phi_2)/(1 + 2\Phi_2)^2}{\frac{1}{2}(1 - X/X_0 + \Phi_1)^2 + \theta(1 - X/X_0 + \Phi_1)/(1 + 2\Phi_1)^2} \quad (3.34)$$

Le paramètre  $G$  ressemble au paramètre de forme  $H$  utilisé dans les études de la couche limite. La valeur de  $G$  est une mesure approchée de la quantité de mouvement à toute la bande longitudinale, et la valeur de  $H$  représente la mesure approchée de la quantité de mouvement dans la couche limite. Autrement, le critère de séparation de la couche limite est souvent exprimé par le taux de changement de  $H$  plutôt que la valeur communément utilisée de  $H$ . La valeur de  $G$  ou  $\partial G/\partial(X/X_0)$  peuvent être des mesures valables si le ressaut hydraulique est possible.

La valeur maximale de  $G$  se produit au fond le peu profond, où  $X/X_0 = 1$

$$G_m = \frac{\frac{1}{2}\Phi_2^2 + \theta\Phi_2/(1 + 2\Phi_2)^2}{\frac{1}{2}\Phi_1^2 + \theta\Phi_1/(1 + 2\Phi_1)^2} \quad (3.35)$$

Les valeurs de  $G$  par rapport à  $\phi$  pour les différentes valeurs de  $\Theta$  sont illustrées dans la figure (3.8).

D'une manière similaire

$$\frac{\partial G/\partial(X/X_0)}{X/X_0} = 1 = G(\Phi_2 - \Phi_1)/\Phi_2\Phi_1 \quad (3.37)$$

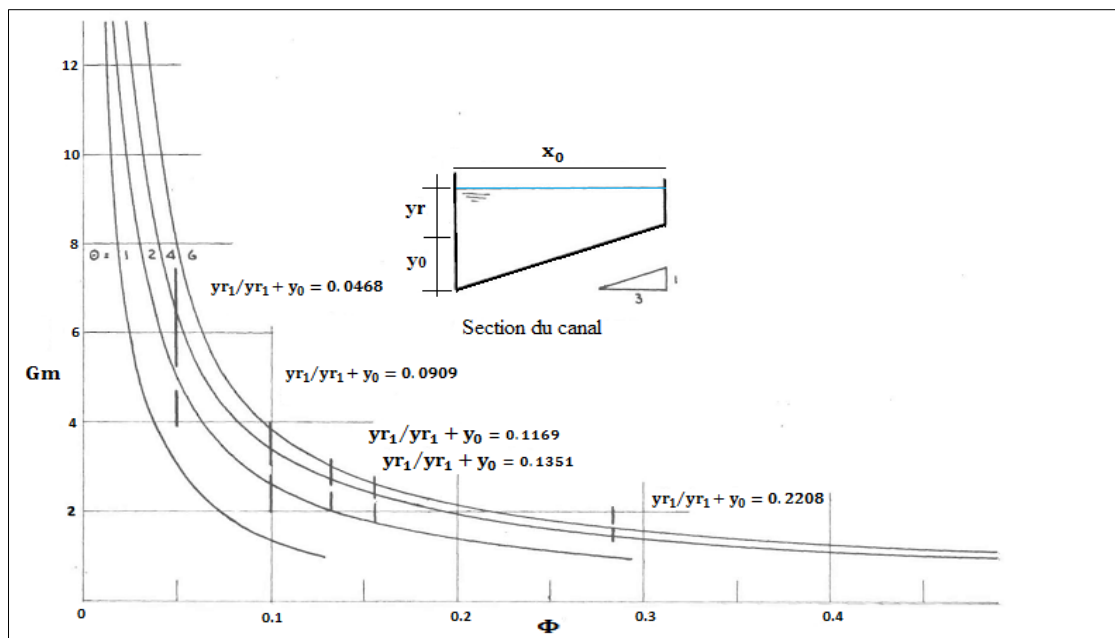
Les valeurs  $\frac{\partial G/\partial(X/X_0)}{X/X_0} = 1$  sont tracés en fonction de  $\Phi_1$  pour les différents valeurs de  $\Theta$  figure (3.9).

Le diagramme de  $G_m$  et  $\frac{\partial G/\partial(X/X_0)}{X/X_0} = 1$  montre les valeurs correspondant aux essais. Les essais sont effectués à cinq largeurs différentes de canal ou à cinq valeurs différentes de  $y_{r1}/y_{r1} + y_0$ .

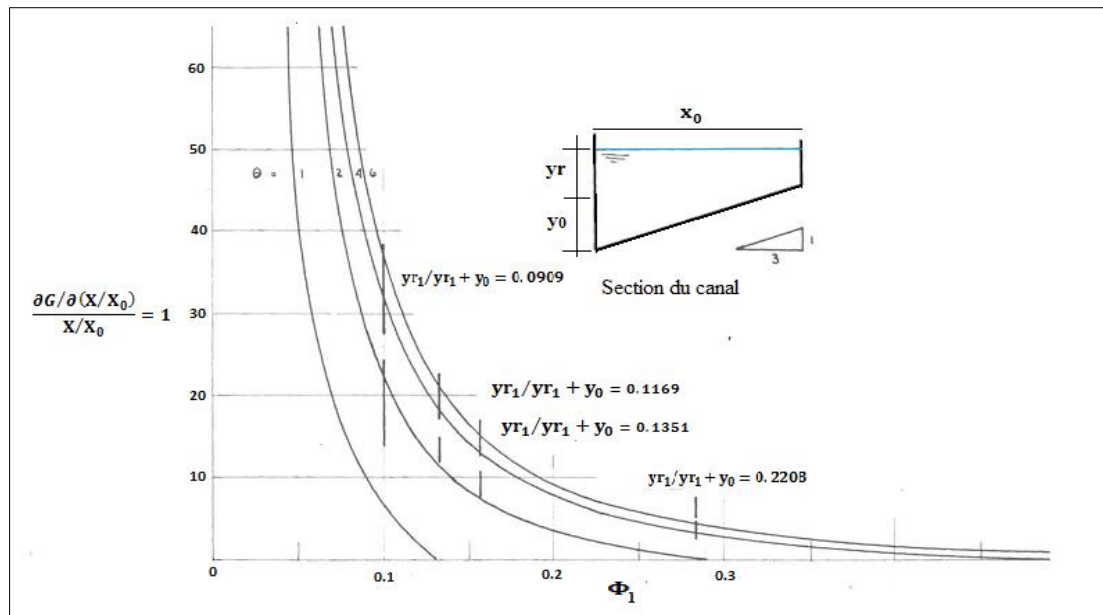


La valeur du paramètre  $y_{r1}/y_{r1} + y_0$  pour la section transversale rectangulaire est égale à l'unité. Dans ce cas, le ressaut est toujours possible et le rapport  $G$  c'est  $1$ , il ya la force de pression plus l'équilibre de la quantité de mouvement dans chaque bande longitudinale. Dans une section triangulaire, la valeur de  $y_{r1}/y_{r1} + y_0$  est égale à zéro, la formation du ressaut est impossible et les vagues ondulantes et rouleaux sur le côté peu profond sont présents ; la valeur maximale correspondante de  $G$  est infinie, ce qui signifie qu'il y a une force de pression plus une diminution de la quantité de mouvement en aval et qui ne peut pas être fourni, rendant impossible la formation du ressaut hydraulique.

Les valeurs théoriques calculées pour le rapport  $Gm$  et tracées dans la figure (3.8) sont toujours plus grandes que l'unité, ce qui veut dire qu'il y a une augmentation de la quantité de mouvement sur le côté profond du canal et une diminution sur le côté le peu profond.



**Figure (3.8):** Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté peu profond



**Figure (3.9):** Diagramme adimensionnel du taux de changement de  $M$  sur le côté peu profond

### II.2.1.3. 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 (3.5a et 3.5b).
- Le deuxième type consiste en une onde perpendiculaire à la section transversale qui peut être appelée ressaut hydraulique ; aucune seconde vague n'a été observée. Ce type d'écoulement est également esquissé dans les figures (3.5c et 3.5d).

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

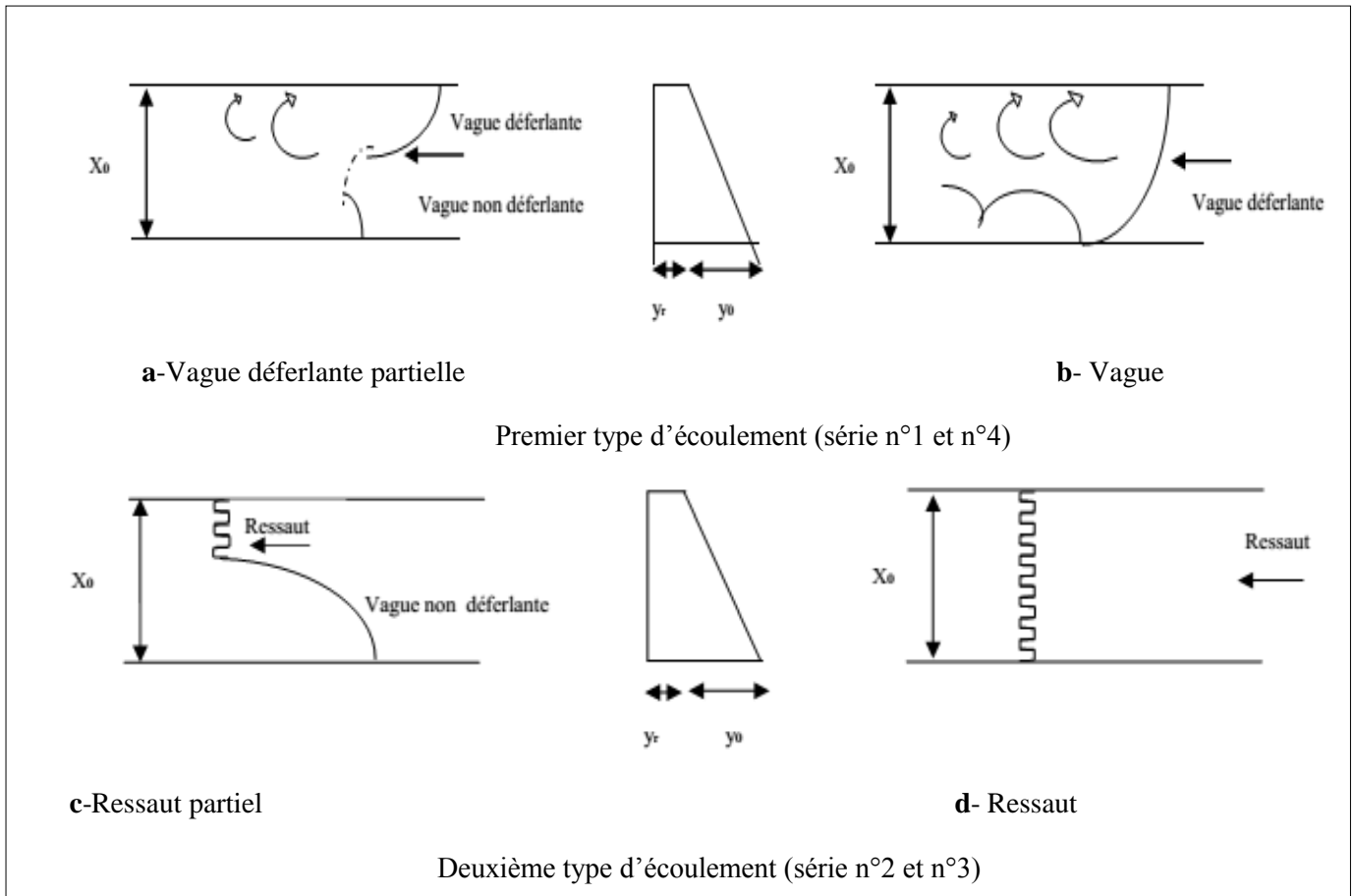


Figure (3.10) : Schéma général d'écoulement

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

1. En fonction de la valeur du nombre de Froude, l'écoulement est divisé en deux types. Si le nombre de Froude est inférieur à 1.83, des vagues déferlantes partielles sont obtenues ; et si le nombre de Froude est supérieur à 1.83, des vagues déferlantes sur toute la section du canal sont observées.
2. la valeur limite théorique de  $F_1 = 1.73$  pour les conditions de ressaut irrégulier et direct dans le canal rectangulaire sont très proches de la valeur de  $F_1 = 1.83$  obtenu pour ce canal. Par conséquent, la valeur du nombre de Froude un peu inférieur à 2 peut être considérée comme la limite entre les vagues déferlantes et non déferlantes indépendamment de la forme du canal.
3. Dans un canal rectangulaire, le nombre de Froude est suffisant pour décrire le type de l'onde, puisque seulement deux types sont possibles ; le ressaut irrégulier et direct. Dans un canal non rectangulaire une division supplémentaire est nécessaire, puisque deux phénomènes complètement différents sont possibles ; le type de l'écoulement

constitué des vagues ondulantes et des tourbillons dans le côté peu profond, c'est le ressaut hydraulique. la ligne de démarcation entre ces deux types d'écoulement est donnée soit par la valeur de  $G$  ou la valeur de  $dG/d(x/x_0)$  du côté peu profond. La condition de formation du ressaut est :  $G_m < 2.8$  ou  $dG/d(x/x_0) = 1 < 18.4$

4. Dans le cas de  $G_m$  est supérieur à 2.8, la longueur de retour latéral sur le côté peu profond augmente rapidement (si il ya une déviation par rapport à la forme rectangulaire) ; et elle devient infinie (si le canal est triangulaire).
5. La longueur du retour latéral sur le côté profond est toujours plus petite que celle sur le côté peu profond, elle augmente également par la diminution de la largeur du canal. Donc, la condition limite dans le canal rectangulaire est obtenue si la longueur des deux côtés du canal est la même.
6. La longueur du retour latéral sur le côté peu profond pour un ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire ( $F_1 > 1.83$  et  $G_m < 2.8$ ) est plus petite que la longueur du ressaut dans un canal rectangulaire
7. Les conclusions 5 et 6 indiquent que le ressaut hydraulique dans une section non rectangulaire est plus efficace en tant que dissipateur d'énergie que dans une section rectangulaire.

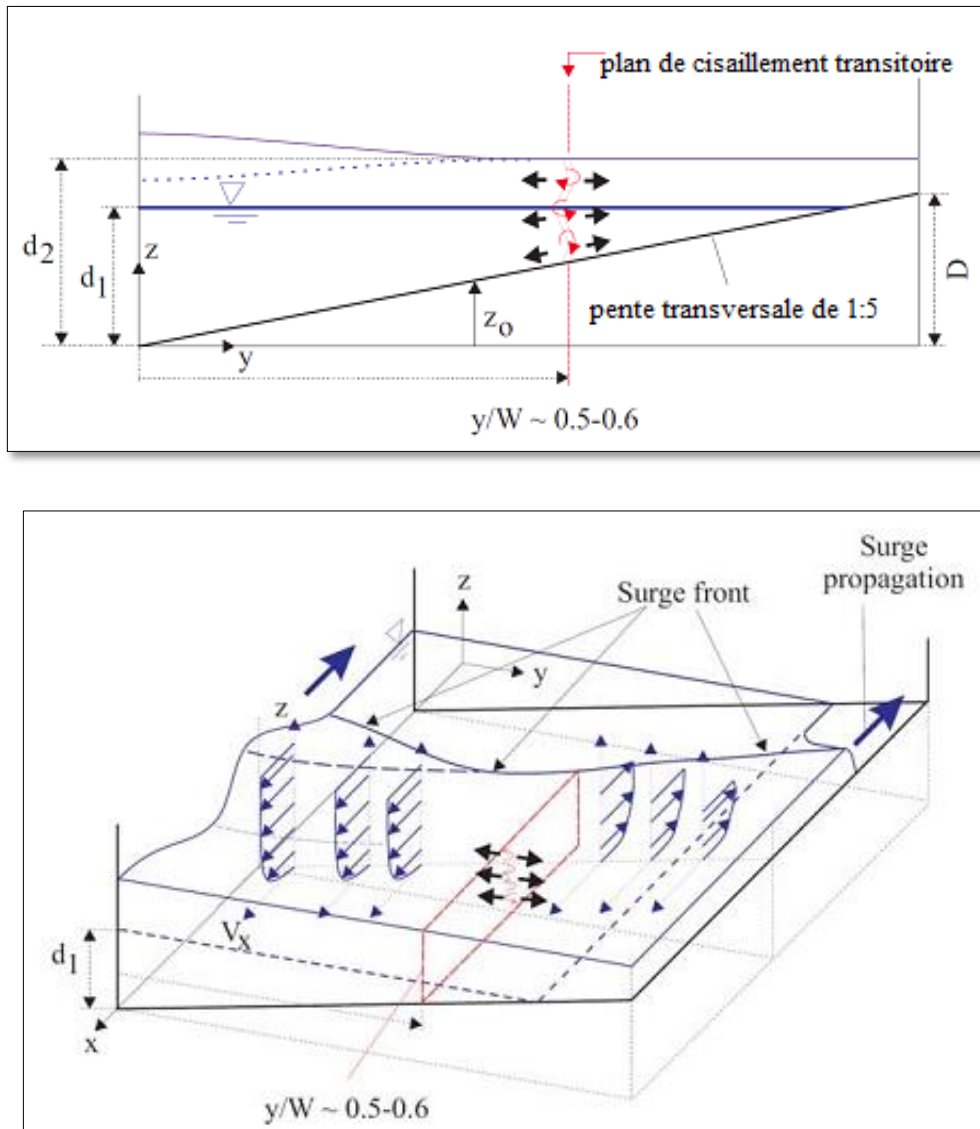
## II.2.2.Approche d'Hubert Chanson

### II.2.2.1. Propagation positive de ressaut dans un 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.[8]

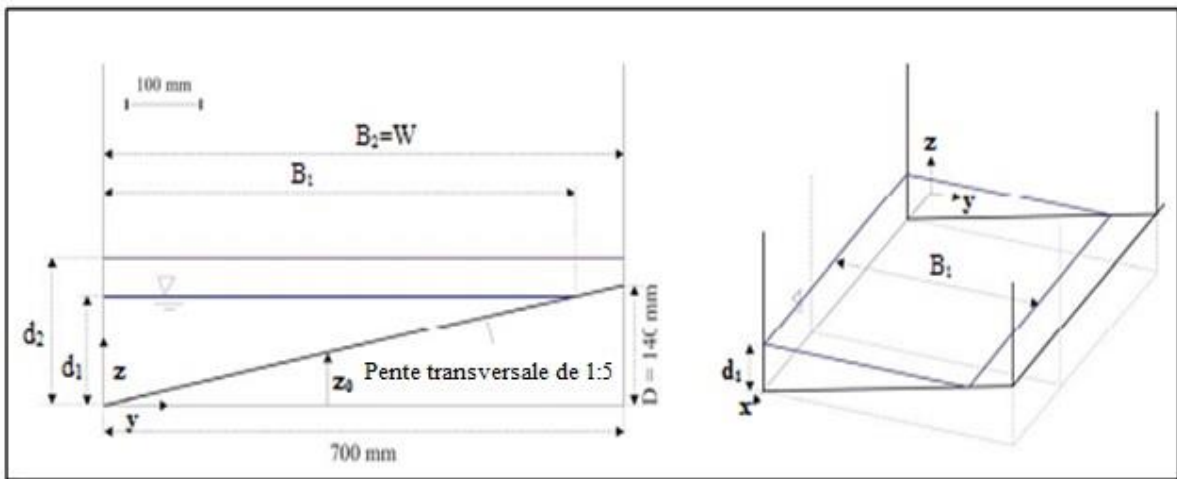


**Figure (3.11):** Modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la propagation positive du ressaut dans un canal composé prismatique ( $d_1/D < 1$ )

### II.2.2.2. Installation expérimentale:

Les expériences ont été menées dans le laboratoire d'ingénierie hydraulique avancée de l'Université du Queensland. Le canal incliné rectangulaire de 19 m de long et 0,7 m de large était équipé de parois latérales en verre de 0,52 m de hauteur. L'installation est auparavant utilisée par LENG et CHANSON (2015a, b, 2016,2017). Avec une section transversale

rectangulaire. Le lit du canal est modifié avec l'installation d'une pente transversale 1V:5H, en PVC (Fig. 2.2 et 2.3). 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'un convergent lisse tridimensionnel pour assurer une entrée régulière. Une vanne à fermeture rapide est située à l'extrémité aval du canal ( $x = 18.1$  m) et sa fermeture rapide a généré une surtension positive se propageant en amont. Ici  $x$  est la distance longitudinale depuis le début du canal. La pente du canal est constante pour toutes les expériences ( $S_o = 0,002216$ ). La figure (2.3) montre le canal en aval. Dans la suite,  $y$  est la distance transversale horizontale mesurée à partir de la paroi droite en verre et  $z$  est la distance verticale mesurée à partir du point le plus bas du canal, c'est-à-dire du côté de la paroi latérale droite (figure 2-2).



**Figure (3.12):** *Modèle de la section transversale du canal - A gauche: en regardant vers l'amont*



**Figure (3.13):** *Photographie de l'installation expérimentale en aval*

Globalement, le champ turbulent instable présentait des différences marquées par rapport aux observations dans les canaux rectangulaires. Ceci implique que les résultats quantitatifs obtenus dans les canaux rectangulaires pourraient ne pas être directement applicables aux canaux asymétriques non rectangulaires. Par exemple, pour le jet, une surtension sur les pentes de glissement des canaux trapézoïdaux artificiels; pour les courants de marée, des interactions le long des rives du fleuve dans les estuaires naturels. Dans les sections asymétriques non rectangulaires, il faut s'attendre à un mouvement secondaire transitoire important, associé à des niveaux de contrainte de cisaillement turbulents plus élevés. En outre, les résultats peuvent être directement pertinents pour la propagation de surtensions dans les voies navigables trapézoïdales artificielles et les canaux naturels de forme irrégulière en termes de modélisation numérique. Les modèles numériques classiques avec profondeur moyenne, par ex. basés sur les équations de St Venant et de Boussinesq, ne permettent pas de modéliser le mouvement turbulent tridimensionnel complexe sous les surtensions dans les canaux irréguliers. Un modèle 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).

### II.2.3. Conclusion

Ce chapitre présente les principaux travaux dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal symétrique et asymétrique.

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

Nous avons présenté les travaux de **Wanoschek et Hager (1989)** sur les caractéristiques du ressaut trapézoïdal.

Dans la deuxième partie le ressaut hydraulique évoluant dans le canal trapézoïdal asymétrique a été exposé à travers les travaux de **José Vasques Diaz(1954)** et **Hubert Chanson(2018)**.

**Deuxième Partie**

**ETUDE EXPERIMENTALE**



## **Chapitre I**

# **Étude expérimentale du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique**

### II.1.Introduction

Dans ce présent chapitre nous allons expliquer les étapes suivies dans la partie expérimentale de cette étude. Nous décrirons en premier lieu le protocole expérimental, constitué du canal trapézoïdal asymétrique, des appareils et instruments utilisés pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique. En second lieu, nous passerons à la procédure expérimentale suivie durant les essais. Nous exposerons enfin les résultats obtenus.

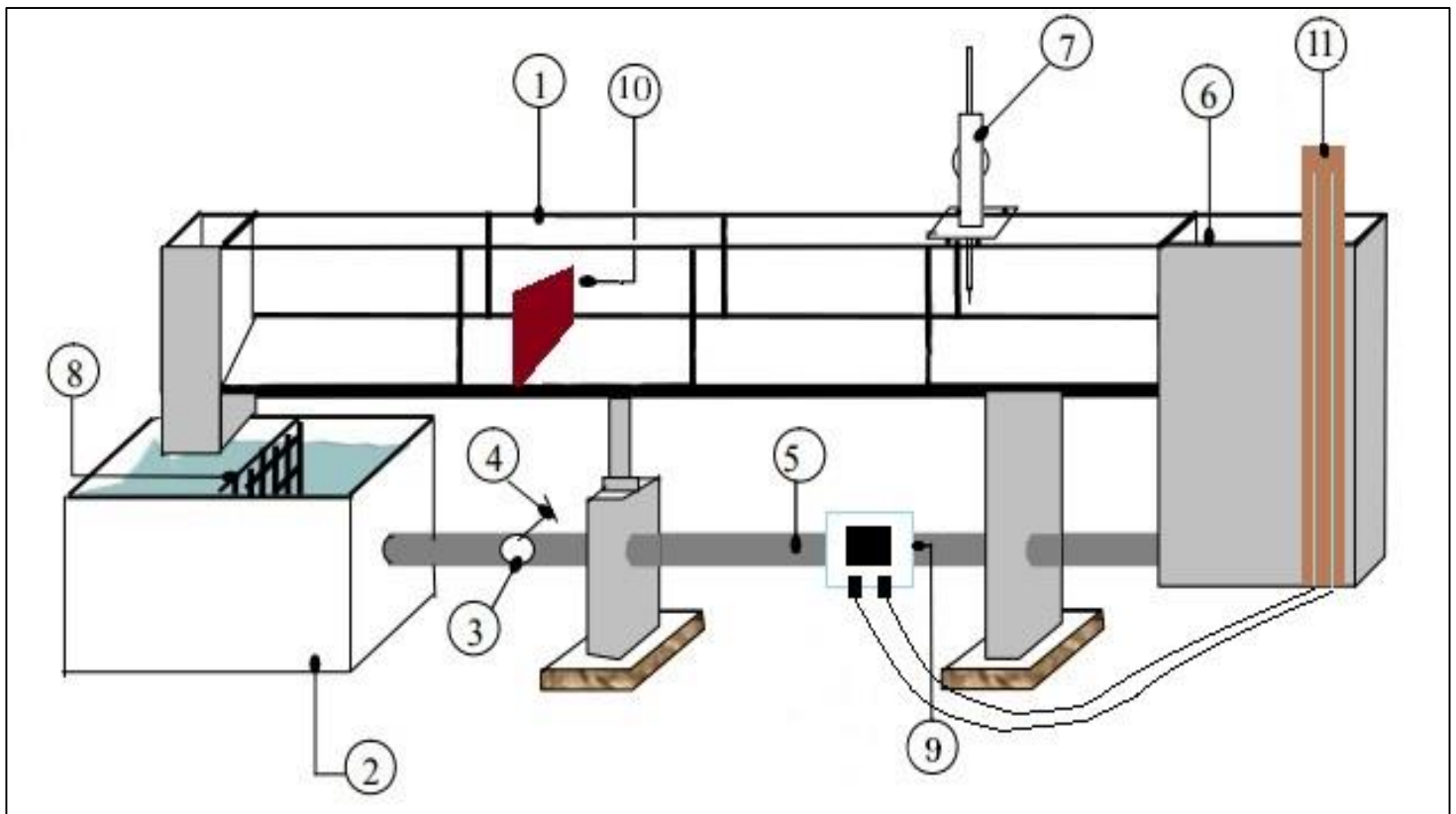
### II.2.Description du canal

La figure (1.1) représente le schéma simplifié du canal trapézoïdal asymétrique de mesure, ayant servi à l'expérimentation. Tandis que la (photographie 1.1) montre une vue d'ensemble du blanc d'essais. Ce dernier est constitué d'un canal de forme trapézoïdal asymétrique de 7 m 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.

Le canal est alimenté en circuit fermé par une pompe axiale (photographie 1.2). 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 (photographie 1.3).

Le système bassin de récupération- pompe- bassin d'alimentation est relié par une conduite circulaire en PVC d'un diamètre de 115 mm, 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 (photographie 1.4). 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).

La pompe axiale est dotée d'une vanne de réglage des débits et permet ainsi d'effectuer les essais dans une large gamme de débits. Le canal trapézoïdal asymétrique est relié, dans sa partie amont, à une boîte en charge relié à un convergent de forme triangulaire d'une hauteur d'ouverture de 8cm (photographie 1.5). Ce dernier génère un écoulement incident à grande vitesse. La hauteur de l'ouverture du convergent correspondra à la hauteur initiale  $h_1$ .



**Figure (1.1) :** *Schéma simplifié de l'ensemble du dispositif expérimental*

**1-** Parois du canal trapézoïdal asymétrique.

**3-** Pompe.

**6-** Bassin d'alimentation.

**9-** Prises de Pression.

**4-** Vanne.

**7-** Limnimètre.

**10-** Seuil.

**2-** Bassin d'accumulation (récupération).

**5-** Conduite de PVC.

**8-** Grille (tranquillisateur).

**11-** Manomètre différentiel.



**Photo (1.1) :** *Photographie du model expérimental du canal en aval.*



**Photo (1.2) :** *Pompe centrifuge axiale.*



**Photo.(1.3) :***Photographie du model expérimentale du canal.*



**Photo (1.4) :***Grille (tranquillisateur).*



**Photo (1.5) :** *Convergent triangulaire.*

Le réglage des débits volume s'effectue par une vanne (photo 1.6) et sont mesurés à l'aide d'un débitmètre à diaphragme (photo1.8). Les deux prises de pression  $p$  sortant du diaphragme sont reliées à un manomètre différentiel gradué, (photo1.7), permettant de lire la différence  $\langle \Delta h \rangle$  des cotes des deux ménisques dans les tubes manométrique.

Le canal est situé au laboratoire d'hydraulique (Bloc C) de l'université de Biskra.



**Photo (1.6) :** *Vannes de régulation de débit.*



**Photo (1.7) :** *manomètre différentiel.*

### II.3. Appareillages de mesure

#### II.3.1. Débitmètre à diaphragme

Le débitmètre à diaphragme (Photo 1.8) est un dispositif destiné à la mesure des débits par différence de pressions.



**Photo (1.8) :** *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 :

La première étape est de mesurer le débit volume par la méthode volumétrique (bassina et chronomètre), la deuxième étape et en même temps on lire la différence  $\langle \Delta h \rangle$  des cotes des deux ménisques dans les tubes manométrique, a chaque fois on augmente le débit par une



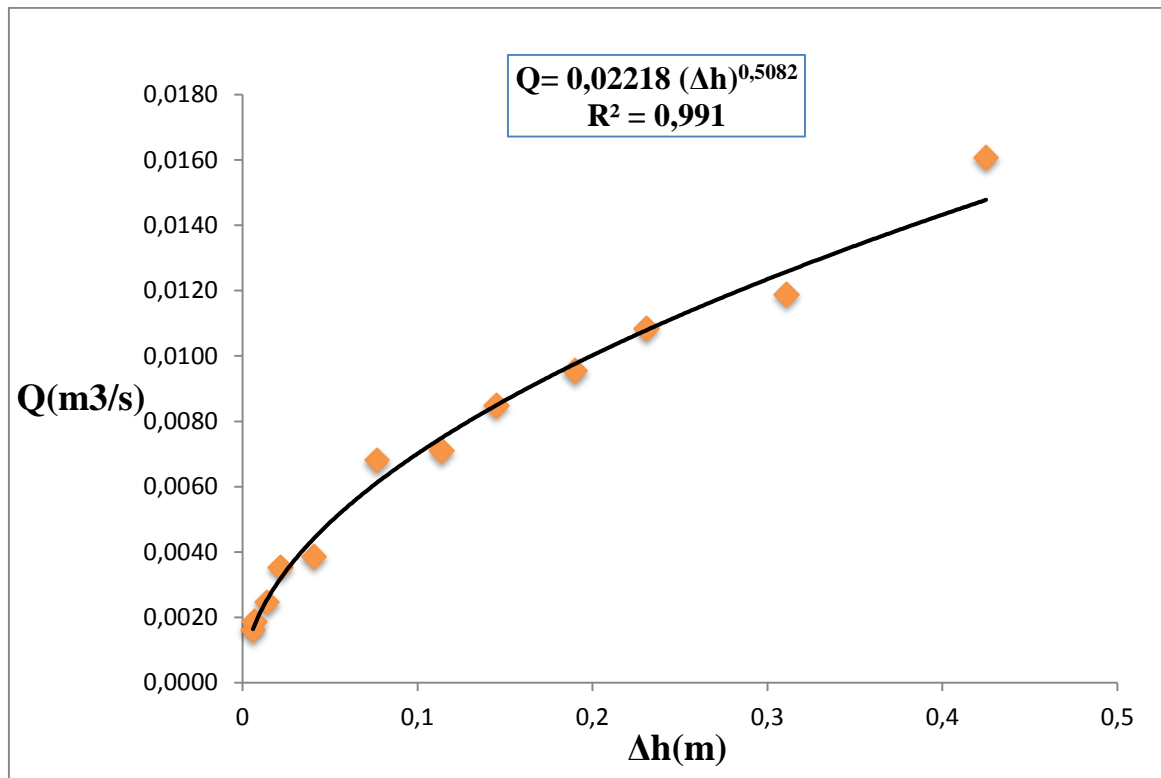
vanne et on répète le même travail. Les résultats sont organisés et détaillé dans le tableau suivant :

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

<i>Essai N<sup>o</sup></i>	$\Delta h(\text{cm})$	$\Delta h(\text{m})$	$t_{\text{moy}}(\text{s})$	$V(\text{l})$	$V(\text{m}^3)$	$Q(\text{l/s})$	$Q(\text{m}^3/\text{s})$
<b>1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,006</b>	<b>20,52</b>	<b>33</b>	<b>0,033</b>	<b>1,608</b>	<b>0,0016</b>
<b>2</b>	<b>0,7</b>	<b>0,007</b>	<b>17,66</b>	<b>33</b>	<b>0,033</b>	<b>1,869</b>	<b>0,0019</b>
<b>3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,014</b>	<b>13,41</b>	<b>33</b>	<b>0,033</b>	<b>2,461</b>	<b>0,0025</b>
<b>4</b>	<b>2,2</b>	<b>0,022</b>	<b>9,39</b>	<b>33</b>	<b>0,033</b>	<b>3,514</b>	<b>0,0035</b>
<b>5</b>	<b>4,1</b>	<b>0,041</b>	<b>8,56</b>	<b>33</b>	<b>0,033</b>	<b>3,855</b>	<b>0,0039</b>
<b>6</b>	<b>7,7</b>	<b>0,077</b>	<b>12,49</b>	<b>85</b>	<b>0,085</b>	<b>6,805</b>	<b>0,0068</b>
<b>7</b>	<b>11,4</b>	<b>0,114</b>	<b>11,99</b>	<b>85</b>	<b>0,085</b>	<b>7,089</b>	<b>0,0071</b>
<b>8</b>	<b>14,5</b>	<b>0,145</b>	<b>10,02</b>	<b>85</b>	<b>0,085</b>	<b>8,483</b>	<b>0,0085</b>
<b>9</b>	<b>19</b>	<b>0,19</b>	<b>10,48</b>	<b>100</b>	<b>0,1</b>	<b>9,542</b>	<b>0,0095</b>
<b>10</b>	<b>23,1</b>	<b>0,231</b>	<b>9,23</b>	<b>100</b>	<b>0,1</b>	<b>10,834</b>	<b>0,0108</b>
<b>11</b>	<b>31,1</b>	<b>0,311</b>	<b>8,41</b>	<b>100</b>	<b>0,1</b>	<b>11,891</b>	<b>0,0119</b>
<b>12</b>	<b>42,5</b>	<b>0,425</b>	<b>6,22</b>	<b>100</b>	<b>0,1</b>	<b>16,077</b>	<b>0,0161</b>

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  $Q = a \cdot (\Delta h)^b$ , ou  $a$  et  $b$  sont des constantes, en notant que cette dernière est théoriquement égale à 0.5 a chaque débit volume passant par diaphragme correspond une différence de cotes  $\Delta h$ . Les débits volumes  $Q$  ont été mesurés par la méthode volumétrique. Les couples des valeurs  $(Q, \Delta h)$  obtenus ont fait l'objectif d'un ajustement puissance par la méthode des moindres carrés non linéaire Figure (1.2) :



**Figure (1.2) :** courbe d'étalonnage de la variation du débit volume  $Q$  en fonction de différence des cotes  $h$  (◆) : points expérimentaux, (—) courbe d'ajustement.

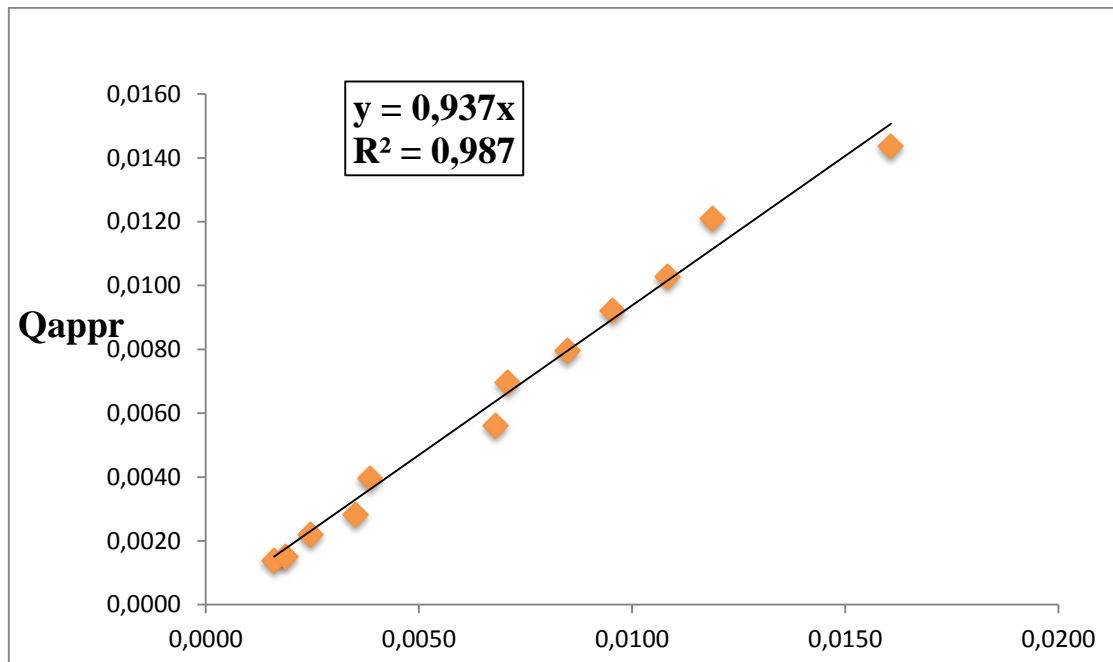
La courbe d'étalonnage issue des mesures expérimentales répond à la formule :

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

$Q$  en  $m^3/s$  et  $\Delta h$  en mètre

### II.3.1.2 Vérification de la validité de la relation (1.1)

La figure (1.3) confirme que la relation (1.1) représente un bon ajustement pour la détermination du débit volume, connaissant la différence de cotes  $\Delta h$ .



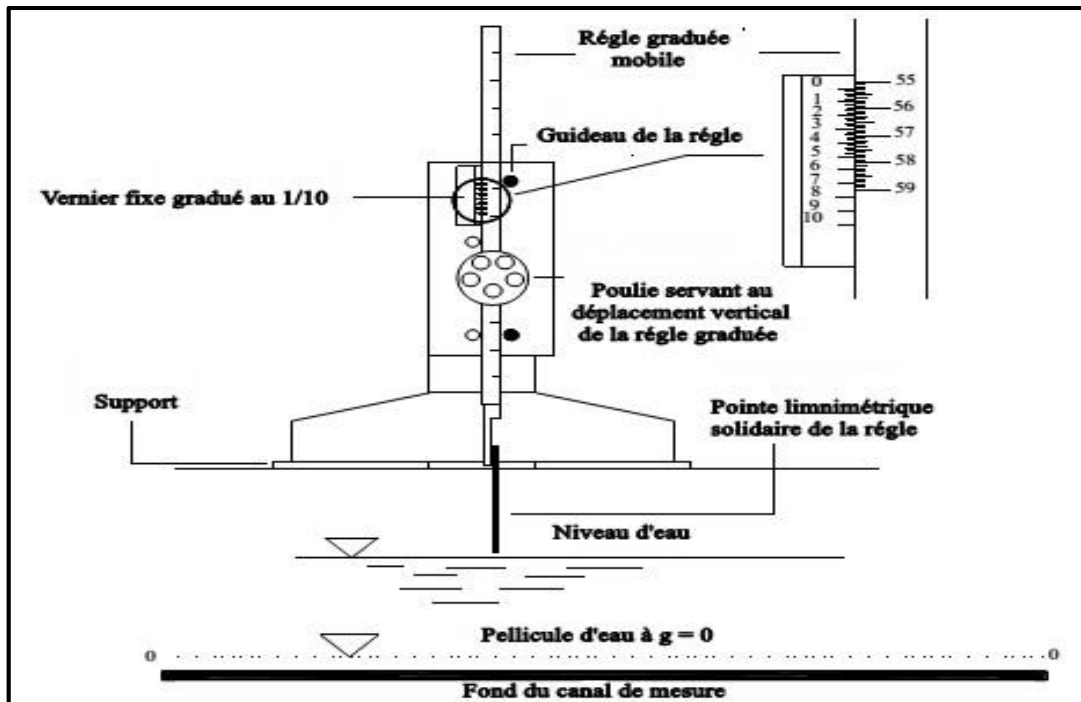
**Figure (1.3) :** courbe de la variation du débit volume  $Q_{appr}$  selon la relation (1.1) en fonction de débit volume  $Q$  expérimentale (◆ points expérimentaux, (—) première bissectrice).

### 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 (figure 1.4).

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.



Figure( 1.4) :Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique

#### II.4. Les seuils minces

Les seuils utilisés dans notre dispositif expérimental, sont façonnées de plexiglass en forme trapézoïdale (Photo 1.9).

Nous avons utilisé quatre seuil de Surface variant de  $A(01)=175,8 \text{ m}^2$ ,  $A(02) =197,775 \text{ m}^2$ ,  $A(03) =215,355 \text{ m}^2$ ,  $A(04) =227,075 \text{ m}^2$ .

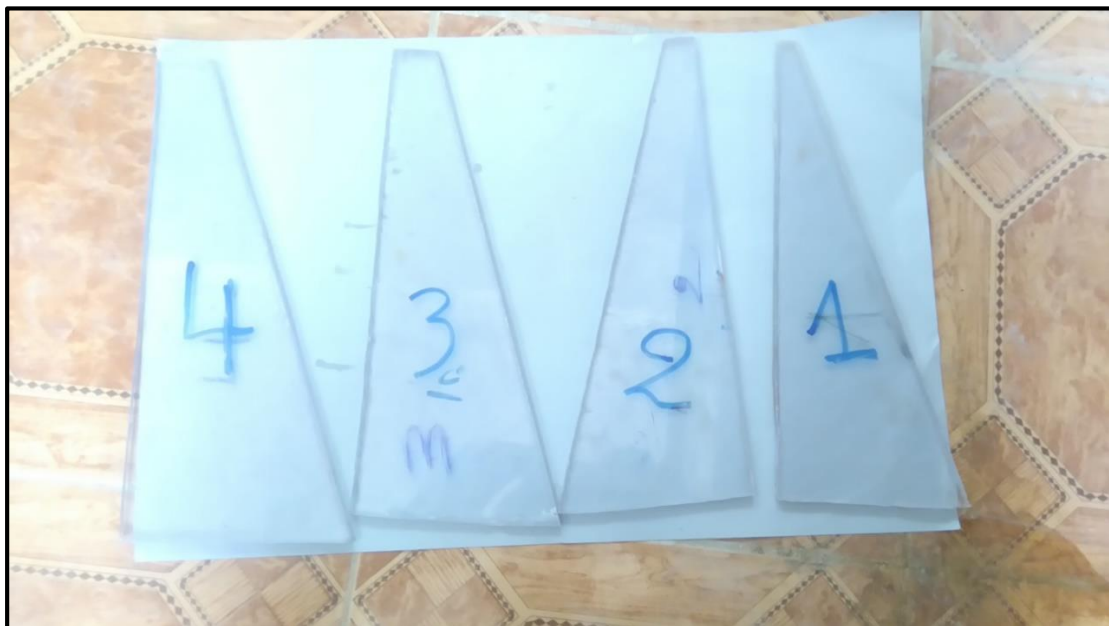


Photo (1.9) : seuils minces testés

### II.5. Description des essais :

#### II.5.1. Procédure expérimentale

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal asymétrique. Les caractéristiques étudiées sont : le débit volume  $Q$ , la hauteur initiale  $h_1$ , la hauteur finale  $h_2$ , la longueur  $L_r$  du rouleau, mesurée à la fin de la formation du ressaut et la longueur  $L_j$  du ressaut, mesurée dans le même endroit de la hauteur finale  $h_2$ .

L'expérimentation a été menée sur une hauteur initiale :  $h_1 = 80$  mm

La formation complète du ressaut a été conditionnée par la mise en place de seuil à travers de l'écoulement pour cela 4 seuils ont été confectionnés et testés, de Surface variant de  $A(01) = 175,8 \text{ m}^2$ ,  $A(02) = 197,775 \text{ m}^2$ ,  $A(03) = 215,355 \text{ m}^2$ ,  $A(04) = 227,075 \text{ m}^2$ , Dès l'obtention de la forme complète du ressaut, nous effectuerons pour chaque hauteur  $s$  et position  $x$  du pied du ressaut les étapes suivantes :

1. Mesure de la hauteur conjuguée aval  $h_2$ .de ressaut
2. Mesure la perte de charge  $\Delta H$
3. Calcule du débit volume  $Q$  par l'équation.
4. Calcule de nombre de Froude  $Fr_1$  de l'écoulement incident, par l'application de la relation :

$$Fr_1^2 = \frac{4Q^2}{(g.b^2.h_1^3)} \quad (2.1)$$

5. Mesure de la longueur  $L_r$  du rouleau.
6. Mesure de la longueur  $L_j$  du ressaut.

Pendant l'expérimentation on a remarqué que l'accroissement de nombre de Froude  $Fr_1$  entraîne un déplacement du ressaut vers l'aval ce qui provoque une augmentation de la longueur de son rouleau  $L_r$  et la longueur  $L_j$  du ressaut.

II.6. Analyse des résultats expérimentaux

II.6.1. Variation de la longueur relative  $L_r/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $Fr_1$  incident, cas du côté plus profond :

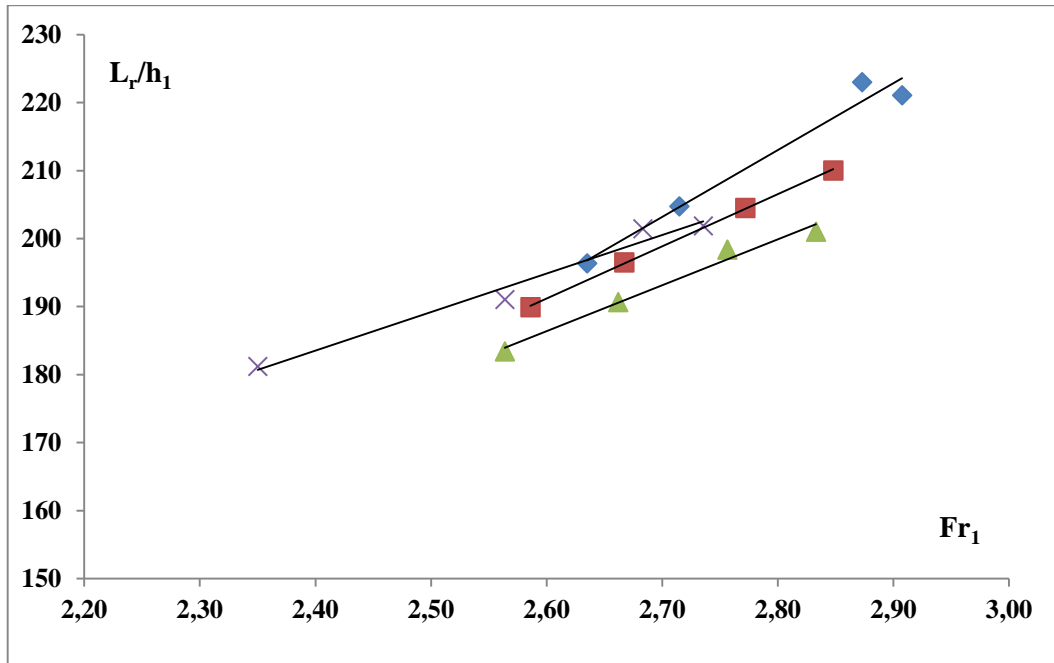


Figure (1.5) : Variation de rapport  $L_r/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $Fr_1$

(◆)  $x=6m$  ; (■)  $x=4.6m$  ; (▲)  $x=4m$  ; (✕)  $x=3m$  ;

La figure (1.5) représente quatre graphes correspondant chacun à une position ( $x$ ) du seuil, L'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à quatre relations linéaires d'équations linéaires suivantes :

$$x=6m ; L_r/h_1 = 98,279 Fr_1 - 62,131 \quad R^2 = 0,9711 \quad \text{pour } 2,635 \leq Fr_1 \leq 2,907 \quad (1.2)$$

$$x=4.6m ; L_r/h_1 = 76,663 Fr_1 - 8,1235 \quad R^2 = 0,9996 \quad \text{pour } 2,586 \leq Fr_1 \leq 2,848 \quad (1.3)$$

$$x=4m ; L_r/h_1 = 67,612 Fr_1 + 10,588 \quad R^2 = 0,9816 \quad \text{pour } 2,564 \leq Fr_1 \leq 2,833 \quad (1.4)$$

$$x=3m ; L_r/h_1 = 56,695 Fr_1 + 47,454 \quad R^2 = 0,9748 \quad \text{pour } 2,350 \leq Fr_1 \leq 2,736 \quad (1.5)$$

Pour une première interprétation du graphique, on constate que pour toutes les positions testées du seuil, le rapport de la longueur relative du rouleau  $L_r/h_1$  augmente proportionnellement avec le nombre de Froude  $Fr_1$ .

On remarque également que pour le même nombre de Froude, la valeur de la longueur relative du rouleau  $L_r/h_1$  augmente au fur et à mesure que la valeur de la position du seuil

## Chapitre I Étude expérimentale du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique

augmente, soit avec l'éloignement du seuil par rapport au début du ressaut. La position la plus proche du début du ressaut fait exception à cette loi, ceci est due probablement à la grande turbulence du rouleau et la difficulté de la mesure de ce dernier.

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la figure (1.5), sont représentés dans le tableau (1.2) :

Coté plus profonde

**Tableau (1.2) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (1.5)**

$Fr_1$	$Lr/h_1$	$Fr_1$	$Lr/h_1$	$Fr_1$	$Lr/h_1$	$Fr_1$	$Lr/h_1$
2,635	196,395	2,586	189,944	2,564	183,426	2,350	181,214
2,715	204,753	2,667	196,527	2,662	190,693	2,564	191,042
2,873	223,035	2,772	204,506	2,756	198,384	2,683	201,439
2,907	221,106	2,848	210,049	2,833	201,040	2,736	201,906

**Tableau (1.3) : coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de relation liants  $Lr/h_1$  au nombre de Froude  $Fr_1$  pour différents position  $x$  du seuil.**

Position de seuil X	coefficient a	coefficient b	coefficient de corrélation R2
3	56,695	47,454	0,975
4	67,612	10,588	0,982
4,6	76,663	-8,1235	0,9996
6	98,279	-62,131	0,971

La figure (1.6) mont que les points expérimental s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$a = 14,017x + 13,137 \quad R^2 = 0,9927 \quad \text{pour } 3 \leq X \leq 6 \quad (1.6)$$

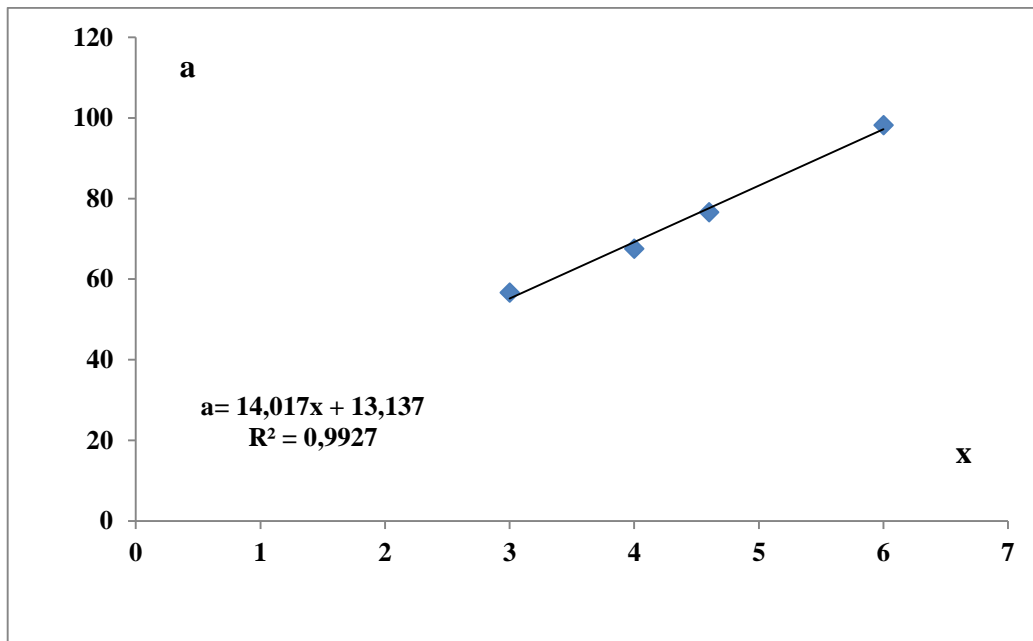


Figure (1.6) : Variation du coefficient (a) en fonction de la position x du seuil (—) courbe d'ajustement

La figure (1.6) montre que les points expérimentaux s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$b = -36,378x + 157,01 \quad R^2 = 0,9989 \quad \text{pour } 3 \leq X \leq 6 \quad (1.7)$$

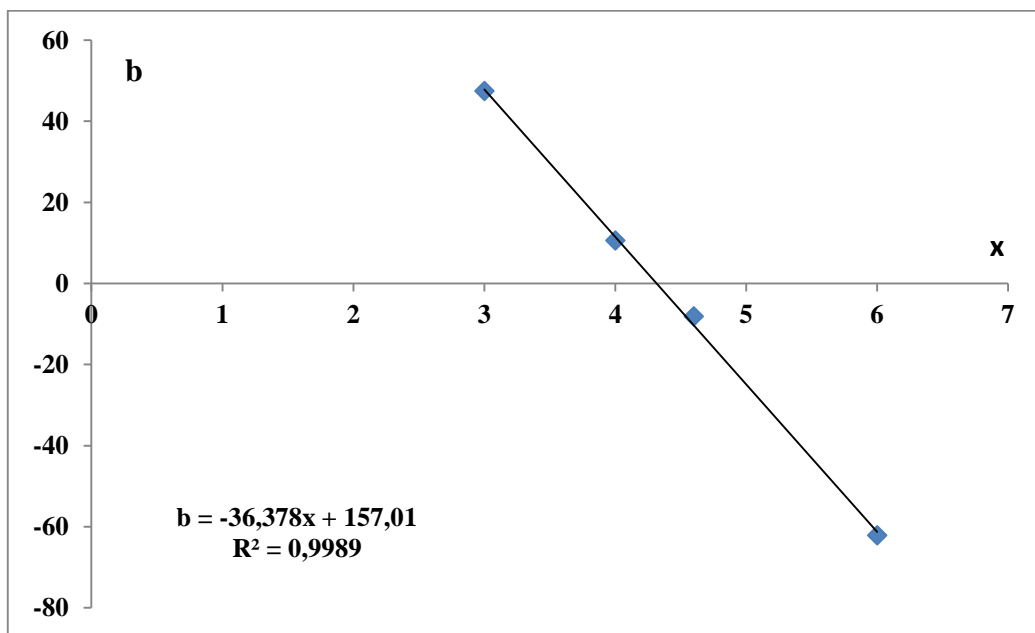


Figure (1.7) : Variation du coefficient (b) en fonction de la position x du seuil (—) courbe d'ajustement

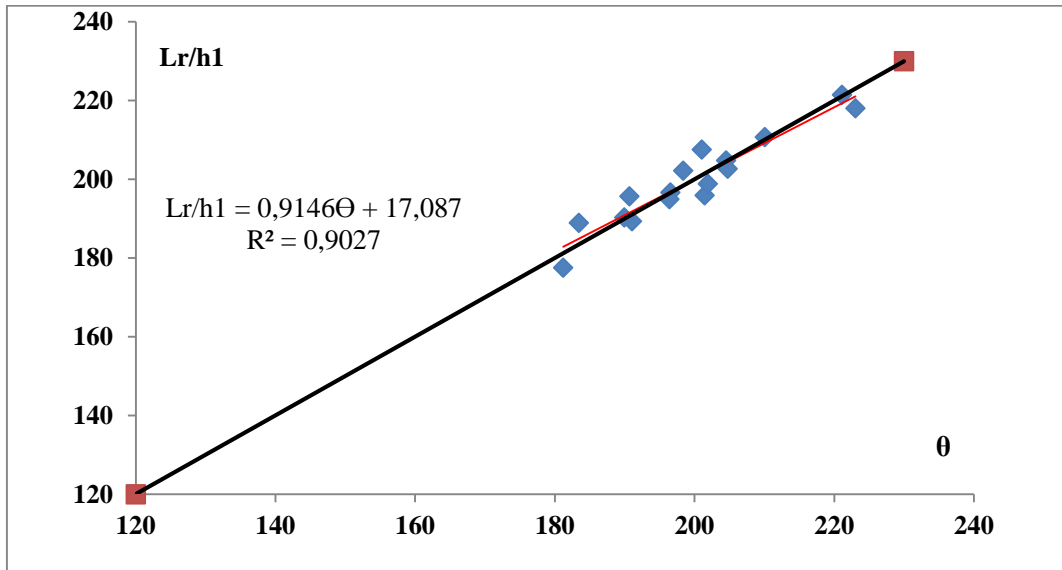


La relation linéaire traduisant la variation de  $Lr/h_1$  en fonction de  $Fr_1$  et de la position  $x$  du seuil, est la suivant :

$$\theta = (14,017x + 13,137)Fr_1 + (-36,378x + 157,01) \quad (1.8)$$

Pour une gamme du nombre de Froude  $2,350 \leq Fr_1 \leq 2,907$

La représentation graphique du rapport  $\lambda_r = (Lr/h_1)_{exp}$  en fonction de  $\theta = (\lambda_r)_{appr}$  est indiquée sur la figure (1.7).



**Figure (1.8) : Variation du rapport  $\lambda_r = (Lr/h_1)_{exp}$  en fonction de**

$$\theta = (\lambda_r)_{appr} = (14,017x + 13,137)Fr_1 + (-36,378x + 157,01)$$

(—) première bissectrice. (—) droite d'ajustement d'équation  $Lr/h_1 = 0,9146\theta + 17,087$

D'après la figure (1.6) on remarque que le nuage de points représentant la variation du rapport  $\lambda_r = (Lr/h_1)_{exp}$  en fonction de  $\theta = (\lambda_r)_{appr}$  tourne au tour de la première bissectrice, ce qui confirme la validité de la relation généralisée :

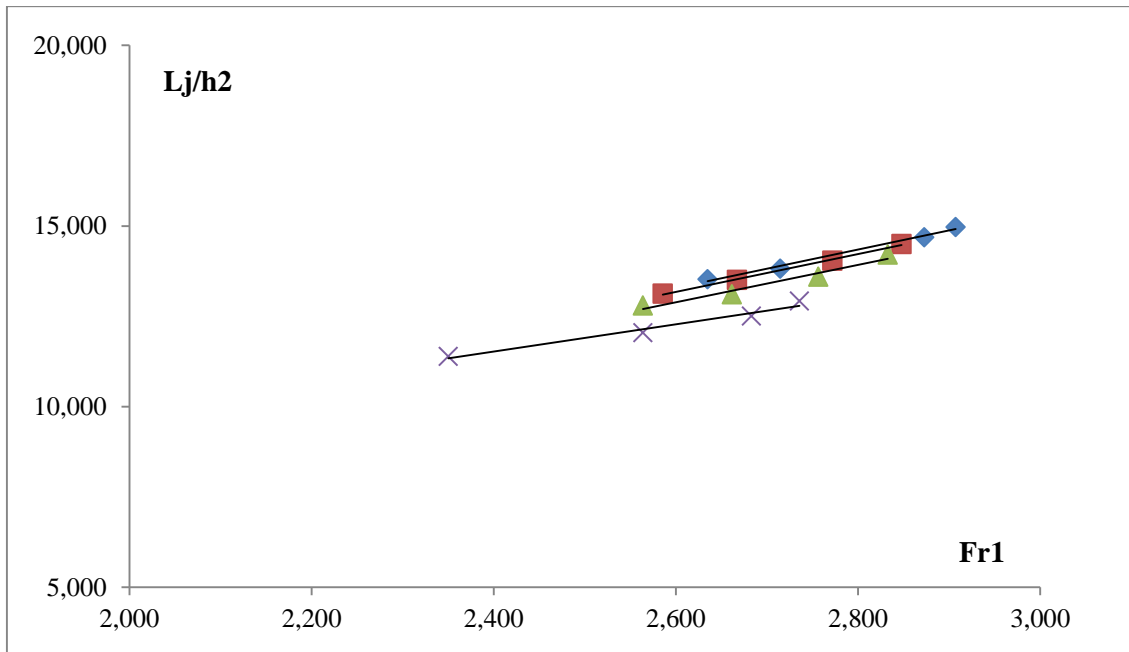
$$\theta = (14,017x + 13,137)Fr_1 + (-36,378x + 157,01)$$

L'erreur  $\Delta\lambda_r$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $\lambda_r = (Lr/h_1)_{exp}$  et la fonction  $\theta$  est donnée par le tableau suivant :

*Tableau (1.4) : L'erreur  $\Delta\lambda_r$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $\lambda_r=(L_r/h_1)_{exp}$  et la fonction  $\theta$*

<b>Fr<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>r</sub>/h<sub>1</sub></b>	<b>θ</b>	<b><math>\Delta\lambda_r=(\lambda_r-\theta)/\lambda_r</math> (%)</b>
2,350	181,214	177,565	0,020
2,564	191,042	189,362	0,009
2,683	201,439	195,945	0,027
2,736	201,906	198,846	0,015
2,564	183,426	188,920	0,030
2,662	190,693	195,701	0,026
2,756	198,384	202,248	0,019
2,833	201,040	207,543	0,032
2,586	189,944	190,368	0,002
2,667	196,527	196,674	0,001
2,772	204,506	204,803	0,001
2,848	210,049	210,710	0,003
2,635	196,395	194,951	0,007
2,715	204,753	202,712	0,010
2,873	223,035	218,091	0,022
2,907	221,106	221,452	0,002

**II.6.2. Variation de la longueur relative  $L_j/h_2$  en fonction du nombre de Froude  $Fr_1$  incident; cas du coté plus profond :**



**Figure (1.9) :** Variation de rapport  $L_j/h_2$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $Fr_1$

(♦  $x=6m$  ; (■)  $x=4.6m$  ; (▲)  $x=4m$  ; (✕)  $x=3m$  ;

La figure (1.9) représente quatre graphes correspondant chacun à une position ( $x$ ) du seuil, L'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à quatre relations linéaires d'équations linéaires suivantes :

$$x=6m ; L_j/h_2= 5,3006Fr_1 - 0,498 \quad R^2 = 0,9895 \text{ pour } 2,635 \leq Fr_1 \leq 2,907 \quad (1.9)$$

$$x=4.6m ; L_j/h_2= 5,2202Fr_1 - 0,3953 \quad R^2 = 0,9972 \text{ pour } 2,586 \leq Fr_1 \leq 2,848 \quad (1.10)$$

$$x=4m ; L_j/h_2= 5,1565Fr_1 - 0,5146 \quad R^2 = 0,9631 \text{ pour } 2,564 \leq Fr_1 \leq 2,833 \quad (1.11)$$

$$x=3m ; L_j/h_2= 3.7815Fr_1 + 2.4479 \quad R^2 = 0,9704 \quad \text{pour } 2,350 \leq Fr_1 \leq 2,736 \quad (1.12)$$

On constate que pour toutes les positions testées du seuil, le rapport de la longueur relative du rouleau  $L_j/h_2$  augmente proportionnellement avec le nombre de Froude  $Fr_1$ .

On remarque également que pour le même nombre de Froude, la valeur de la longueur relative du ressaut  $L_j/h_2$  augmente au fur et à mesure que la valeur de la position du seuil augmente, soit avec l'éloignement du seuil par rapport au début du ressaut.

## Chapitre I Étude expérimentale du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la figure (1.9), sont représentés dans le tableau (1.5) :

Coté plus profonde

**Tableau (1.5) :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (1.9)

<b>Fr<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>j</sub>/h<sub>2</sub></b>	<b>Fr<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>j</sub>/h<sub>2</sub></b>	<b>Fr<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>j</sub>/h<sub>2</sub></b>	<b>Fr<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>j</sub>/h<sub>2</sub></b>
2,635	13,528	2,586	13,128	2,564	12,797	2,350	11,390
2,715	13,815	2,667	13,505	2,662	13,113	2,564	12,044
2,873	14,686	2,772	14,041	2,756	13,592	2,683	12,503
2,907	14,974	2,848	14,501	2,833	14,204	2,736	12,925

*Tableau (1.6) :* coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de relation liants L<sub>j</sub>/h<sub>2</sub> au nombre de Froude Fr<sub>1</sub> pour différents position x du seuil.

<b>Position de seuil X</b>	<b>coefficient a</b>	<b>Coefficient b</b>	<b>coefficient de corrélation R<sup>2</sup></b>
3	3,782	2,448	0,968
4	5,157	-0,515	0,963
4,6	5,220	-0,395	0,997
6	5,301	-0,498	0,990

La figure (1.10) mont que les points expérimental s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$a = 0,9101x + 0,4806 \quad R^2 = 0,5925 \text{ pour } 3 \leq X \leq 6 \quad (1.13)$$

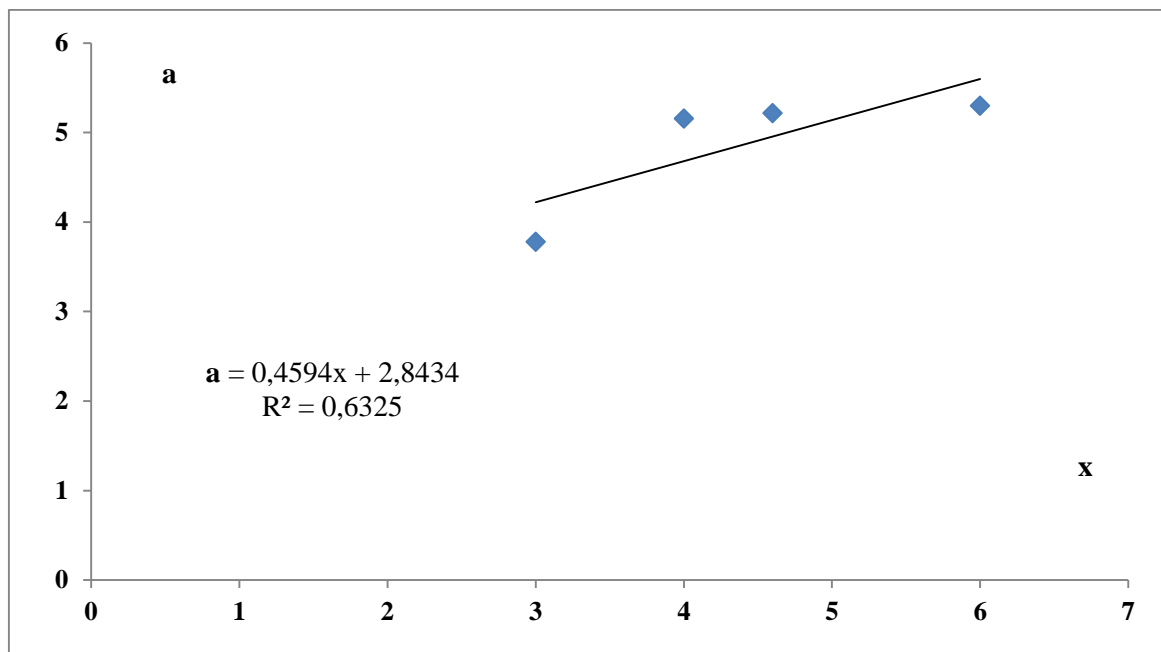


Figure (1.10) : Variation du coefficient ( $a$ ) en fonction de la position  $x$  du seuil .

(—) courbe d'ajustement

La figure (1.11) montre que les points expérimentaux s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$b = -2,0006x + 10,017 \quad R^2 = 0,5551 \text{ pour } 3 \leq X \leq 6 \quad (1.14)$$

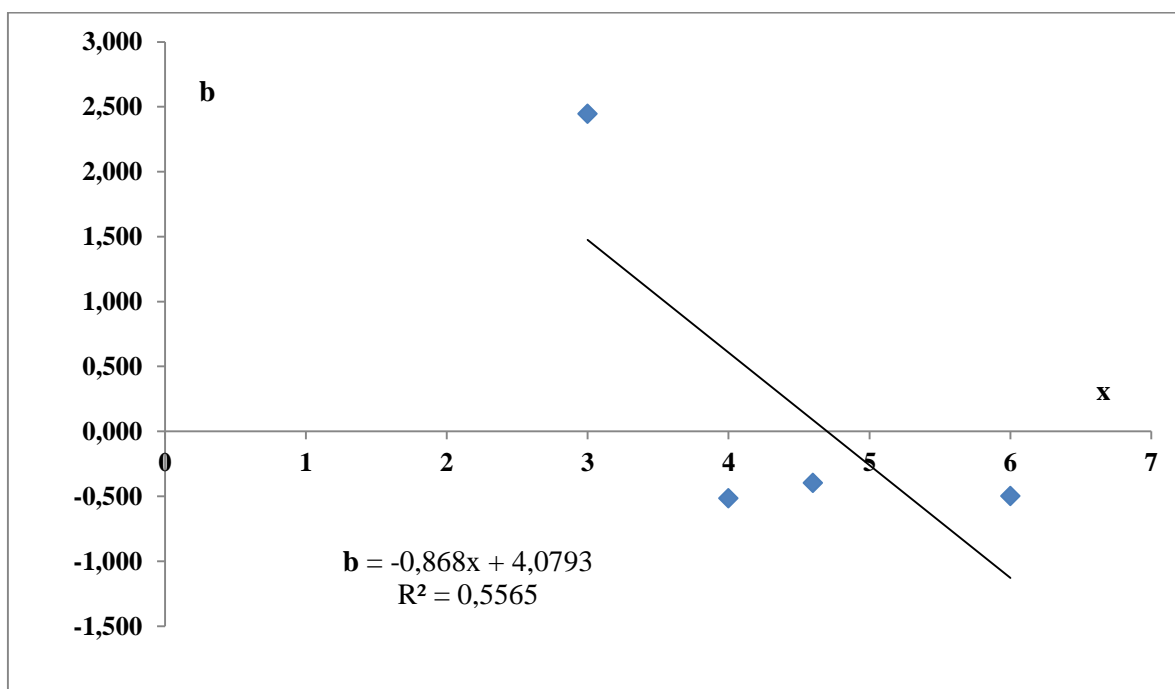


Figure (1.11) : Variation du coefficient ( $b$ ) en fonction de la position  $x$  du seuil.

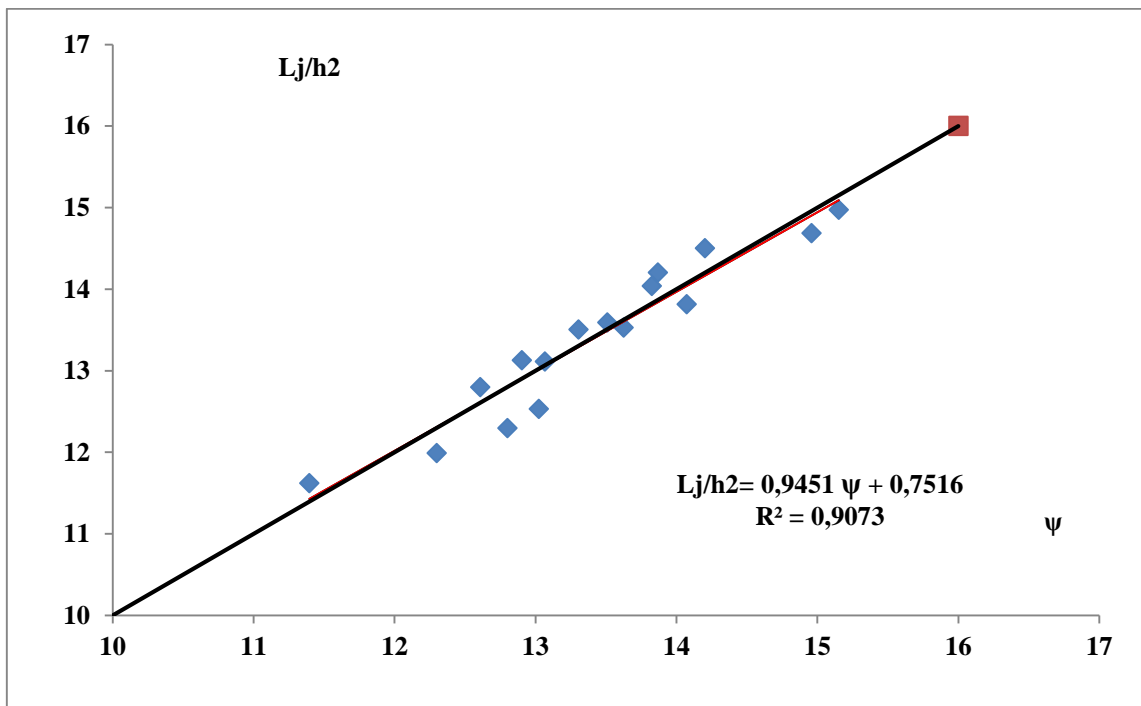
(—) courbe d'ajustement

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

$$\psi = (0.4594x + 2.8434)Fr_1 + (-868x + 4.0793) \tag{1.15}$$

Pour une gamme du nombre de Froude  $2,350 \leq Fr_1 \leq 2,907$

La représentation graphique du rapport  $\lambda_j = (L_j/h_2)_{exp}$  en fonction de  $\psi = (\lambda_j)_{appr}$  est indiquée sur la figure (1.12).



**Figure (1.12) : Variation de rapport  $\lambda_j = (L_j/h_2)_{exp}$  en fonction de**

$$\psi = (\lambda_j)_{appr} = (0.4594x + 2.8434)Fr_1 + (-868x + 4.0793)$$

(—) première bissectrice (—) droite d'ajustement d'équation  $L_j/h_2 = 0.9451\psi + 0.7516$

D'après la figure (1.12) on remarque que le nuage de points représentant la variation du rapport  $\lambda_j = (L_j/h_2)_{exp}$  en fonction de  $\psi = (\lambda_j)_{appr}$  tourne au tour de la première bissectrice qui confirme la validité de la relation généralisé :

$$\psi = (0.4594x + 2.8434)Fr_1 + (-868x + 4.0793)$$

L'erreur  $\Delta\lambda_j$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $\lambda_j = (L_j/h_2)_{exp}$  et la fonction  $\psi$  est donnée par le tableau suivant :

*Tableau (1.7) : L'erreur  $\Delta\lambda_j$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $\lambda_j=(L_j/h_2)_{exp}$  et la fonction  $\psi$*

<b>Fr<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>j</sub>/h<sub>2</sub></b>	<b><math>\psi</math></b>	<b><math>\Delta\lambda_j=(L_j/h_2-\psi)/L_j/h_2</math> (%)</b>
2,350	11,62	11,40	0,02
2,564	11,99	12,30	0,03
2,683	12,29	12,80	0,04
2,736	12,53	13,02	0,04
2,564	12,80	12,61	0,01
2,662	13,11	13,07	0,00
2,756	13,59	13,51	0,01
2,833	14,20	13,87	0,02
2,586	13,13	12,90	0,02
2,667	13,51	13,31	0,01
2,772	14,04	13,83	0,02
2,848	14,50	14,20	0,02
2,635	13,53	13,63	0,01
2,715	13,82	14,07	0,02
2,873	14,69	14,96	0,02
2,907	14,97	15,15	0,01

II.6.3. Variation du profil de surface  $Y=f(x)$  du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique; Cas du coté plus profond.

II.6.3.a. Position  $x=03$  m :

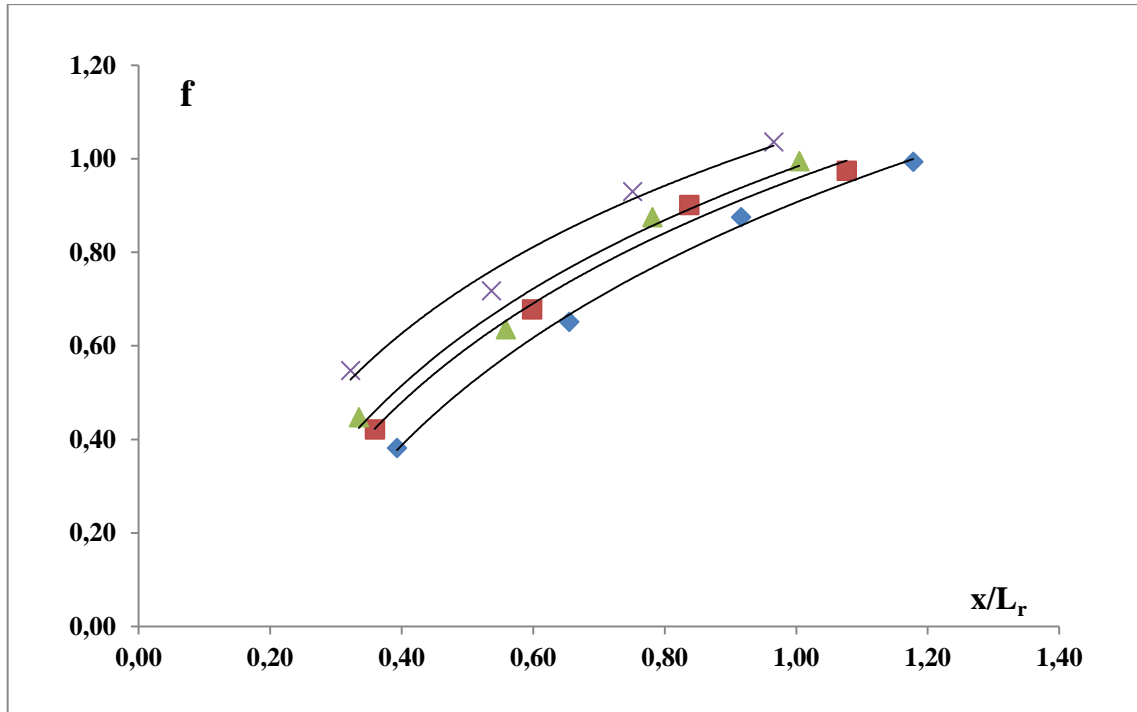


Figure (1.13) : Variation du profil de surface  $f=h(x)$  du ressaut pour quatre seuil

A01 (◆); A02(■); A03(▲); A04(✕)

La figure (1.13) représente quatre nuages de points correspondant à la variation du profil de surface  $Y=f(x)$  du ressaut, chacun pour une surface du seuil donnée, L'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à quatre relations d'équations logarithmiques suivantes :

$$A(01)=175,8 \text{ m}^2; \quad f= 0,4555 \ln (x/L_r) + 1,044 \quad R^2 = 0,9824 \quad (1.16)$$

$$A(02)=197.775 \text{ m}^2; \quad f= 0,5102 \ln (x/L_r) + 0,9827 \quad R^2 = 0,981 \quad (1.17)$$

$$A(03)=215.355 \text{ m}^2; \quad f= 0,5221 \ln (x/L_r) + 0,9577 \quad R^2 = 0,9895 \quad (1.18)$$

$$A(04)=227.075 \text{ m}^2; \quad f=0,5667 \ln(x/L_r) + 0,9068 \quad R^2 = 0,9972 \quad (1.19)$$

On remarque que pour tous les seuils, la quantité adimensionnelle  $f = \frac{h-h_x}{h_2-h_1}$  augmente avec la croissance du rapport  $x/L_r$ .

Cependant, on constate que pour une valeur égale du nombre de Froude  $F_1$ ,  $f = \frac{h-h_x}{h_2-h_1}$  augmente avec la croissance de la surface des seuils



Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la figure (1.13), sont représentés dans le tableau (1.8) :

*Tableau (1.8) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (1.13)*

<b>X/Lr</b>	<b>f</b>	<b>X/Lr</b>	<b>f</b>	<b>X/Lr</b>	<b>f</b>	<b>X/Lr</b>	<b>f</b>
<b>0,393</b>	<b>0,381</b>	<b>0,359</b>	<b>0,421</b>	<b>0,335</b>	<b>0,447</b>	<b>0,322</b>	<b>0,547</b>
<b>0,654</b>	<b>0,651</b>	<b>0,598</b>	<b>0,677</b>	<b>0,558</b>	<b>0,635</b>	<b>0,536</b>	<b>0,718</b>
<b>0,916</b>	<b>0,875</b>	<b>0,837</b>	<b>0,901</b>	<b>0,781</b>	<b>0,875</b>	<b>0,751</b>	<b>0,930</b>
<b>1,178</b>	<b>0,993</b>	<b>1,077</b>	<b>0,974</b>	<b>1,004</b>	<b>0,994</b>	<b>0,966</b>	<b>1,036</b>

*Tableau (1.9) : coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement des relations liant Y a x/Lr pour les différents seuils testés.*

<b>Surface du seuil A</b>	<b>coefficient a</b>	<b>coefficient b</b>	<b>coefficient de corrélacion R<sup>2</sup></b>
<b>A(01) =175,8</b>	<b>0,5667</b>	<b>0,9068</b>	<b>0,997</b>
<b>A(02) =197,775</b>	<b>0,5221</b>	<b>0,9577</b>	<b>0,9895</b>
<b>A(03) =215,355</b>	<b>0,5102</b>	<b>0,9827</b>	<b>0,981</b>
<b>A(04) =227,075</b>	<b>0,4555</b>	<b>1,044</b>	<b>0,9824</b>

La figure (1.14) mont que les points expérimental s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$a = -0,002A + 0,9133 \quad R^2 = 0,9141 \quad (1.20)$$

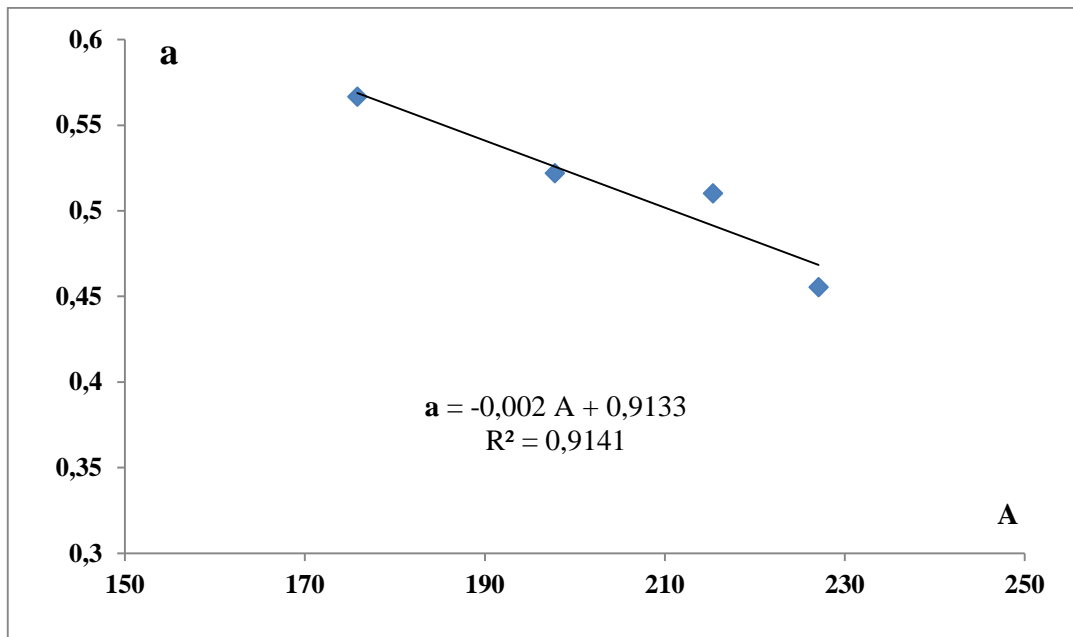


Figure (1.14) : Variation du coefficient (a) en fonction de la surface du seuil (S).

(—) courbe d'ajustement

La figure (1.15) montre que les points expérimentaux s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$b = 0,0025A + 0,4666 \quad R^2 = 0,9442 \quad (1.21)$$

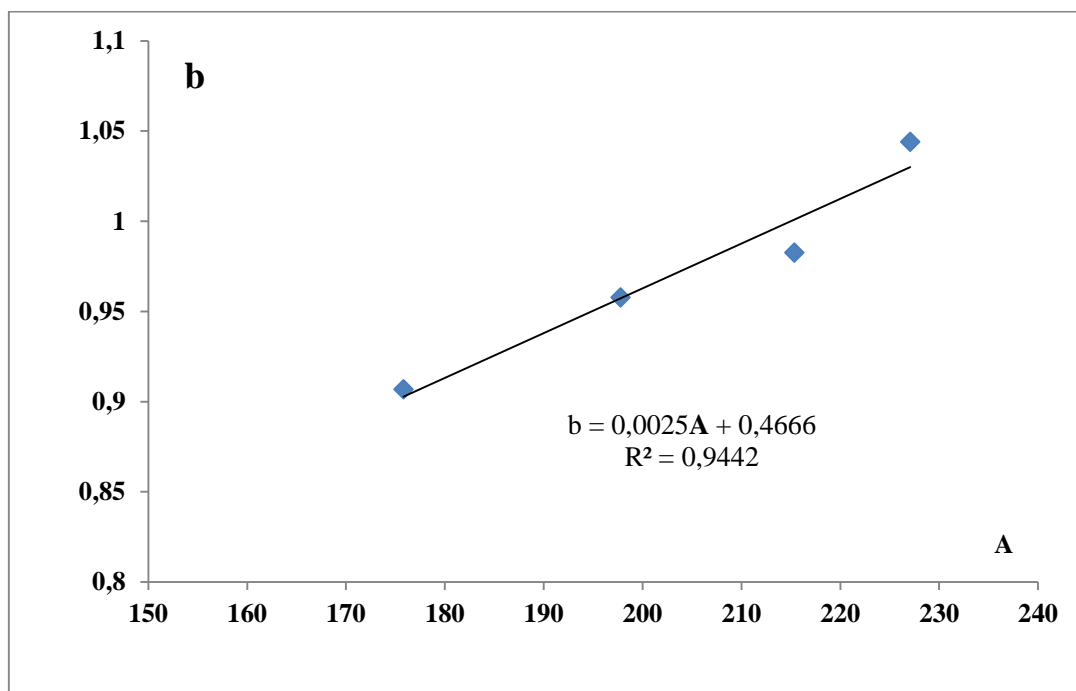


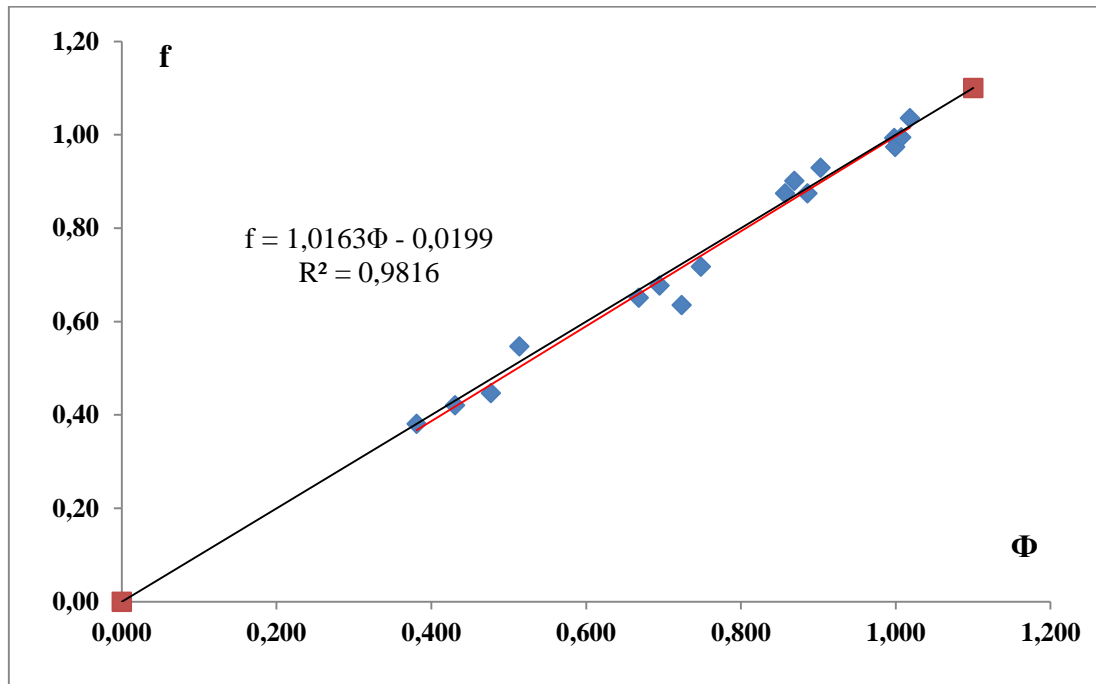
Figure (1.15) : Variation du coefficient (b) en fonction de la surface du seuil (A).

(—) courbe d'ajustement

La relation linéaire traduisant la variation de  $f$  en fonction de  $x/Lr$  et de la surface du seuil, est la suivant :

$$\Phi = (-0,002 A + 0,9133)x/Lr + (0,0025 A + 0,4666) \quad (1.21)$$

La représentation graphique de  $f_{exp}$  en fonction de  $\Phi = (f)_{appr}$  est indiquée sur la figure (1.16).



*Figure (1.16) : Variation de  $f_{exp}$  en fonction de*

$$\Phi = (f)_{appr} = (-0,002 A + 0,9133)x/Lr + (0,0025 A + 0,4666)$$

(—) première bissectrice, (—) droite d'ajustement d'équation  $Y = 1.0163\Phi - 0.0199$

D'après la figure (1.16) on remarque que le nuage de points représentant la variation du  $(f)_{exp}$  en fonction de  $\Phi = f_{appr}$  tourne autour de la première bissectrice, ce qui confirme la validité de la relation généralisée :

$$\Phi = (-0,002 A + 0,9133)x/Lr + (0,0025 A + 0,4666)$$

L'erreur  $\Delta f$  entre les résultats expérimentaux du  $(f)_{exp}$  et la fonction  $\Phi$  est donnée par le tableau suivant :

*Tableau (1.10) : L'erreur  $\Delta f$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $(f)_{exp}$  et la fonction  $\Phi$* 

<b>x/Lr</b>	<b>f</b>	<b><math>\Phi</math></b>	<b><math>\Delta f=(f-\Phi)/f</math> (%)</b>
<b>0,393</b>	<b>0,381</b>	<b>0,381</b>	<b>0,001</b>
<b>0,654</b>	<b>0,651</b>	<b>0,668</b>	<b>0,026</b>
<b>0,916</b>	<b>0,875</b>	<b>0,857</b>	<b>0,021</b>
<b>1,178</b>	<b>0,993</b>	<b>0,998</b>	<b>0,005</b>
<b>0,359</b>	<b>0,421</b>	<b>0,430</b>	<b>0,023</b>
<b>0,598</b>	<b>0,677</b>	<b>0,695</b>	<b>0,026</b>
<b>0,837</b>	<b>0,901</b>	<b>0,869</b>	<b>0,036</b>
<b>1,077</b>	<b>0,974</b>	<b>0,999</b>	<b>0,026</b>
<b>0,335</b>	<b>0,447</b>	<b>0,477</b>	<b>0,067</b>
<b>0,558</b>	<b>0,635</b>	<b>0,723</b>	<b>0,139</b>
<b>0,781</b>	<b>0,875</b>	<b>0,886</b>	<b>0,013</b>
<b>1,004</b>	<b>0,994</b>	<b>1,007</b>	<b>0,013</b>
<b>0,322</b>	<b>0,547</b>	<b>0,514</b>	<b>0,060</b>
<b>0,536</b>	<b>0,718</b>	<b>0,748</b>	<b>0,043</b>
<b>0,751</b>	<b>0,930</b>	<b>0,903</b>	<b>0,029</b>
<b>0,966</b>	<b>1,036</b>	<b>1,018</b>	<b>0,017</b>

II.6.3.b. Position  $x=04$  m :

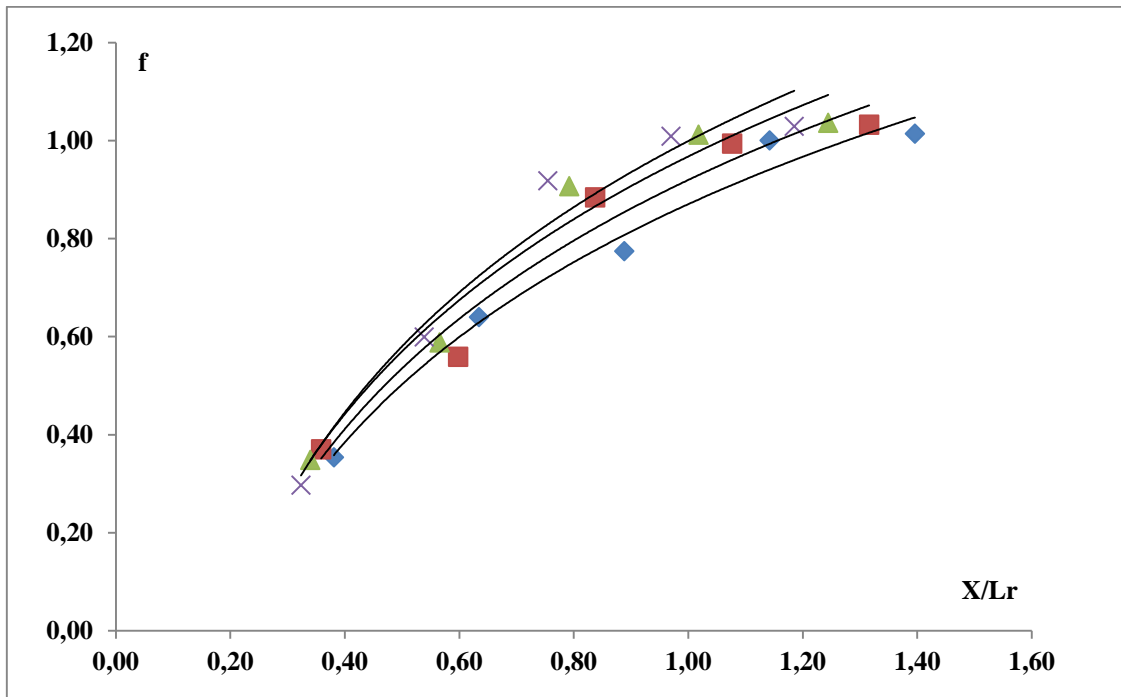


Figure (1.17) : Variation de la du profil de surface  $f=h(x)$  du ressaut pour quatre seuil

A01(♦) ; A02(■) ; A03(▲) ; A04(✕)

La figure (1.17) représente quatre nuages de points correspondant à la variation du profil de surface  $f=h(x)$  du ressaut, chacun pour une surface du seuil donnée, L'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à quatre relation d'équations logarithmiques suivantes :

$$A(01)=175,8 \text{ m}^2 ; \quad f = 0,5303 \ln(x/Lr) + 0,8703 \quad R^2 = 0,9806 \quad (1.22)$$

$$A(02)=197.775 \text{ m}^2 ; \quad f = 0,5544 \ln(x/Lr) + 0,9197 \quad R^2 = 0,9621 \quad (1.23)$$

$$A(03)=215.355 \text{ m}^2 ; \quad f = 0,5736 \ln(x/Lr) + 0,9676 \quad R^2 = 0,9653 \quad (1.24)$$

$$A(04)=227.075 \text{ m}^2 ; \quad f = 0,6041 \ln(x/Lr) + 0,999 \quad R^2 = 0,9618 \quad (1.25)$$

On remarque que pour tous les seuils, la valeur la quantité adimensionnelle  $f = \frac{h-h_x}{h_2-h_1}$  augmente avec la croissance du rapport  $x/Lr$ .

Cependant, on constate que pour une valeur égale du nombre de Froude  $F_1$ ,  $f = \frac{h-h_x}{h_2-h_1}$  augmente avec la croissance de la surface des seuils

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la figure (1.17), sont représentés dans le tableau (1.11) :

*Tableau (1.11) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (1.17)*

<b>X/Lr</b>	<b>f</b>	<b>X/Lr</b>	<b>f</b>	<b>X/Lr</b>	<b>f</b>	<b>X/Lr</b>	<b>f</b>
<b>0,381</b>	<b>0,354</b>	<b>0,359</b>	<b>0,370</b>	<b>0,339</b>	<b>0,349</b>	<b>0,323</b>	<b>0,297</b>
<b>0,635</b>	<b>0,640</b>	<b>0,598</b>	<b>0,559</b>	<b>0,566</b>	<b>0,589</b>	<b>0,539</b>	<b>0,599</b>
<b>0,888</b>	<b>0,775</b>	<b>0,837</b>	<b>0,884</b>	<b>0,792</b>	<b>0,907</b>	<b>0,754</b>	<b>0,919</b>
<b>1,142</b>	<b>1,000</b>	<b>1,077</b>	<b>0,994</b>	<b>1,018</b>	<b>1,012</b>	<b>0,970</b>	<b>1,009</b>
<b>1,396</b>	<b>1,014</b>	<b>1,316</b>	<b>1,032</b>	<b>1,244</b>	<b>1,037</b>	<b>1,185</b>	<b>1,029</b>

*Tableau (1.12) : coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement des relations liants  $f$  à  $x/Lr$  pour différents seuil.*

<b>Surface de seuil A</b>	<b>coefficient a</b>	<b>coefficient b</b>	<b>coefficient de corrélacion R<sup>2</sup></b>
<b>A(01) =175,8</b>	<b>0,5303</b>	<b>0,8703</b>	<b>0,981</b>
<b>A(02) =197,775</b>	<b>0,5544</b>	<b>0,9197</b>	<b>0,962</b>
<b>A(03) =215,355</b>	<b>0,5736</b>	<b>0,9676</b>	<b>0,9653</b>
<b>A(04) =227,075</b>	<b>0,6041</b>	<b>0,999</b>	<b>0,962</b>

La figure (1.18) mont que les points expérimental s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$a = 0.0014A + 0,2867 \quad R^2 = 0,9579 \quad (1.26)$$

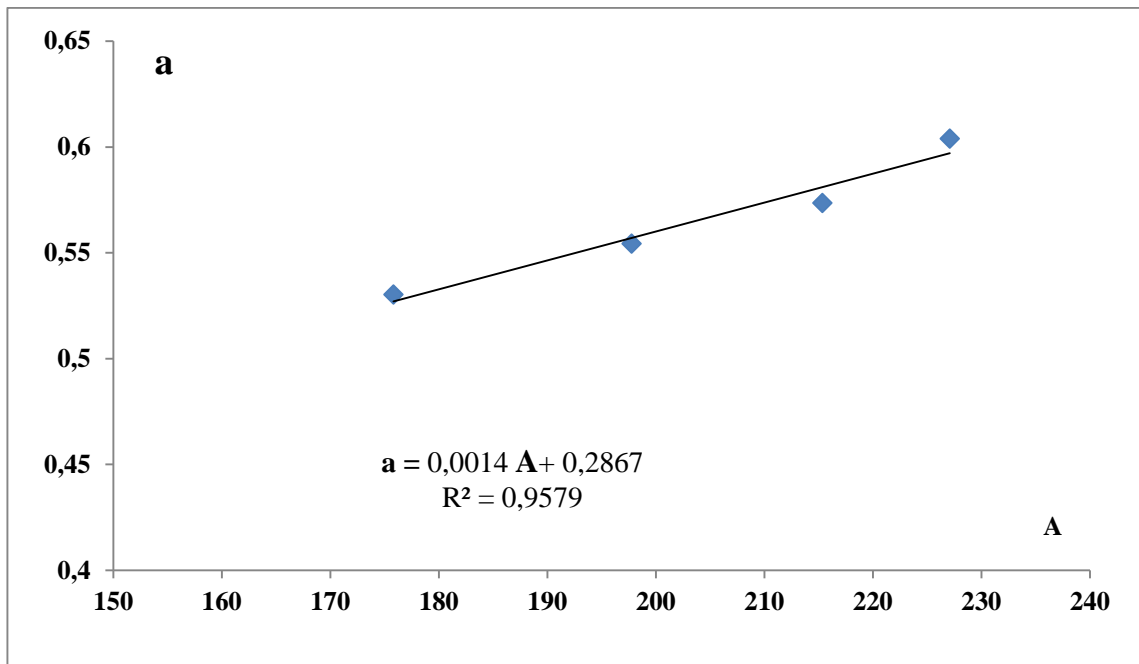


Figure (1.18) : Variation du coefficient (a) en fonction de la surface du seuil (S).

(—) courbe d'ajustement

La figure (1.19) montre que les points expérimentaux s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$b = 0,0025A + 0,4253 \quad R^2 = 0,9977 \quad (1.27)$$

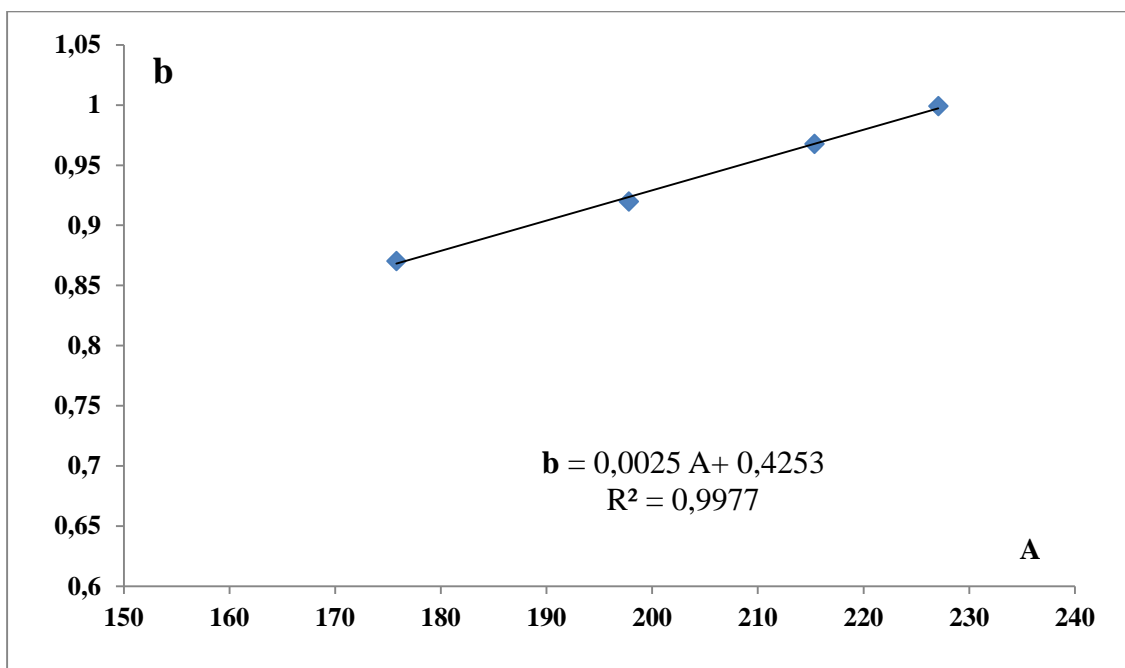


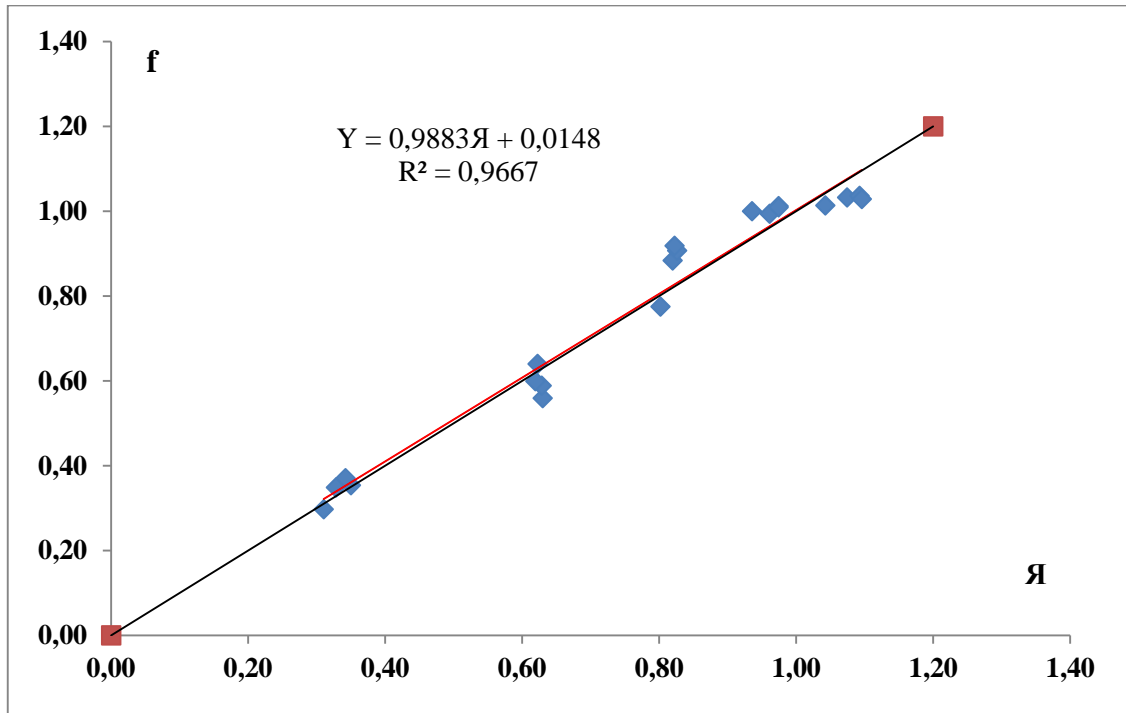
Figure (1.19) : Variation du coefficient (b) en fonction de la surface du seuil (A).

(—) courbe d'ajustement

La relation linéaire traduisant la variation de  $f$  en fonction de  $x/Lr$  et de la surface du seuil, est la suivante :

$$\mathbf{Я} = (0,0014 A + 0,2867)x/Lr + (0,0025 A + 0,4253) \quad (1.28)$$

La représentation graphique du  $f_{exp}$  en fonction de  $\mathbf{Я} = f_{appr}$  est indiquée sur la figure (1.20).



*Figure (1.20) : Variation de  $f_{exp}$  en fonction de*

$$\mathbf{Я} = (f)_{appr} = (0,0014 A + 0,2867)x/Lr + (0,0025 A + 0,4253)$$

(—) première bissectrice., (—) droite d'ajustement d'équation  $f = 0,9883f + 0,0148$

D'après la figure (1.20) on remarque que le nuage de points représentant la variation du  $(f)_{exp}$  en fonction de  $\mathbf{Я} = (f)_{appr}$  tourne autour de la première bissectrice, ce qui confirme la validité de la relation généralisée :

$$\mathbf{Я} = (0,0014 A + 0,2867)x/Lr + (0,0025 A + 0,4253)$$

L'erreur  $\Delta Y$  entre les résultats expérimentaux du  $f_{exp}$  et la fonction  $\mathbf{Я}$  est donnée par le tableau suivant :



*Tableau (1.13) : L'erreur  $\Delta f$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $(f)_{exp}$  et la fonction  $\mathcal{Y}$*

<b>x/Lr</b>	<b>f</b>	<b><math>\mathcal{Y}</math></b>	<b><math>\Delta f=(x/Lr-\mathcal{Y})/x/Lr</math> (%)</b>
0,381	0,354	0,350	0,01
0,635	0,640	0,622	0,03
0,888	0,775	0,802	0,03
1,142	1,000	0,936	0,06
1,396	1,014	1,043	0,03
0,359	0,370	0,342	0,08
0,598	0,559	0,630	0,13
0,837	0,884	0,820	0,07
1,077	0,994	0,961	0,03
1,316	1,032	1,074	0,04
0,339	0,349	0,328	0,06
0,566	0,589	0,629	0,07
0,792	0,907	0,826	0,09
1,018	1,012	0,974	0,04
1,244	1,037	1,092	0,05
0,323	0,297	0,310	0,04
0,539	0,599	0,619	0,03
0,754	0,919	0,823	0,10
0,970	1,009	0,974	0,03
1,185	1,029	1,096	0,06

II.6.3.c. Position 4.6 m :

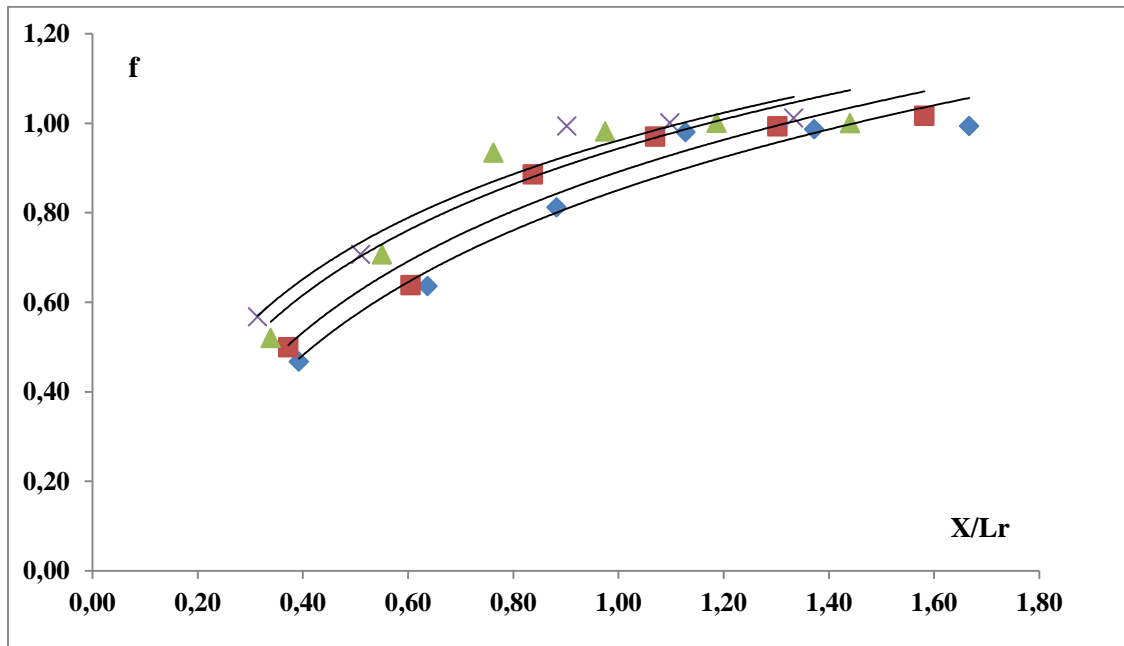


Figure (1.21) : Variation du profil de surface  $f=h(x)$  du ressaut pour quatre seuils

A01(  $\blacklozenge$  ); A02(  $\blacksquare$  ); A03(  $\blacktriangle$  ); A04(  $\blacktimes$  )

La figure (1.21) représente quatre nuages de points correspondant à la variation du profil de surface  $f=h(x)$  du ressaut, chacun pour une surface du seuil donnée. L'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à quatre relations d'équations logarithmiques suivantes :

$$A(01)=175,8 \text{ m}^2; \quad f = 0,4027\ln(\mathbf{x/Lr}) + 0,8509 \quad R^2 = 0,9509 \quad (1.29)$$

$$A(02)=197.775 \text{ m}^2; \quad f = 0,3918\ln(\mathbf{x/Lr}) + 0,8916 \quad R^2 = 0,9442 \quad (1.30)$$

$$A(03)=215.355\text{m}^2 ; \quad f = 0,3576\ln(\mathbf{x/Lr}) + 0,9436 \quad R^2 = 0,9131 \quad (1.31)$$

$$A(04) =227.075 \text{ m}^2 ; \quad f= 0,3383\ln(\mathbf{x/Lr}) + 0,9618 \quad R^2 = 0,9561 \quad (1.32)$$

On remarque que pour tous les seuils, la valeur la quantité adimensionnelle  $f = \frac{h-h_x}{h_2 - h_1}$  augmente avec la croissance du rapport  $\mathbf{x/Lr}$ .

Cependant, on constate que pour une valeur égale du nombre de Froude  $F_1$ ,  $f = \frac{h-h_x}{h_2 - h_1}$  augmente avec la croissance de la surface des seuils

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la figure (1.21), sont représentés dans le tableau (1.14) :

*Tableau (1.14) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (1.21)*

<b>X/Lr</b>	<b>f</b>	<b>X/Lr</b>	<b>f</b>	<b>X/Lr</b>	<b>f</b>	<b>X/Lr</b>	<b>f</b>
0,392	0,467	0,372	0,500	0,339	0,521	0,314	0,568
0,637	0,636	0,605	0,638	0,551	0,707	0,510	0,708
0,882	0,812	0,837	0,886	0,763	0,935		1,006
1,127	0,981	1,070	0,970	0,975	0,982	0,902	0,994
1,373	0,987	1,302	0,994	1,186	1,001	1,098	1,001
1,667	0,994	1,581	1,017	1,441	1,001	1,333	1,012

**Tableau (1.15) :** coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de relation liants f à x/Lr pour les différents seuils testés.

<b>Surface de seuil A</b>	<b>coefficient a</b>	<b>coefficient b</b>	<b>coefficient de corrélacion R<sup>2</sup></b>
A(01) =175,8	0,4027	0,8509	0,9561
A(02) =197,775	0,3918	0,8916	0,9131
A(03) =215,355	0,3576	0,9436	0,9442
A04) =227,075	0,3383	0,9618	0,9509

La figure (1.22) mont que les points expérimental s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$a = -0.0013A + 0.635R^2 = 0.9309 \quad (1.33)$$

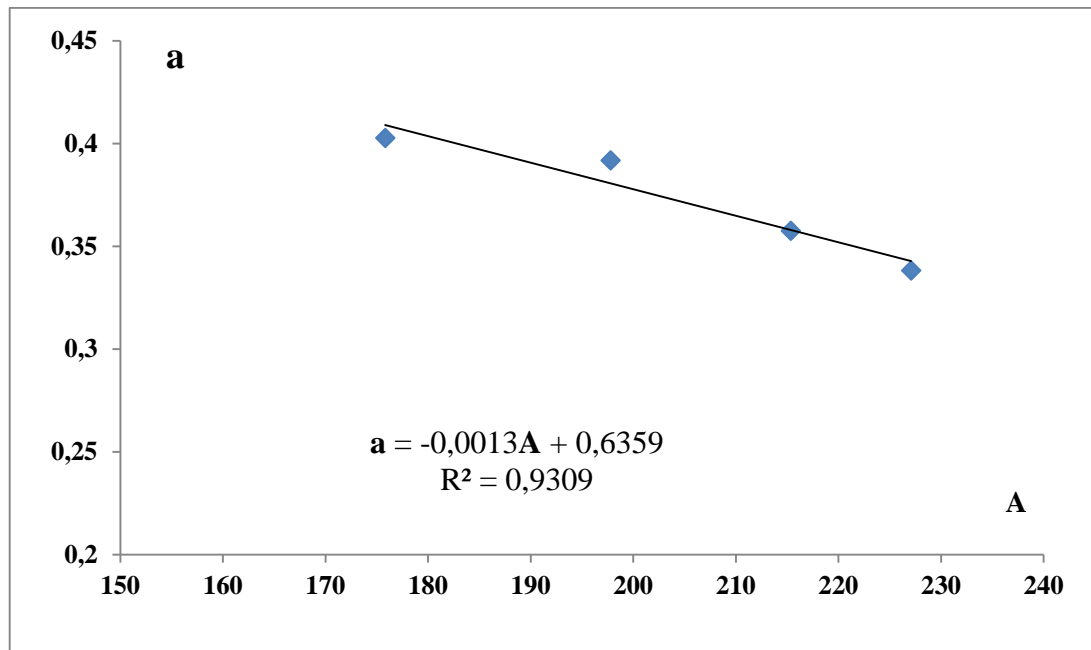


Figure (1.22) : Variation du coefficient (a) en fonction de l'aire de surface du seuil (A).

(—) courbe d'ajustement

La figure (1.23) montre que les points expérimentaux s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$b = 0,0022A + 0,4539 \quad R^2 = 0,9885 \quad (1.34)$$

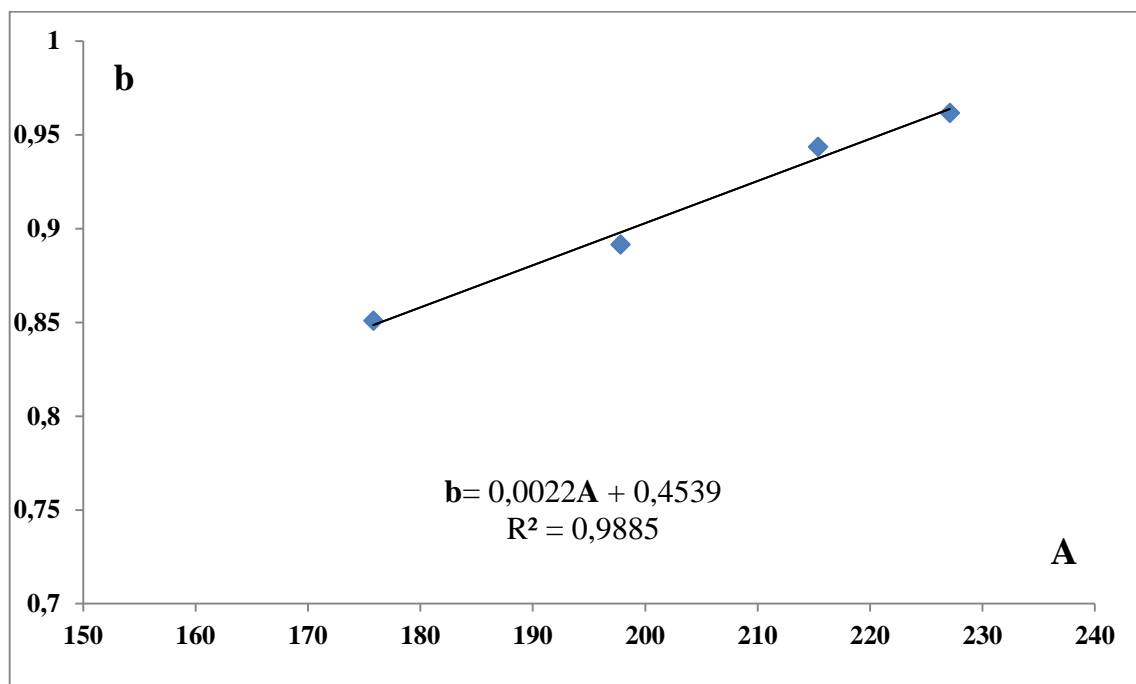


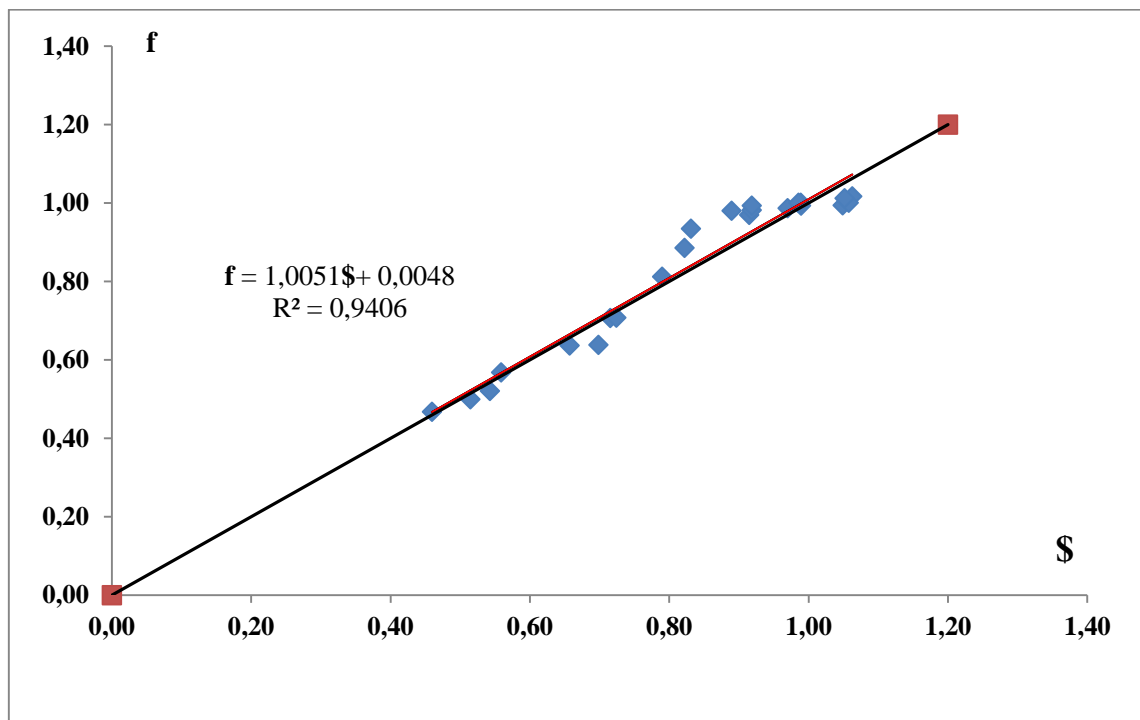
Figure (1.23) : Variation du coefficient (b) en fonction de la surface du seuil (A).

(—) courbe d'ajustement

La relation linéaire traduisant la variation de  $f$  en fonction de  $x/Lr$  et de la surface du seuil, est la suivant :

$$\$( -0,0013 A + 0,635 ) x/Lr + ( 0,0022 A + 0,4539 ) \tag{1.35}$$

La représentation graphique du  $(f)_{exp}$  en fonction de  $\$ = (f)_{appr}$  est indiquée sur la figure (1.24).



*Figure (1.24) : Variation de  $(f)_{exp}$  en fonction de*

$$\$(f)_{appr} = ( -0,0013 A + 0,635 ) x/Lr + ( 0,0022 A + 0,4539 )$$

(—) première bissectrice, (—) droite d'ajustement d'équation  $Y = 1,005\$ + 0,0048$

D'après la figure (1.24) on remarque que le nuage de points représentant la variation du  $(f)_{exp}$  en fonction de  $\$ = (f)_{appr}$  tourne autour de la première bissectrice, ce qui confirme la validité de la relation généralisée :

$$\$( -0,0013 A + 0,635 ) x/Lr + ( 0,0022 A + 0,4539 )$$

L'erreur  $\Delta f$  entre les résultats expérimentaux de  $(f)_{exp}$  et la fonction  $\$$  est donnée par le tableau suivant :

**Tableau (1.16) :** L'erreur  $\Delta f$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $(f)_{\text{exp}}$  et la fonction  $\$$

<b>x/Lr</b>	<b>f</b>	<b>\$</b>	<b><math>\Delta f=(f-\\$)/f</math> (%)</b>
0,392	0,467	0,459	0,02
0,637	0,636	0,657	0,03
0,882	0,812	0,790	0,03
1,127	0,981	0,890	0,09
1,373	0,987	0,970	0,02
1,667	0,994	1,049	0,05
0,372	0,500	0,515	0,03
0,605	0,638	0,698	0,09
0,837	0,886	0,822	0,07
1,070	0,970	0,915	0,06
1,302	0,994	0,989	0,00
1,581	1,017	1,063	0,04
0,339	0,521	0,543	0,04
0,551	0,707	0,715	0,01
0,763	0,935	0,831	0,11
0,975	0,982	0,919	0,06
1,186	1,001	0,989	0,01
1,441	1,001	1,058	0,06
0,314	0,568	0,559	0,02
0,510	0,708	0,724	0,02
0,902	0,994	0,918	0,08
1,098	1,001	0,985	0,02
1,333	1,012	1,051	0,04

II.6.3.d. Position 6 m :

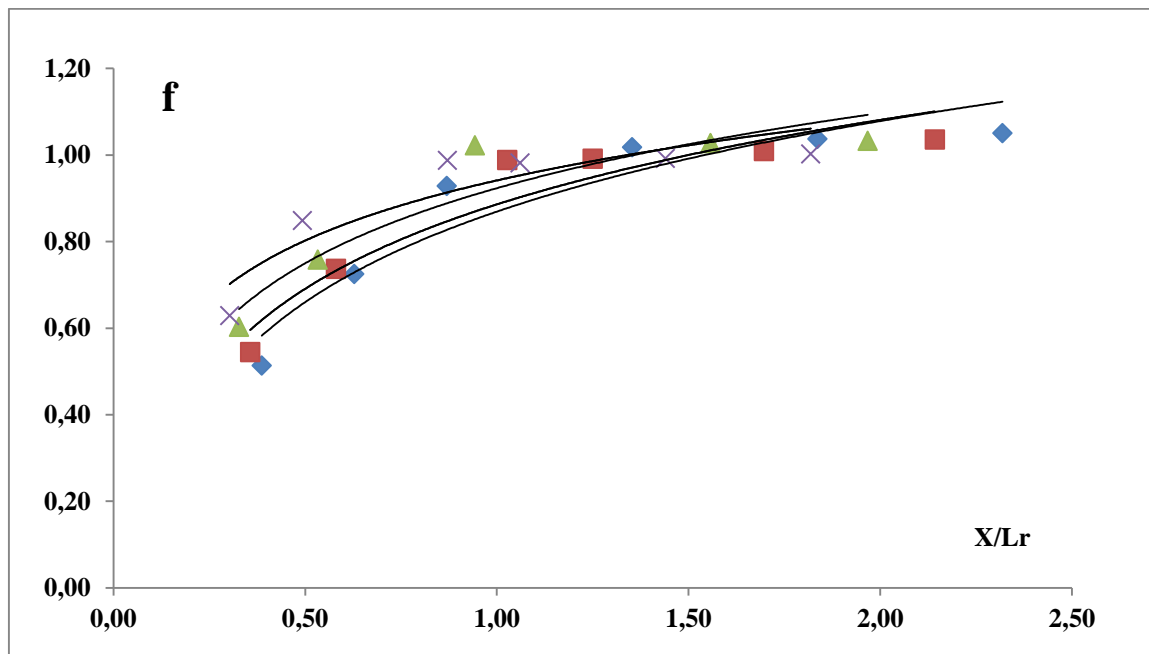


Figure (1.25) : Variation de la du profil de surface  $f=h(x)$  du ressaut pour quatre seuil

A01 (◆) ; A02(■) ; A03(▲) ; A04(✕)

La figure (1.25) représente quatre nuage de points correspondant chacun nombre du seuil, L'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à quatre relation logarithmique d'équation logarithmique suivante :

$$A(01) ; f = 0,3018\ln(\mathbf{x/Lr}) + 0,8693 \quad R^2 = 0,8979 \quad (1.36)$$

$$A(02) ; f = 0,2814\ln(\mathbf{x/Lr}) + 0,886 \quad R^2 = 0,9071 \quad (1.37)$$

$$A(03) ; f = 0,2504\ln(\mathbf{x/Lr}) + 0,9234 \quad R^2 = 0,8832 \quad (1.38)$$

$$A(04) ; f = 0,2004\ln(\mathbf{x/Lr}) + 0,9413 \quad R^2 = 0,8354 \quad (1.39)$$

Les résultats expérimentaux qui ont servi au traçage de la figure (1.25), sont représentés dans le tableau (1.17) :

**Tableau (1.17) :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (1.25)

<b>X/Lr</b>	<b>f</b>	<b>X/Lr</b>	<b>f</b>	<b>X/Lr</b>	<b>f</b>	<b>X/Lr</b>	<b>f</b>
0,386	0,514	0,357	0,545	0,328	0,604	0,303	0,630
0,628	0,725	0,580	0,737	0,533	0,759	0,492	0,849
0,870	0,929		0,965		1,011		0,953
	1,005	1,027	0,989	0,943	1,023	0,871	0,988
1,353	1,018	1,250	0,991		1,028	1,061	0,982
1,836	1,038	1,696	1,009	1,557	1,028	1,439	0,992
2,319	1,051	2,143	1,036	1,967	1,033	1,818	1,003

**Tableau (1.18) :** coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de relation liants f a x/Lr pour les différents seuils testés.

<b>Surface de seuil A</b>	<b>coefficient a</b>	<b>coefficient b</b>	<b>coefficient de corrélacion R2</b>
A(01) =175,8	0,3018	0,8693	0,869
A(02) =197,775	0,2814	0,886	0,886
A(03) =215,355	0,2504	0,9234	0,8832
A(04) =227,075	0,2004	0,9413	0,835

La figure (1.26) montre que les points expérimentaux s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$a = -0.0019A + 0.64 \qquad R^2 = 0.8953 \qquad (1.40)$$



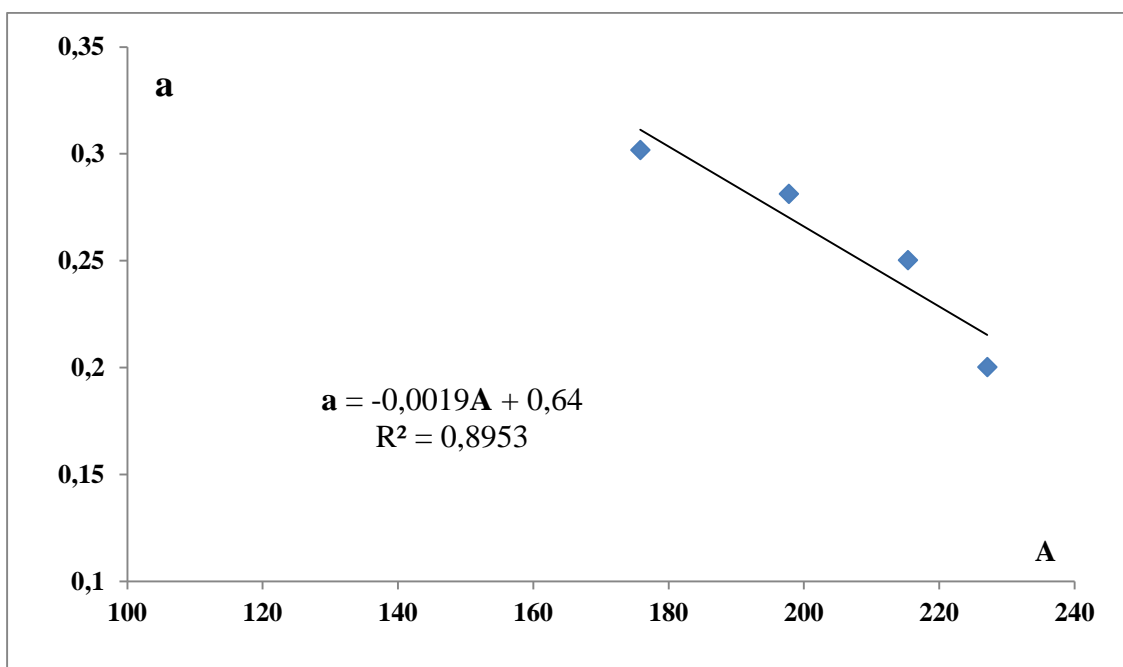


Figure (1.26) : Variation du coefficient (a) en fonction de la surface du seuil (A).

(—) courbe d'ajustement

La figure (1.27) montre que les points expérimentaux s'ajustent autour d'une courbe linéaire de la forme :

$$b = 0,0015A + 0,6088 \quad R^2 = 0,958 \quad (1.41)$$

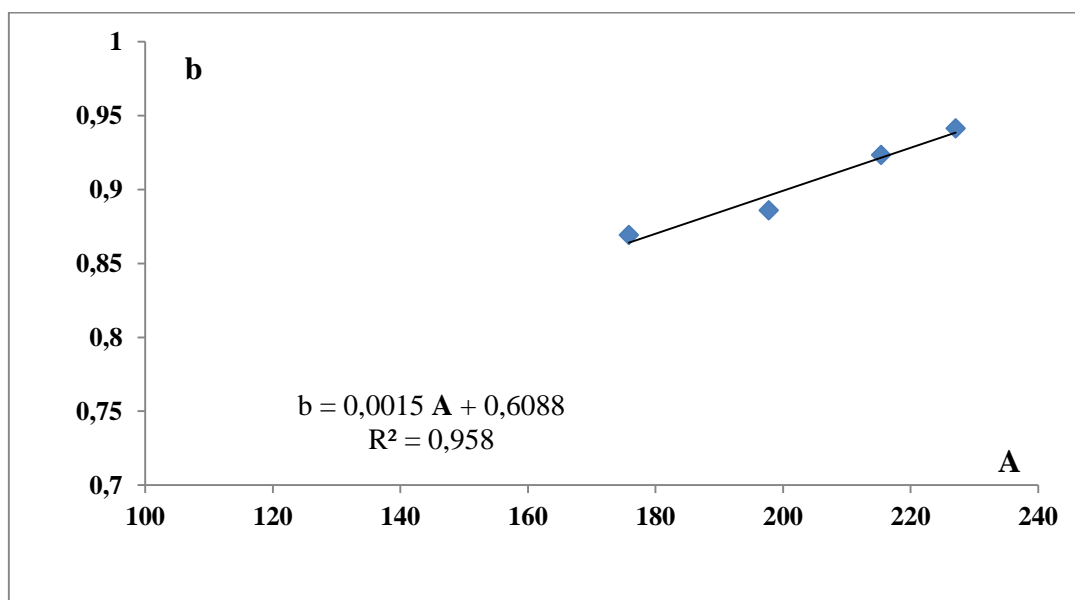


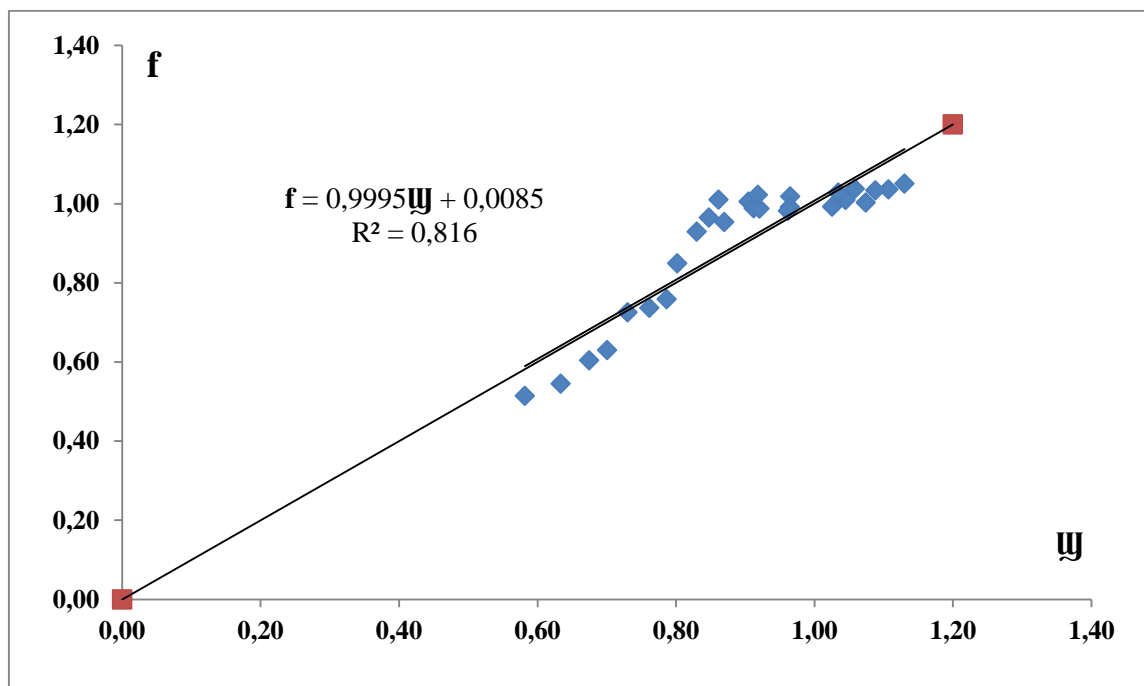
Figure (1.27) : Variation du coefficient (b) en fonction de la surface du seuil (A).

(—) courbe d'ajustement

La relation linéaire traduisant la variation de  $f$  en fonction de  $x/Lr$  et de la surface du seuil, est la suivante :

$$\mathbb{W} = (-0.0019 A + 0.64)x/Lr + (0.0015 A + 0.6088) \quad (1.42)$$

La représentation graphique du  $(f)_{\text{exp}}$  en fonction de  $\mathbb{W} = (f)_{\text{appr}}$  est indiquée sur la figure (1.28).



*Figure (1.28) : Variation de  $(f)_{\text{exp}}$  en fonction de*

$$\mathbb{W} = (f)_{\text{appr}} = (-0.0019 A + 0.64)x/Lr + (0.0015 A + 0.6088)$$

(—) première bissectrice, (---) droite d'ajustement d'équation  $f = 0.9995\mathbb{W} + 0.0085$

D'après la figure (1.28) on remarque que le nuage de points représentant la variation du  $(f)_{\text{exp}}$  en fonction de  $\mathbb{W} = (y)_{\text{appr}}$  tourne autour de la première bissectrice, ce qui confirme la validité de la relation généralisé :

$$\mathbb{W} = (-0.0019 A + 0.64)x/Lr + (0.0015 A + 0.6088)$$

L'erreur  $\Delta f$  entre les résultats expérimentaux du  $(f)_{\text{exp}}$  et la fonction  $\mathbb{W}$  est donnée par le tableau suivant :

**Tableau (1.19) :** L'erreur  $\Delta f$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $(f)_{exp}$  et la fonction  $\Psi$

<b>x/Lr</b>	<b>f</b>	<b><math>\Psi</math></b>	<b><math>\Delta f=(f-\Psi)/f</math> (%)</b>
0,386	0,514	0,582	0,13
0,628	0,725	0,730	0,01
0,870	0,929	0,830	0,11
1,111	1,005	0,905	0,10
1,353	1,018	0,965	0,05
1,836	1,038	1,058	0,02
2,319	1,051	1,130	0,08
0,357	0,545	0,633	0,16
0,580	0,737	0,762	0,03
0,804	0,965	0,848	0,12
1,027	0,989	0,912	0,08
1,250	0,991	0,964	0,03
1,696	1,009	1,045	0,04
2,143	1,036	1,107	0,07
0,328	0,604	0,674	0,12
0,533	0,759	0,786	0,04
0,738	1,011	0,862	0,15
0,943	1,023	0,918	0,10
1,557	1,028	1,034	0,01
1,967	1,033	1,088	0,05
0,303	0,630	0,700	0,11
0,492	0,849	0,802	0,06
0,682	0,953	0,870	0,09
0,871	0,988	0,921	0,07
1,061	0,982	0,962	0,02
1,439	0,992	1,025	0,03
1,818	1,003	1,074	0,07

**I.7.Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à l'étude expérimentale des longueurs caractéristiques et du profil de surface du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal asymétrique.

Les résultats expérimentaux ont montré que les variations des rapports des longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique  $L_r/h_1$  et  $L_j/h_2$  en fonction du nombre de Froude  $Fr_1$  et pour différentes valeurs de la position du seuil  $x$ , se traduit par des courbes d'ajustements de type linéaire de la forme :  $a.Fr_1 + b$  pour l'intervalle du nombre de Froude testé. Par ailleurs les relations généralisées sont de la forme :

$$(L_r/h_1)_{appr} : (14,017x + 13,137)Fr_1 + (-36,378x + 157,01) \quad 2,350 \leq Fr_1 \leq 2,907 \text{ coté plus profond}$$

$$(L_r/h_2)_{appr} : (0.4594x + 2.8434)Fr_1 + (-868x + 4.0793) \quad 2,350 \leq Fr_1 \leq 2,90 \quad \text{coté plus profond}$$

A partir de la représentation graphique, on constate que le rapport de la longueur relative du rouleau  $L_r/h_1$ , augmente proportionnellement avec le nombre de Froude  $Fr_1$ .

On remarque également que pour le même nombre de Froude, la valeur de la longueur relative du rouleau  $L_r/h_1$  augmente au fur et à mesure que la valeur de la position du seuil augmente, soit avec l'éloignement du seuil par rapport au début du ressaut. La position la plus proche du début du ressaut fait exception à cette loi, ceci est due probablement à la grande turbulence du rouleau et la difficulté de la mesure de ce dernier.

Le rapport de la longueur relative du ressaut  $L_j/h_2$  augmente proportionnellement avec le nombre de Froude  $Fr_1$ .

On remarque également que pour le même nombre de Froude, la valeur de la longueur relative du ressaut  $L_j/h_2$  augmente au fur et à mesure que la valeur de la position du seuil augmente, soit avec l'éloignement du seuil par rapport au début du ressaut.

Pour le profil de surface, on remarque que pour tous les seuils, la quantité adimensionnelle

$$f = \frac{h-h_x}{h_2-h_1} \text{ augmente avec la croissance du rapport } x/L_r .$$

Cependant, on constate que pour une valeur égale du nombre de Froude  $F_1$ ,  $f = \frac{h-h_x}{h_2-h_1}$  augmente avec la croissance de la surface des seuils.

# **Conclusion générale**

## CONCLUSION GENERALE

Notre étude présente une analyse expérimentale du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique avec convergent triangulaire. L'étude a pour but de déterminer expérimentalement les longueurs caractéristiques et le profil de surface du ressaut hydraulique étudié.

Deux parties ont été nécessaires : la 1<sup>ère</sup> partie est la partie bibliographique qui se divise en deux chapitres :

La première partie a concerné les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond horizontal et trapézoïdal.

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* (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. Le deuxième chapitre présente l'étude de *Wanoschek et Hager* (1989) sur le ressaut dénoyé dans un canal trapézoïdal, 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 dénoyé pour le canal trapézoïdal.

Le deuxième chapitre a concerné en deuxième lieu le ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire. L'étude d'*Alberto José et Rodriguez-Diaz* (1954) a été évoquée.

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

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

La deuxième partie a été consacrée à la position de la problématique et à la description des essais et à l'analyse expérimentale des résultats obtenus. A travers cette analyse nous avons proposé les relations fonctionnelles régissant le ressaut hydraulique, contrôlé par seuil mince, évaluant dans un canal trapézoïdal asymétrique.

Un nombre suffisant de relations concernant les longueurs caractéristique du ressaut hydraulique, ainsi que les relations caractérisant les profils de surface pour les différentes positions des seuils utilisés, ont été déterminées, nous permettant, dans la pratique, de dimensionner les bassins amortisseurs utilisant ce type de ressaut.

# **LISTE DES FIGURES**



**LISTE DES FIGURES**

**Première partie**

**Chapitre I :**

**Figure 1.1:** Schématisation d'un ressaut hydraulique avec les principales notations.....1

**Figure 1.2.1 :** Le Pré-ressaut ou le ressaut faible.....2

**Figure 1.2.2 :** Le ressaut de transition ou oscillatoire.....3

**Figure 1.2.3:** Le ressaut stable ou établie.....3

**Figure 1.2.4:** Le ressaut agité (Fort) .....3

**Figure 1.3 :** Schéma d'un ressaut hydraulique.....4

**Figure 1.4 :** Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828).....6

**Figure 1.5 :** Hauteur du ressaut.....6

**Figure 1.6 :** Aspect du ressaut classique.**a)** rouleau développé. **b)** rouleau non développé.....7

**Figure 1.7 :** (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique.....9

**Figure 1.8 :** Rendement  $\eta$  du ressaut classique en fonction du nombre de **Froude  $F_1$** .....11

**Figure 1.9 :** Profil de la surface ressaut hydraulique plan ; définition selon les équ. (1.30)....11

**Figure 1.10:** Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.....12

**Figure 1.11:** Variation expérimentale de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude  $Fr_1$  de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative  $X/h_2$  du seuil (**Forster et Skrinde, 1950**).....13

**Figure 1.12 :** Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur  $s$  et de longueur  $L$ . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions)..14

**Chapitre II :**

**Figure( 3.1) :** Ressaut hydraulique classique.....16

**Figure (3.2) :** 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.....20

**Figure (3.3) :** Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale.....21

**Figure (3.4) :** (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique.....21

**Figure (3.5) :** Rendement  $\eta$  du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude.  
 $M \rightarrow \infty$  : Cas du canal triangulaire.  $M = 0$  : canal rectangulaire.....23

**Figure (3.6):** Section transversale du canal.....24

**Figure (3.7):** Section de la bande longitudinale.....26

**Figure (3.8):** Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport  
d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté peu  
profond.....28

**Figure 3.9:** Diagramme du taux de changement de  $M$  sur le côté peu profond.....29

**Figure (3.10) :** Schéma général d'écoulement.....30

**Figure(3.11):** Modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la  
propagation positive du ressaut dans un canal composé prismatique  
( $d1/D < 1$ ).....32

**Figure (3.12):**Modèle de la section transversale du canal - A gauche: en regardant vers  
l'amont.....33

**Figure (3.13):** Photographie de l'installation expérimentale en aval.....33

**Deuxième partie**

**Chapitre I :**

**Figure( 1.1) :** Schéma simplifié d'ensemble du dispositif expérimental.....36

**Figure (1.2) :** courbe d'étalonnage de la variation du débit volume  $Q$  en fonction de la  
différence des cotes  $h(\blacklozenge)$  : points expérimentaux, (—) courbe  
d'ajustement.....43

**Figure (1.3) :** courbe de la variation du débit volume  $Q_{app}$  selon la relation (1.1) en fonction  
de débit volume  $Q$  expérimentale ( $\blacklozenge$ ): points expérimentaux, (—) première  
bissectrice.....44

**Figure( 1.4) :**Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.....45

**Figure (1.5) :** Variation de rapport  $L_r/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $Fr_1$  ...47

**Figure (1.6) :** Variation du coefficient (a) en fonction de la position  $x$  du seuil.....49

**Figure (1.7) :** Variation du coefficient (b) en fonction de la position  $x$  du seuil.....49

**Figure (1.8) :** Variation du rapport  $\lambda_r=(Lr/h_1)_{exp}$  en fonction de

$$\theta = (\lambda_r)_{appr}=(14,017x + 13,137)Fr_1+(-36,378x + 157,01) \dots\dots\dots 50$$

**Figure (1.9) :** Variation de rapport  $L_j/h_2$  du ressaut en fonction du nombre de Froude Fr.....52

**Figure (1.10) :** Variation du coefficient (a) en fonction de la position x du seuil.....54

**Figure (1.11) :** Variation du coefficient (b) en fonction de la position x du seuil.....54

**Figure (1.12) :** Variation de rapport  $\lambda_j=(L_j/h_2)_{exp}$  en fonction de

$$\psi =(\lambda_j)_{appr}=(0.4594x + 2.8434)Fr_1+( -868x + 4.0793). (—) première bissectrice.(- -) droite d'ajustement d'équation  $L_j/h_2=0.9451\psi+0.7516$ .....55$$

**Figure (1.13) :** Variation du profil de surface  $Y=f(x)$  du ressaut pour quatre seuil

$$A01(\blacklozenge); A02(\blacksquare); A03(\blacktriangle); A04(\blacktimes) \dots\dots\dots 57$$

**Figure (1.14) :** Variation du coefficient (a) en fonction de la surface du seuil (A).....59

**Figure (1.15) :** Variation du coefficient (b) en fonction de la surface du seuil (A).....59

**Figure (1.16) :** Variation de  $Y_{exp}$  en fonction de

$$\Phi =(Y)_{appr}=( -0,002 A + 0,9133 )x/Lr +( 0,0025 A + 0,4666). (—) première bissectrice,(- -) droite d'ajustement d'équation  $Y=1.0163 \Phi-0.0199$  ..... 60$$

**Figure (1.17) :** Variation de la du profil de surface  $Y=f(x)$  du ressaut pour quatre seuil

$$A01(\blacklozenge); A02(\blacksquare); A03(\blacktriangle); A04(\blacktimes) \dots\dots\dots 62$$

**Figure (1.18) :** Variation du coefficient (a) en fonction de la surface du seuil (S).....64

**Figure (1.19) :** Variation du coefficient (b) en fonction de la surface du seuil (A).....64

**Figure (1.20) :** Variation de  $Y_{exp}$  en fonction de

$$\mathfrak{Y} =(Y)_{appr}=( 0.0014 A + 0,2867 )x/Lr +( 0,0025 A + 0,4253). (—) première bissectrice.,(- -) droite d'ajustement d'équation  $Y=0.9883 \mathfrak{Y} +0.0148$ .....65$$

**Figure (1.21) :** Variation du profil de surface  $Y=f(x)$  du ressaut pour quatre seuils

$$A01(\blacklozenge); A02(\blacksquare); A03(\blacktriangle); A04(\blacktimes) \dots\dots\dots 67$$

**Figure (1.22) :** Variation du coefficient (a) en fonction de l'aire de surface du seuil (A).....69

**Figure (1.23) :** Variation du coefficient (b) en fonction de la surface du seuil (A).....69

**Figure (1.24) :** Variation de  $(Y)_{exp}$  en fonction de

$$\mathfrak{S} =(Y)_{appr}=( -0.0013 A + 0.635 )x/Lr +( 0,0022 A + 0, 4539) (—) première bissectrice,(- -) droite d'ajustement d'équation  $Y=1.005\mathfrak{S}+0.0048$ .....70$$

**Figure (1.25) :** Variation de la du profil de surface  $Y=f(x)$  du ressaut pour quatre seuil

A01(◆) ; A02(■) ; A03(▲) ; A04(✕) ..... 72

**Figure (1.26) :** Variation du coefficient (a) en fonction de la surface du seuil (A) ..... 74

**Figure (1.27) :** Variation du coefficient (b) en fonction de la surface du seuil (A) ..... 74

**Figure (1.28) :** Variation de  $(Y)_{exp}$  en fonction de

$\mathbb{U} = (Y)_{appr} = (-0.0019 A + 0.64)x/Lr + (0,0015 A + 0,6088)$  (—) première bissectrice, (→) droite d'ajustement d'équation  $Y = 0.9995\mathbb{U} + 0.0085$  ..... 75

# Liste des Tableau

LISTE DES TABLEAU

**Tableau (1.1) :** valeurs des mesures du débit par l'étalonnage.....42

**Tableau (1.2) :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (1.5).....48

**Tableau (1.3) :** coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de relation liants  $L_r/h_1$  au nombre de Froude  $Fr_1$  pour différents position  $x$ .....48

**Tableau (1.4) :** L'erreur  $\Delta\lambda_r$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $\lambda_r=(L_r/h_1)_{exp}$  et la fonction  $\theta$ .....51

**Tableau (1.5) :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (1.9).....53

**Tableau (1.6) :** coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de relation liants  $L_r/h_1$  au nombre de Froude  $Fr_1$  pour différents position  $x$ .....53

**Tableau (1.7) :** L'erreur  $\Delta\lambda_j$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $\lambda_j=(L_j/h_2)_{exp}$  et la fonction  $\psi$ .....56

**Tableau (1.8) :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (1.13).....58

**Tableau (1.9) :** coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement des relations liant  $f$  à  $x/Lr$  pour les différents seuils testés.....58

**Tableau (1.10) :** L'erreur  $\Delta f$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $(f)_{exp}$  et la fon  $\Phi$ ...61

**Tableau (1.11) :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (1.17).....63

**Tableau (1.12) :** coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement des relations liants  $Y$  à  $x/Lr$  pour différents seuil.....63

**Tableau (1.13) :** L'erreur  $\Delta f$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $(f)_{exp}$  et la fon  $\mathbf{Y}$ ...66

**Tableau (1.14) :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (1.21).....68

**Tableau (1.15) :** coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de relation liants  $f$  à  $x/Lr$  pour les différents seuils testés.....68

**Tableau (1.16) :** L'erreur  $\Delta f$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $(f)_{exp}$  et la fon  $\mathbf{\$}$ .....71

**Tableau (1.17) :** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure(1.25).....73

**Tableau (1.18) :** coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de relation liants  $f$  au  $x/Lr$  pour différents seuil.....73

**Tableau (1.19) :** L'erreur  $\Delta f$  entre les résultats expérimentaux du rapport  $(f)_{exp}$  et la fon  $\mathbf{J}$ ...76

# **Référence bibliographique**

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1]. **Alberto, J., Rodriguez-D. (1954)**, The hydraulic jump in non rectangular open channel. Thesis of Master of Science in civil engineering. Faculty of the graduate division, Georgia institute of technology.
- [2]. **Ali BERREKSI** cours, module : hydraulique 3, Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement (LRHAE-Bejaia)
- [3]. **Armando lencastre**. Hydraulique générale
- [4]. **Bahri mouadh**. (2018). Etude expérimentale de l'effet de la compacité sur le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique. Mémoire de Master. Département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- [5]. **Benmalek, A. Debabeche, M. Zerrouk, A.** (2018). Étude expérimental de la compacité é du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal brusquement élargi. Laboratoire de Génie Civil et Hydraulique. Université de Biskra. Courrier du savoir – N°26, Mars 2018, pp91-98
- [6]. **Benmalek Ahmed**. (2012). Etude du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal. Mémoire Magister. Département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- [7]. **F. J. Resch et H. J. Leutheusser**. Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique
- [8]. **Hubert Chanson**. (2018). Positive surge propagation in a non-rectangular asymmetrical channel. School of civil engineering.
- [9]. **Merazga Yacine**. (2018). Etude expérimentale des longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdale asymétrique. Mémoire de Master. Département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- [10]. **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.
- [11]. **Ouassaf Sana**. (2015). Étude du ressaut hydraulique contrôlé évoluant dans un canal trapézoïdal à pente négative, Mémoire de Magister, département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- [12]. **Riguet Ferhat**. (2012). Etude théorique et expérimental du ressaut hydraulique évolution dans un canal trapézoïdal incline. Mémoire Magister. Département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- [13]. **Willie, H. Hager et Anton, J. Schleiss**. Construction hydraulique, Ecoulement stationnaire, Nouvelle édition entièrement revue et augmentée.



[14]. **Yaiche Lotfi**,(2016), Contribution à la localisation du ressaut hydraulique (Cas d'un canal rectangulaire). Mémoire de Master. Département Hydraulique Urbaine. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Algérie.

[15]. **Zaid Zaid**.(2015) Effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. Mémoire Magister. Département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

[16]. **Ziani Sonia**.(2015).Dissipation d'énergie par Ressaut Hydraulique dans une conduite circulaire avec banquettes .Mémoire de Magister. Département d'Hydraulique.Université A.MIRA-BEJAIA. Algérie.

# **PRICIPALES NOTATIONS**

PRICIPALES NOTATIONS

$A_1$	L'aire de la section mouillée initiale	$[m^2]$
$A_2$	L'aire de la section mouillée finale	$[m^2]$
$A(01), A(02), A(03), A(04)$	surface du seuil	$[m^2]$
$B$	La grande base du canal trapézoïdal	$[m]$
$b$	La petite base du canal trapézoïdal	$[m]$
$d_1$	profondeur initiale de l'eau immédiatement avant le passage de surtension positif	$[m]$
$d_2$	profondeur d'eau conjuguée immédiatement après le passage de surpression positif	$[m]$
$Fr_1$	Nombre de <b>Froude</b> incident	$[-]$
$f$	Force de frottement	$[N/m^2]$
$F_{P1}$	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	$[N]$
$F_{P2}$	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	$[N]$
$G$	Accélération de la pesanteur	$[m/s^2]$
$G$	Poids de la tranche liquide	$[N]$
$h$	Hauteur du ressaut	$[m]$
$h_1$	Hauteur initiale du ressaut	$[m]$
$h_2$	Hauteur finale du ressaut	$[m]$
$\overline{h_1 et h_2}$	La position du centre de gravité de la section transversale et la surface libre de l'écoulement	$[m]$
$h(x)$	Profondeur d'eau à la distance $x$ du pied du ressaut	$[m]$
$H$	Charge totale	$[m]$
$H_1$	La charge totale dans la section amont	$[m]$
$H_2$	La charge totale dans la section aval	$[m]$
$\Delta H_{12}$	Perte de charge due au ressaut	$[m]$
$K$	Facteur de position	$[-]$
$L_j$	Longueur du ressaut	$[m]$

$L_r$	Longueur du rouleau latéral du rouleau	[m]
$L_r^*$	Longueur du rouleau ressaut classique	[m]
$L_j^*$	Longueur du ressaut classique	[m]
$M$	La hauteur relative initiale du ressaut $M = (mh_1)/b$	[-]
$m$	Cotangente de l'angle d'inclinaison d'un talus	[-]
$Q$	Débit volume	[m <sup>3</sup> /s]
$q$	Débit unitaire	[m <sup>2</sup> /s]
$s$	Hauteur du seuil ou de la marche positive	[m]
$S$	Hauteur relative du seuil ou de la marche positive	[-]
$V$	Volume d'eau inscrit entre les deux section initiale et finale	[m <sup>3</sup> ]
$V_1$	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m/s]
$V_2$	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	[m/s]
$W$	Rapport d'aspect $W = h_1/b$	[-]
$x$	Position de seuil ou de la marche	[m]
$X$	Position relative de seuil ou de la marche	[-]
$Y$	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	[-]
$Y^*$	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
$\bar{\omega}$	Poids spécifique du liquide	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\eta$	Rendement du ressaut	[-]
$\rho$	La masse volumique du liquide en mouvement.	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\lambda_r$	Longueur relative du retour latéral du courant	[-]
$\lambda_j$	La longueur relative du ressaut	[-]

