

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 Chehid Hama Lakhdar El-Oued
Faculté de technologie
Département : Hydraulique et génie civil
Option : Ouvrages Hydrotechniques

جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الري و الهندسة المدنية
تخصص : منشآت الري

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique

Option: Ouvrages Hydrotechniques

Thème:

CONTRIBUTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE DE QUELQUES
CARACTERISTIQUES DU RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT
DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL.

Présenté par les étudiants :

Nagoudi DJABER

Moumni HOCINE

Dirigé par :

Dr. Ghomri ALI

Promotion : Mai 2018

SOMMAIRE

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Connaissances sur le ressaut hydraulique dans les différentes sections géométrique.

INTRODUCTION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE.....01

CHAPITRE I : RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE.

1.1. Introduction.....	02
1.2. Définition.....	02
1.3. Ressaut hydraulique classique.....	02
1.3.1. Classification du ressaut classique.....	03
1.3.2. Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut.....	04
1.3.3. Caractéristique géométriques du ressaut.....	06
1.3.3.1. Hauteur du ressaut.....	06
1.3.3.2. Longueur du rouleau.....	06
1.3.3.3. Longueur du ressaut.....	07
1.3.3.4. Rendement du ressaut.....	08
1.4. Conclusion.....	10

CHAPITRE II : RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRIANGULAIRE.

2.1. Introduction.....	12
2.2. Ressaut hydraulique classique.....	12
2.2.1. Approche de Hager et Wanoschek (1987).....	12
2.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées.....	13
2.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	13
2.3. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil.....	15
2.3.1. Etude de Achour et Debabeche (2003).....	15
2.3.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	15
2.3.1.2. Hauteurs relative du seuil en fonction du nombre de Froude.....	16
2.3.1.3. Relation générale régissant le contrôle du ressaut.....	17
2.4. Conclusion.....	18

CHAPITRE III : RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL EN " U " .

3.1. Introduction.....	20
3.2 Caractéristiques adimensionnelles du ressaut hydraulique dans un canal profilé en "U"..	20
3. 3. Résultats expérimentaux.....	20
3. 4. Conclusion.....	24

CHAPITRE IV : RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOÏDAL.

4.1. Introduction.....	26
4.2. Caractéristique du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal classique.....	27
4.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	27
4.2.1.1. Cas particulier du canal rectangulaire.....	28
4.2.1.2. Cas particulier du canal triangulaire.....	28
4.2.2. Longueur du ressaut.....	28
4.2.3. Perte de charge relative du ressaut hydraulique.....	29
4.2.4. Profil de surface généralisé du ressaut ..	30
4.3. Conclusion.....	31
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....	32

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE I :DESCRIPTION DU MODELE EXPERIMENTAL

1.1.Introduction.....	34
1.2. Description du modèle.....	34
1.3. Canal de mesure.....	35
1.4. Appareillages de mesure.....	35
1.5. Les seuils minces.....	35
1.6. Description des essais.....	36
1.7. Conclusion.....	37

CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE

2.1. Introduction.....	39
2.2. Détermination expérimental de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal trapézoïdal	39
2.2.1. Hauteur relative du seuil.....	39
2.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées.....	42
2.2.3. La hauteur relative du seuil en fonction du rapport des hauteurs conjuguées.....	44
2.2.4. Variation de $(S+Y)$ en fonction du nombre de Froude.....	46
2.2.5. La longueur relative du ressaut	47
2.2.6. Hauteur relative en fonction du débit relatif.....	49
2.2.7. Rendement du ressaut	51
2.2.8. Profil de surface généralisé	52
2.3. Conclusion.....	57
Discussion et conclusion générale.....	58

PRINCIPALES NOTATIONS

A_1	L'aire de la section mouillée initiale	[m ²]
A_2	L'aire de la section mouillée finale	[m ²]
$A(x)$	L'aire de la section mouillée correspondant à x	[m ²]
b_1	Base du canal trapézoïdal on amont	[m]
F_1	Nombre de Froude incident	[-]
P_1	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	[N]
P_2	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	[N]
G	Accélération de la pesanteur	[m.s ⁻²]
h_1	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h_2	Hauteur finale du ressaut	[m]
h_2^*	Hauteur finale du ressaut classique rectangulaire	[m]
$h(x)$	Profondeur de l'eau à la distance x du pied du ressaut	[m]
h_b	Hauteur maximal du rouleau de fond	[m]
k	Coefficient de correction du volume du ressaut	[-]
L_r	Longueur du rouleau	[m]
L_j	Longueur du ressaut	[m]
L_r^*	Longueur du rouleau classique rectangulaire	[m]
L_j^*	Longueur du ressaut classique rectangulaire	[m]
L_u	La distance du pied du ressaut au début du rouleau de fond	[m]
L_b	Longueur du rouleau de fond	[m]
m	Cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale	[-]
M_1	Coefficient de forme	[-]
Q	Débit volume	[m ³ .s ⁻¹]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
R_h	Rayon hydraulique correspondant au profil triangulaire	[-]
s	Hauteur du seuil	[m]
S	Hauteur relative du seuil	[-]
S_f	Gradient de perte de charge	[-]
W_x	Force de frottement agissant sur le volume de liquide	[N]
V	Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiale et finale	[m ³]
v_1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m.s ⁻¹]
v_2	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	[m.s ⁻¹]
x	Position de seuil	[m]
X	Position relative de seuil	[-]
Y^*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
Y_s	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil	[-]
ν	Viscosité cinématique	[m ² .s ⁻¹]
λ_j	Longueur relative du ressaut	[-]
λ_r	Longueur relative du rouleau	[-]
λ_b	Longueur relative du rouleau de fond	[-]
λ_u	Longueur relative du distance d'approche	[-]
ω	Poids spécifique du liquide	[N.m ⁻³]
ρ	Masse volumique du liquide	[kg.m ⁻³]
η	Rendement du ressaut	[-]

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier par le biais de ce travail si modeste soit – il toute personne ayant contribué à la concrétisation de ce dernier .

Nos remerciements vont particulièrement à :

Notre promoteur : Dr. Ghomri Ali pour son orientation bénéfique et également pour sa grande patience.

A tous les enseignants qui ont contribué à notre formation, et aussi ceux d'entre eux qui ont en l'amabilité d'examiner ce modeste travail.

Première Partie

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

**CONNAISSANCES SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE DANS
LES DIFFERANTES SECTIONS GEOMETRIQUES**

INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine des constructions hydrauliques, les ouvrages de dissipation d'énergie occupant une place prépondérante. Ces structures doivent permettre une restitution de l'eau à la rivière sans provoquer d'érosions. Pour permettre cette dissipation d'énergie, une des solutions envisageables consiste en la mise en place d'un bassin d'amortissement. Le fonctionnement de ces bassins se base sur le phénomène du ressaut hydraulique permettant la dissipation importante de l'énergie cinétique de l'eau. Ces dernières années le ressaut hydraulique a fait l'objet de plusieurs recherches primordiales. La bibliographie montre que la modification des conditions à l'amont (débit, hauteurs,...etc) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur, la pente du canal, la rugosité du fond,...etc) peut conduire à différentes configurations du ressaut.

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

Pratiquement, il est nécessaire 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'obstacle, 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, d'un point de vue expérimental, le ressaut Hydraulique contrôlé, dans un canal trapézoïdal à pente nulle . Des relations fonctionnelles, en terme adimensionnel, liant les différentes caractéristiques du ressaut en canal de section prismatique trapezoidal, seront proposées.

Notre présent mémoire comporte deux grandes parties. La première partie est scindée essentiellement en quatre chapitres. Le premier chapitre consiste à passer en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, dans lequel on citera la classification effectuée par Bradley et Peterka (1957).

Le deuxième chapitre traite l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire, nous examinerons les travaux les plus récents de Debabeche et Achour (2003) qui seront l'objet de base de notre étude bibliographique, sur le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal rectangulaire.

Le troisième chapitre nous avons entamé les travaux de GHOMRI et RIGUET (2012). Ce volet a pour objectif d'étudier et d'analyser expérimentalement le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal profilé en 'U' à fond rugueux. liant les différents caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'effet de la rugosité du fond du canal.

A travers le dernier chapitre de notre étude bibliographique, nous exposerons les travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique classique évoluant en canal trapézoïdal, à savoir, ceux de Wanoschek et Hager (1989).

La deuxième partie de notre étude sera consacrée à l'étude expérimentale de quelques caractéristiques d'un ressaut hydraulique contrôlé évoluant dans un canal trapézoïdal à pente nulle .

Chapitre I

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

Chapitre I

Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons identifier le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire et ses différentes formes, selon la classification de Bradley et Peterka (1957), aussi nous citerons les caractéristiques géométriques du ressaut hydraulique classique et les travaux les plus récents effectués dans ce domaine.

1.2. Définition

Le ressaut hydraulique est une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement permanent, qui se produit lors du passage du régime torrentiel au régime fluvial. Il est accompagné d'une agitation marquée et de grandes pertes d'énergie (figure 1.1) L'écoulement en amont du ressaut est caractérisé par un nombre adimensionnel, c'est le nombre de Froude F_1 (pour un canal de section droite rectangulaire), qui est donné par :

$$F_1 = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (1.1)$$

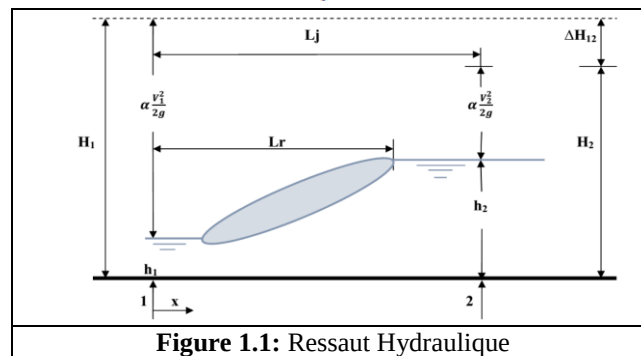


Figure 1.1: Ressaut Hydraulique

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

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.

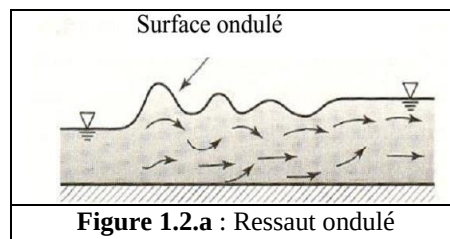
1.3. Ressaut hydraulique classique

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

1.3.1. Classification du ressaut classique

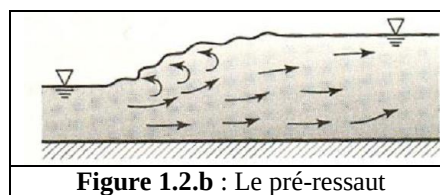
La classification du ressaut classique est basée sur la variation du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut.

- a- Pour les valeurs de $F_1 \leq 1$, le régime est lent, ou critique, il n'y a pas de ressaut.
- b- Pour des valeurs de nombre de Froude comprises entre 1 et 1,7 et cela d'après Andersen (1978), la différence des profondeurs conjuguées en amont et en aval est très faible, et le ressaut est caractérisé par de légères rides à la surface libre, aspect qui diffère peu de celui que l'on observe dans le régime critique, c'est le ressaut ondulé (figure 1.2.a).

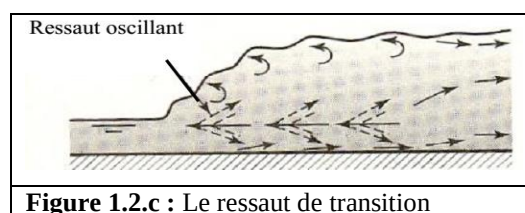


Selon la classification de Bradly et Peterka (1957) on distingue quatre formes de ressaut classique.

1. **Pour des valeurs de $1,7 < F_1 < 2,5$** , on constate le même phénomène, mais plus accentué, dans ce cas se produisent déjà de petits tourbillons superficiels. Jusqu'à ces valeurs de F_1 , la surface libre est raisonnablement plane et la distribution des vitesses est régulière mais le rendement obtenu est très faible : c'est le pré-ressaut (figure 1.2.b).



2. **Pour des valeurs de $2,5 < F_1 < 4,5$** , l'écoulement est pulsative, la plus grande turbulence se vérifie soit près de fond, ou à la surface : c'est le ressaut de transition (figure 1.2.c). Chaque pulsation produit une onde de période irrégulière, qui peut se propager sur plusieurs Kilomètres dans la nature, ce qui peut causer des dommages aux berges.



3. Pour des valeurs de $4,5 < F_1 < 9$, le ressaut est bien caractérisé et localisé. Ce type de ressaut est souvent adopté pour les bassins de dissipation d'énergie pour son bon rendement (45% et 70%) : c'est le ressaut stable (figure 1.2.d).

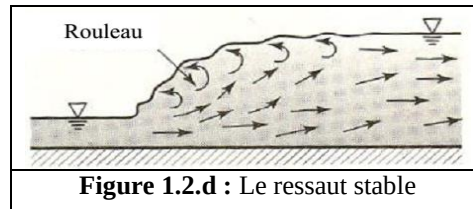


Figure 1.2.d : Le ressaut stable

4. Pour des valeurs de $F_1 > 9$, on constate des masses d'eau qui roulent par-dessous, au début du ressaut, et tombent sur le circuit rapide d'amont, d'une manière intermittente, provoquant des nouvelles ondulations en aval et la surface libre du ressaut est irrégulière : c'est le ressaut agité ou clapoteux (figure 1.2.e).

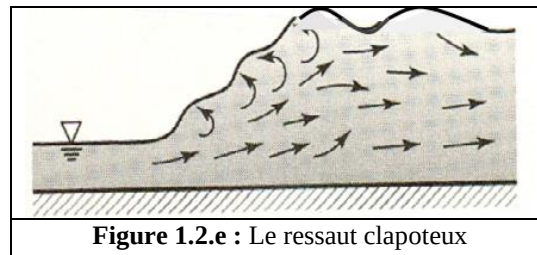


Figure 1.2.e : Le ressaut clapoteux

1.3.2. Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut

On ne peut pas appliquer le théorème de Bernoulli entre les sections 1 et 2 pour déterminer les profondeurs conjuguées du ressaut, étant donné que le terme n n'est pas connu et que les formules du régime uniforme d'Euler qui permet de résoudre ce problème. Considérons un ressaut classique évoluant entre la section initiale et finale respectivement 1 et 2 (figure 1.3).

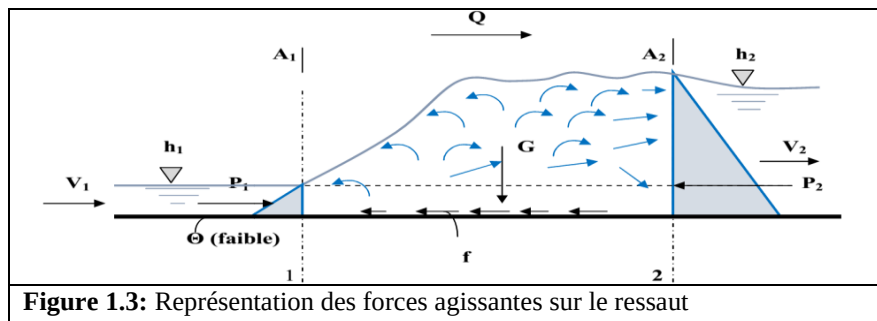


Figure 1.3: Représentation des forces agissantes sur le ressaut

L'équation de continuité permet d'écrire:

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} \quad (1.2)$$

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

$$A_1 = b \cdot h_1 \quad (1.3)$$

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

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

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

$$\beta_2 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_2 - \beta_1 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_1 = P_1 - P_2 + G \cdot \sin\theta - f \quad (1.4)$$

Où :

β : facteur de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité

Puisque la répartition des vitesses est supposée uniforme.

ρ : la masse volumique du liquide en mouvement.

Q : débit volume.

V : vitesse d'écoulement.

g : accélération de la pesanteur.

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

P_1 et P_2 : forces des pressions hydrostatiques.

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

f : force de frottement (considérée comme négligeable).

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

$$\frac{1}{2} \bar{\omega} \cdot b \cdot h_1^2 + \rho \cdot Q \cdot V_1 = \frac{1}{2} \bar{\omega} \cdot b \cdot h_2^2 + \rho \cdot Q \cdot V_2 \quad (1.5)$$

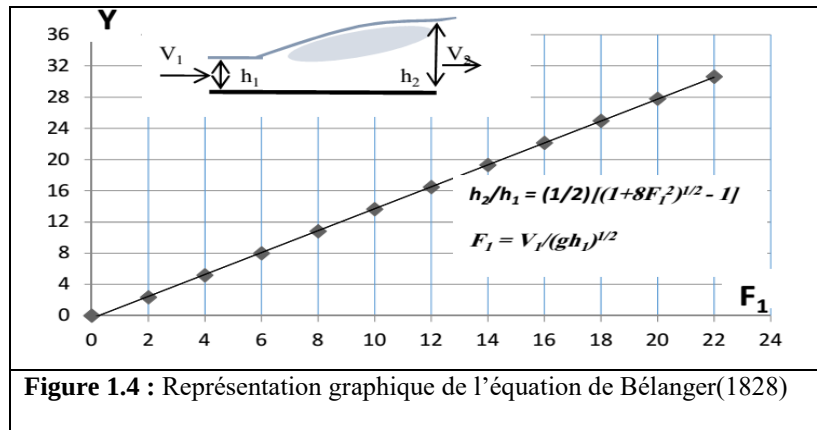
Le nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut évoluant dans un canal rectangulaire s'écrit.

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{g \cdot b^2 \cdot h_1^3} \quad (1.6)$$

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

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (1.7)$$

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



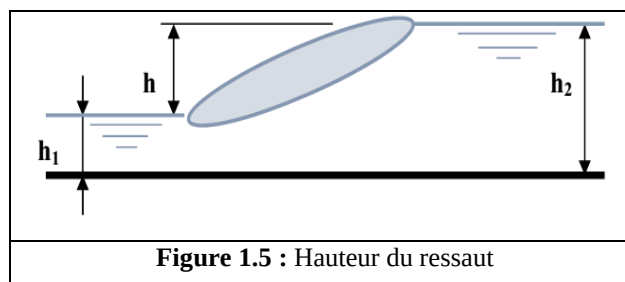
Hager et Sinniger (1986), ont donné une relation plus simple que la relation (1.7), et applicable pour un nombre de Froude $F_1 > 3$.

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2} \quad (1.8)$$

I.3.3. Caractéristiques géométriques du ressaut

I.3.3.1. Hauteur du ressaut

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



I.3.3.2. Longueur du rouleau

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

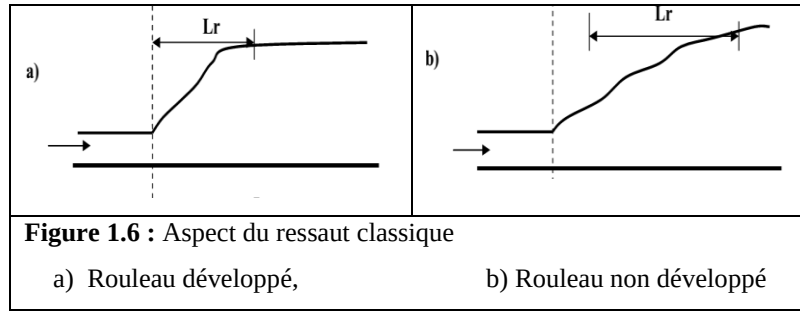


Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique

a) Rouleau développé,

b) Rouleau non développé

La forme générale du rouleau développé est presque uniforme (figure 1.6.a). Par contre le rouleau non développé est présenté par une surface libre perturbée sous l'effet des vagues qui se forment à l'aval (figure 1.6.b).

Les résultats expérimentaux de Hager et al. (1990) ont permis de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur relative du rouleau de surface du ressaut, peut s'écrire:

$$\lambda_r = -12 + 160.Tgh\left(\frac{F_1}{20}\right) \quad \text{Pour } W = \left(\frac{h_1}{b_1}\right) < 0.1 \quad (1.9)$$

$$\lambda_r = -12 + 100.Tgh\left(\frac{F_1}{12.5}\right) \quad \text{Pour } 0.1 < W < 0.7 \quad (1.10)$$

Où :

$$\lambda_r = \frac{L_r}{h_1} \quad W = \frac{h_1}{b}$$

le rapport λ_r est lié au nombre de Froude F_1 et au rapport d'aspect.

Tgh : indique la tangente hyperbolique.

Il faut noter ici que pour une gamme des valeurs de nombre de Froude $2,5 < F_1 < 8$ les auteurs ont proposé la relation suivante :

$$\lambda_r = \frac{L_r}{h_1} = 8. (F_1 - 1.5) ; 2.5 < F_1 < 8 \quad (1.11)$$

I.3.3.3. Longueur du ressaut

Les longueurs caractéristiques du ressaut définies ci-dessus L_r et L_j sont très difficiles à déterminer. Dans ce cas les auteurs ont employé la voie expérimentale pour évaluer ces grandeurs. Hager et al. (1990) ont proposé une relation permettant d'évaluer la longueur L_j du ressaut, peut s'écrire comme suite :

$$\frac{L_j}{h_1} = 220. \tanh\left[\frac{(F_1-1)}{22}\right] \quad (1.12)$$

pour une gamme pratique $4 < F_1 < 12$ on peut écrire :

$$\frac{L_j}{h_2} = 6$$

I.3.3.4. Rendement du ressaut

Le ressaut provoque une importante dissipation d'énergie mécanique ; ce phénomène est irréversible. Les caractéristiques de la turbulence sont très complexes et dépendent fortement des conditions à l'amont. Par l'application du théorème de Bernoulli (1738) on peut déterminer la perte d'énergie, $\Delta H_{1-2} = H_1 - H_2$ produite par le ressaut en admettant que $Z_1 = Z_2$, (figure 1.7), on obtient :

$$\Delta E_{12} = \Delta H_{12} = \left(\alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \right) - \left(\alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \right) \quad (1.13)$$

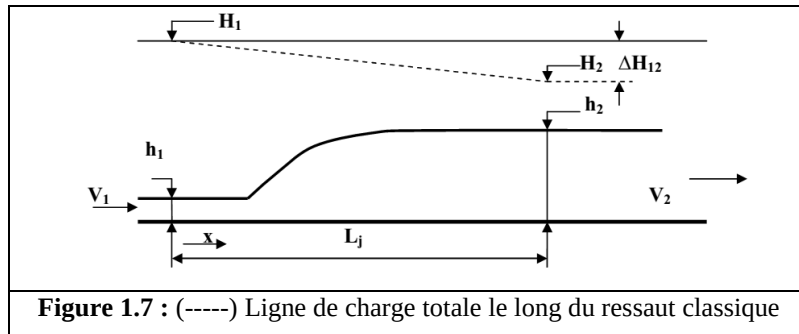
D'où : la charge totale dans la section amont est:

$$H_1 = \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \quad (1.14)$$

Et la charge totale dans la section aval est :

$$H_2 = \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \quad (1.15)$$

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



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

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

Donc en introduisant la relation (1.16) dans (1.13) on obtient une expression classique de la perte de charge due au ressaut en canal rectangulaire de pente faible ou nulle est:

$$\Delta H_{12} = (h_1 - h_2) + \left(\frac{1}{h_1^3} - \frac{1}{h_2^3} \right) \cdot \left(\frac{q^2}{2g} \right) \quad (1.17)$$

q , est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'expression de la quantité de mouvement définie par la relation (1.4).

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

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

$$\Delta H_{12} = \frac{(h_2 - h_1)^3}{(4h_2 \cdot h_1)} \quad (1.19)$$

Donc à partir de la relation (1.20) on peut conclure que la perte de charge due au ressaut classique ne dépend que des hauteurs conjuguées. La capacité de dissipation du ressaut est représentée par η :

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

Le rapport est appelé efficacité du ressaut. Donc pour déterminer les charges totales dans les sections amont et aval on utilise les relations (1.14) et (1.15) et en tenant compte de la relation (1.6) du nombre de Froude on obtiendra :

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

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

Où Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par la relation (1.7) de Bélanger (1828).

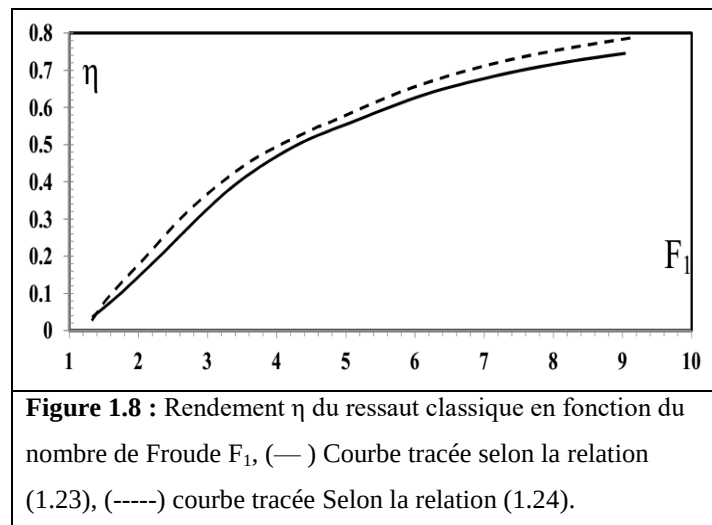
En remplaçant (1.21) et (1.22) dans l'expression du rendement du ressaut (1.20) on obtiendra :

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

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

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

Les relations (1.23) et (1.24) sont représentées graphiquement sur un système des coordonnées cartésiennes, illustrés par la figure (1.8).



D'après l'analyse de la courbe $\eta = f(F_1)$ nous constatons que le rendement η du ressaut classique est supérieur à 50 % pour une valeur de nombre de Froude $F_1 \geq 5$ et que les rendements calculés par l'application de la relation (1.23) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.23) d'autre part; l'écart maximum observé peut atteindre les 2 %.

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, 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.

Enfin, nous pouvons conclure d'une manière générale, que le ressaut hydraulique classique dans un canal de section droite rectangulaire se caractérise par : la hauteur du ressaut, la longueur du rouleau, la longueur du ressaut et le rendement du ressaut.

Chapitre II

Ressaut hydraulique en canal triangulaire

Chapitre II

Ressaut hydraulique en canal triangulaire

2.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons examiner les travaux les plus intéressants, relatifs au ressaut hydraulique, évoluant dans un canal de section droite triangulaire. Nous présenterons à travers cette étude deux types du ressaut hydraulique et leurs caractéristiques.

- Le ressaut hydraulique classique : Nous allons exposer les travaux de Hager et Wanoschek (1987) qui concerne le ressaut "triangulaire" de type A, évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale.
- Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° . Nous allons aborder l'étude de Debabeche et Achour (2006), qui a été consacrée à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique sous l'influence du seuil à parois mince.

2.2. Ressaut hydraulique classique

2.2.1. Approche de Hager et Wanoschek (1987)

Hager et Wanoschek (1987) ont réalisé leurs travaux concernant le ressaut hydraulique classique dans un canal triangulaire de largeur $b=30$ cm dans lequel a été insérée une paroi en PVC inclinée d'un angle de 45° par rapport à l'horizontale. Le profil obtenu est alors de forme semi triangulaire. La paroi verticale du canal est en verre, ce qui permet la visualisation de l'écoulement. L'angle d'ouverture du canal triangulaire est d'environ 45° ($44,7^\circ$). Comme l'indique la figure 2.1.b.

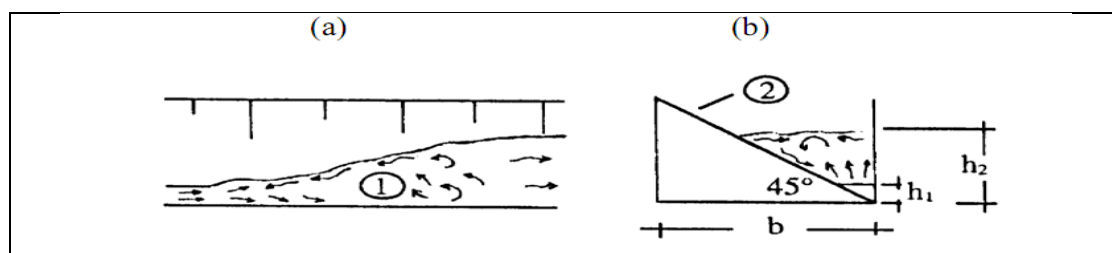


Figure 2.1 : Ressaut en canal semi triangulaire selon Hager et Wanoschek (1987).

(a) vue en plan, (b) coupe transversale.

1. vue en plan du ressaut ; 2. paroi en PVC inclinée de 45° .

2. h_1 et h_2 : hauteurs conjuguées du ressaut.

Les essais ont été effectués sous des débits volumes Q variés entre 4 et 20 l/s suivant des pas de $Q = 2$ l/s. Les vitesses de l'écoulement incident variant entre 1,7 et 8,6 m/s et des profondeurs initiales h_1 entre 70 et 76 cm correspondant à des nombres de Froude F_1 approximativement. En raison du caractère fortement torrentiel de l'écoulement incident, la mesure limnimétrique des profondeurs h_1 a été très délicate.

Selon les auteurs, la mesure limnimétrique des profondeurs de l'écoulement à l'aval du ressaut a été effectuée avec une incertitude de plus ou moins 2 à 3 cm, en raison des grandes perturbations de la surface libre observées surtout à des nombres de Froude $F_1 > 10$. Les vitesses axiales ont été mesurées au moyen d'un tube de Pitot à environ 3 cm de la paroi verticale du canal.

Les essais effectués par Hager et Wanoschek (1987) dans un canal semi- triangulaire d'un angle d'ouverture de 45° , extrapolés ensuite au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° , ont montré que les rapports Y expérimentaux sont légèrement inférieurs aux rapports Y théoriques obtenus par application de la relation (2.2)

2.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées

Le profil triangulaire correspond à un profil trapézoïdal de base $b=0$, soit $M \rightarrow \infty$. le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut est :

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^2 + Y + 1)}{3(Y + 1)} \quad (2.1)$$

Hager et Wanoschek (1987) proposent la relation approchée :

$$Y = \left[\frac{3}{2} F_1^2 - 1 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.2)$$

2.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut

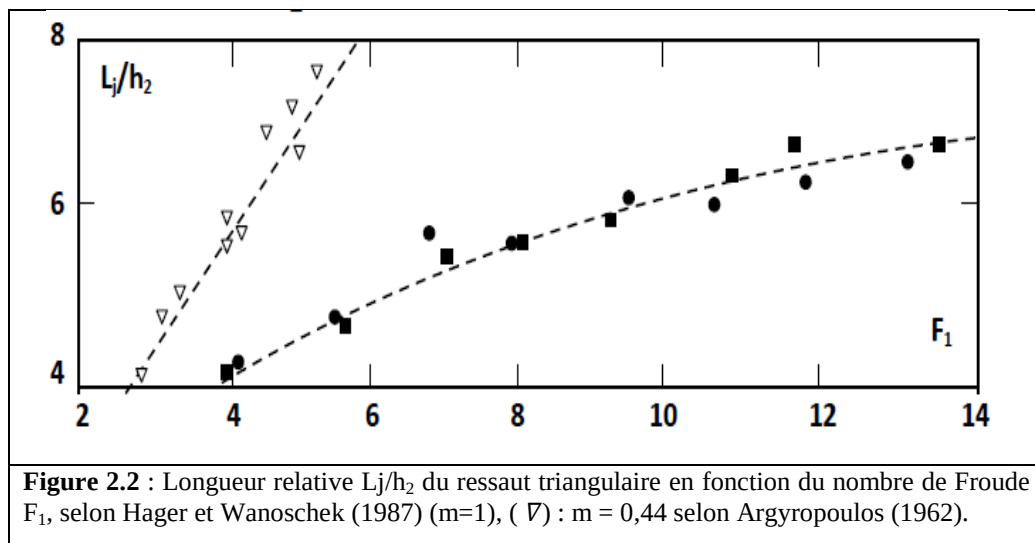
La longueur L_j du ressaut est définie comme étant la distance entre le pied du ressaut et la section à l'aval où la surface libre de l'écoulement est maximale et tend à devenir parallèle au fond du canal. Par contre, la longueur L_r , est la longueur sur laquelle s'étend le rouleau de surface.

La figure (2.2) représente les mesures expérimentales de Hager et Wanoschek (1987) ($m=1$) ainsi que celles d'Argyropoulos (1962) concernant la longueur relative L_j/h_2 du ressaut dans un canal triangulaire, en fonction du nombre de Froude F_1 .

Il apparaît ainsi que la longueur relative L_j/h_2 dépend uniquement de m et de F_1 . La figure (2.2) montre également que la longueur relative L_j/h_2 varie dans le même sens que F_1 et en sens inverse de m . En incluant les mesures d'Argyropoulos (1962), Hager et Wanoschek (1987) proposent de calculer L_j/h_2 par application de la relation :

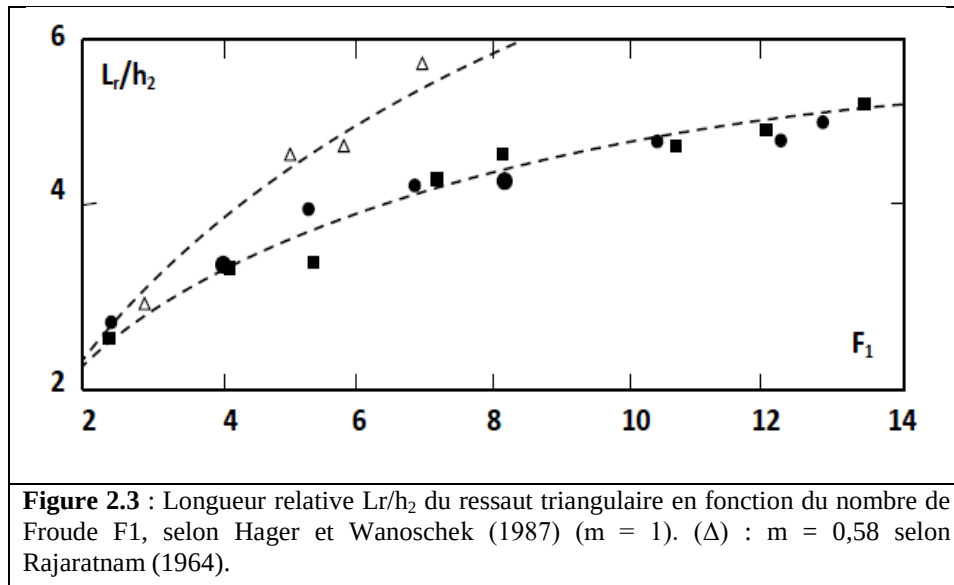
$$\frac{L_j}{h_2} = 2,4(m)^{0,5} F_1^{0,4/m} \quad (2.3)$$

$$0,4 < m \leq 1$$



En ce qui concerne la longueur relative L_r/h_2 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 dans un canal triangulaire, les mesures expérimentales de Rajaratnam (1964) ($m=0,58$) et celles de Hager et Wanoschek (1987) ($m=1$) sont représentées Sur la figure (2.3).

Il apparaît ainsi que la longueur relative L_r/h_2 dépend uniquement de m et de F_1 . La figure (2.3) montre également que la longueur relative L_r/h_2 croît au fur et à mesure que F_1 augmente et qu'elle décroît avec l'augmentation de m . Nous pouvons alors remarquer, comme pour L_j/h_2 , que la longueur relative L_r/h_2 dépend à la fois du nombre de Froude F_1 et du paramètre m .



En tenant compte des mesures de Rajaratnam (1964) ($m=0,58$), Hager et Wanoschek (1987) proposent une relation générale permettant d'évaluer la longueur relative L_r/h_2 en fonction de F_1 et de m :

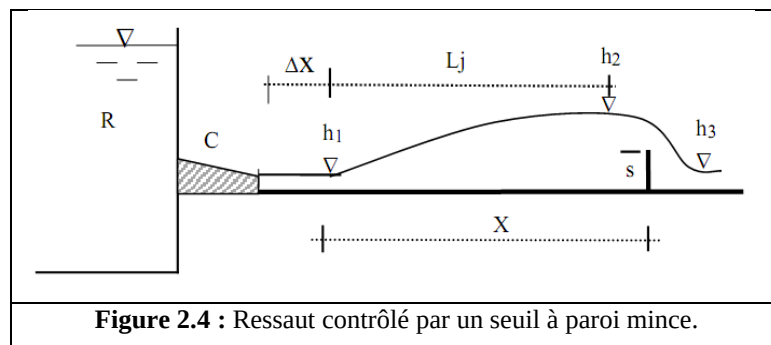
$$\frac{L_r}{h_2} = 1,8 \cdot (m)^{0,5} \cdot F_1^{0,4/m} \quad , \quad 0,4 < m \leq 1 \quad (2.4)$$

Ainsi, dans la gamme pratique des nombres de Froude de l'écoulement incident tels que $6 \leq F_1 \leq 9$, la longueur relative L_r/h_2 du rouleau, pour le cas d'un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° ($m=1$), est : $3,7 < L_r/h_2 < 4,35$

2.3. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil

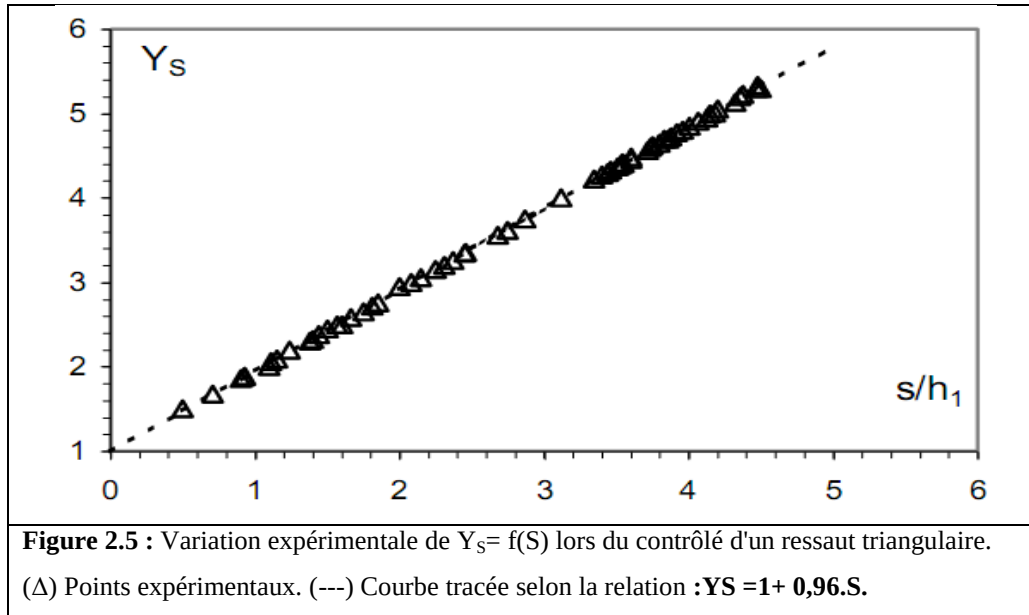
2.3.1. Etude d'Achour et Debabeche (2003)

2.3.1.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut



En 1996 Debabeche et Achour ont examiné le ressaut dans un canal triangulaire symétrique d'angle d'ouverture de 90° . Les essais expérimentaux ont montré que la courbe unique du rapport Y_s en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil peut être représentée sur la figure (2.5). Achour et Debabeche (1996) ont déterminé la relation suivante :

$$Y_s = 1 + 0,96 \cdot S \quad (2.5)$$



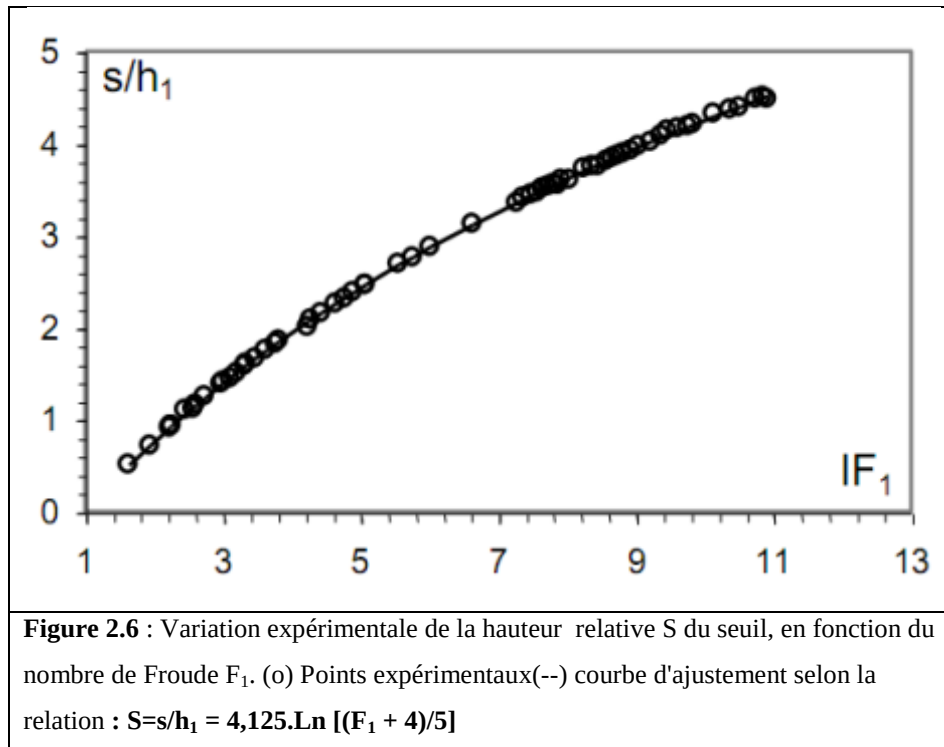
2.3.1.2. Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude

Achour et Debabeche (2003) ont montré précédemment que l'influence du seuil sur la hauteur finale du ressaut, et de même pour le rapport Y , n'était pas significative. Ils ont trouvé également qu'une relation unique existe entre la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil et le rapport Y_s des hauteurs conjuguées du ressaut.

Ces considérations laissent les auteurs penser qu'une relation unique peut être obtenue entre la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil et le nombre de Froude F_1 . La figure (2.6) montre en conséquence que les points de mesures expérimentaux obtenus suivent, dans leur totalité, la variation d'une courbe unique de type logarithmique. L'ajustement des couples de valeurs (F_1, S) , suivant la méthode des moindres carrés non linéaires, à donner la relation :

$$S = s/h_1 = 4,125 \cdot \ln [(F_1 + 4)/5] \quad (2.6)$$

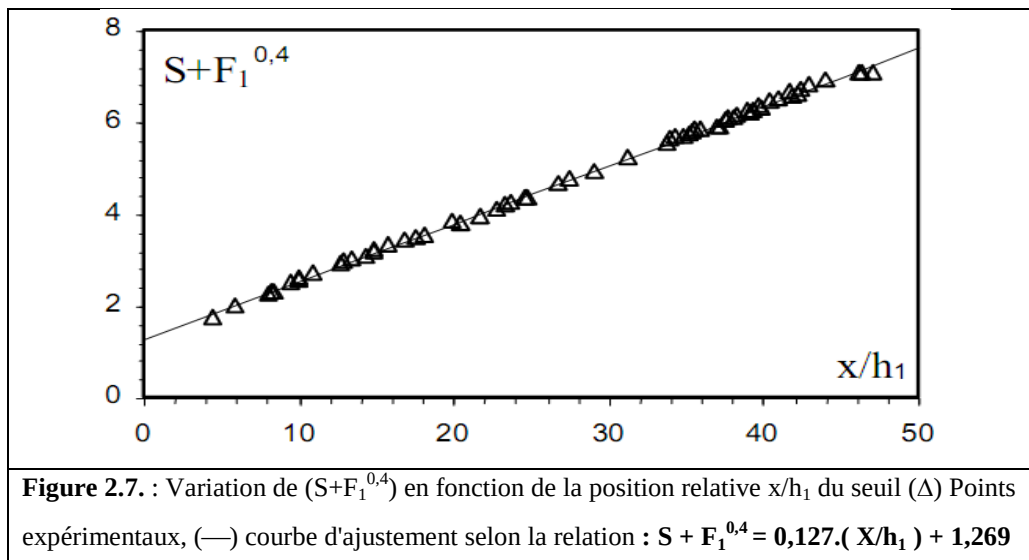
« Ln » désigne le logarithme népérien.



2.2.1.3. Relation générale régissant le contrôlé du ressaut

Achour et Debabeche (2003) ont montré, aussi, la relation générale régissant le contrôlé du ressaut triangulaire en présence d'un seuil à paroi mince s'écrit :

$$S + F_1^{0,4} = 0,127.(X/h_1) + 1,269, \quad X/h_1 \geq 4 \quad (2.7)$$



2.4. CONCLUSION

A travers ce chapitre, nous avons cité en premier lieu, les travaux de Hager et Wanoschek (1987) ; ces études ont concerné le ressaut triangulaire classique évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° .

Nous avons abordé en second lieu les travaux, dans le domaine du ressaut hydraulique en canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° , particulièrement ceux de Debabeche et Achour (2003) ; les auteurs ont contribué à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince . Les recherches expérimentales, effectuées par les auteurs, ont été consacrées à déterminer l'influence du seuil sur le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.

Chapitre III

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL EN "U"

Chapitre III

Ressaut hydraulique en canal en " U "

3.1. Introduction

Dans ce chapitre , nous avons abordé les travaux de GHOMRI et RIGUET (2012) . Cette étude a pour objectif d'étudier et d'analyser expérimentalement le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal profilé en "U" à fond rugueux., liant les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'effet de la rugosité du fond du canal.

3.2. Les caractéristiques adimensionnelles du ressaut dans un canal profilé en "U".

Le ressaut hydraulique est utilisé pour la dissipation de l'énergie cinétique générée par l'écoulement torrentiel, à l'aval d'un ouvrage hydraulique, afin d'éviter d'importantes modifications au niveau du lit du bassin d'amortissement. Ce phénomène trouve également son intérêt dans les raies d'irrigation, afin de surélever le plan d'eau à l'aval pour un éventuel amorçage d'un siphon. L'étude se propose d'étudier et apparaître les effets des rugosités testées expérimentalement sur le ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal profilé en "U" à fond rugueux.

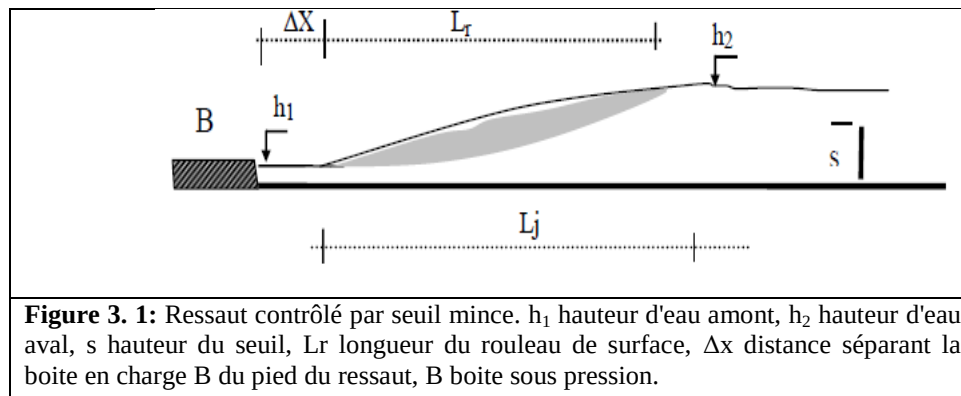
Les caractéristiques adimensionnelles du ressaut concernées par cette étude sont;

- le nombre de Froude F_1 ou le débit relatif Q^* ;
- la hauteur relative amont $y_1=h_1/D$ (h_1 est la hauteur au pied du ressaut, D est la largeur canal);
- le rapport $Y=h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut;
- la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil à paroi mince ;
- la longueur relative L_j/h_1 du ressaut ; la longueur relative L_r/h_2 du rouleau;
- la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$, la hauteur relative amont $y_1 = h_1/D$;
- la rugosité relative $\varepsilon^*=\varepsilon/D$.

3.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

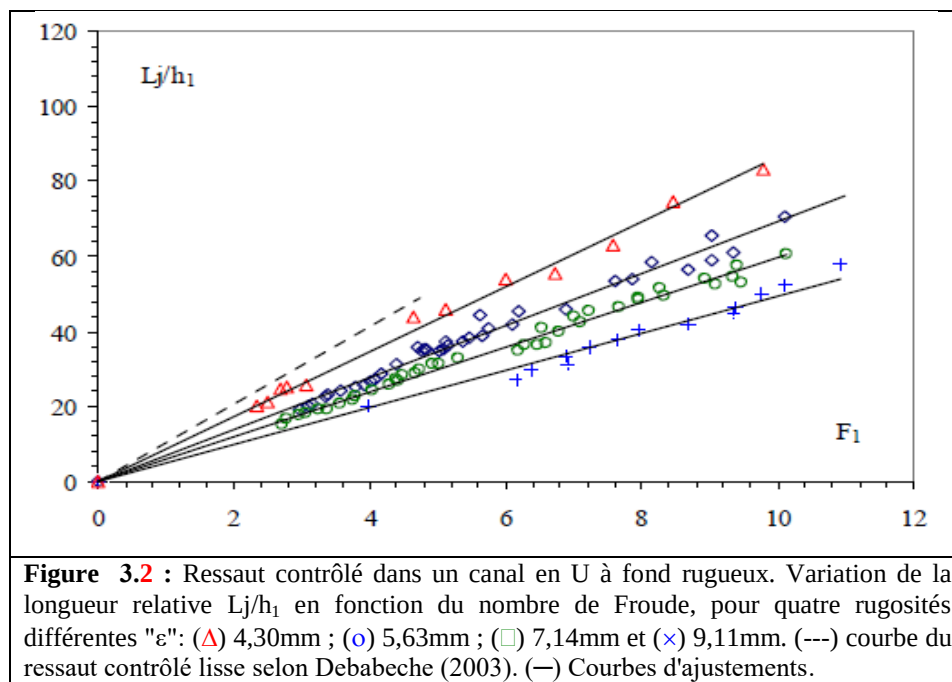
3.3.1. Longueur relative de ressaut L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 .

La Figure (3.1) montre la représentation graphique de la variation de L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour quatre valeurs de rugosités absolues $\varepsilon = 4,30$ mm; $\varepsilon = 5,63$ mm; $\varepsilon = 7,14$ mm et $\varepsilon = 9,11$ mm.



On remarque aussi quatre nuages de points, où chacun dépend d'une rugosité bien déterminée. Par ailleurs, l'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut à fond rugueux, montre qu'à chaque valeur de rugosité " ε " correspond une courbe de type linéaire de la forme (Figure 3.2):

$$\frac{Lj}{h_1} = a_1 (F_1)$$



L'analyse de ces courbes montre que la longueur relative Lj/h_1 augmente au fur et à mesure que le nombre de Froude augmente et ceci pour toutes les rugosités. En outre, la rugosité ε augmente avec la diminution du rapport de la longueur relative Lj/h_1 , ceci est dû à la rugosité du fond du canal, qui provoque une dissipation d'énergie. L'équation liant la longueur relative amont Lj/h_1 , le nombre de Froude F_1 et la rugosité relative ε/D s'écrit alors:

$$\frac{L_j}{h_1} = 0,44 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{-0,73} F_1 \quad (3.1)$$

avec : $0,0175 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$

La Figure (3.3) montre aussi que la relation $L_j/h_1 = f(\varepsilon/D, F_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice

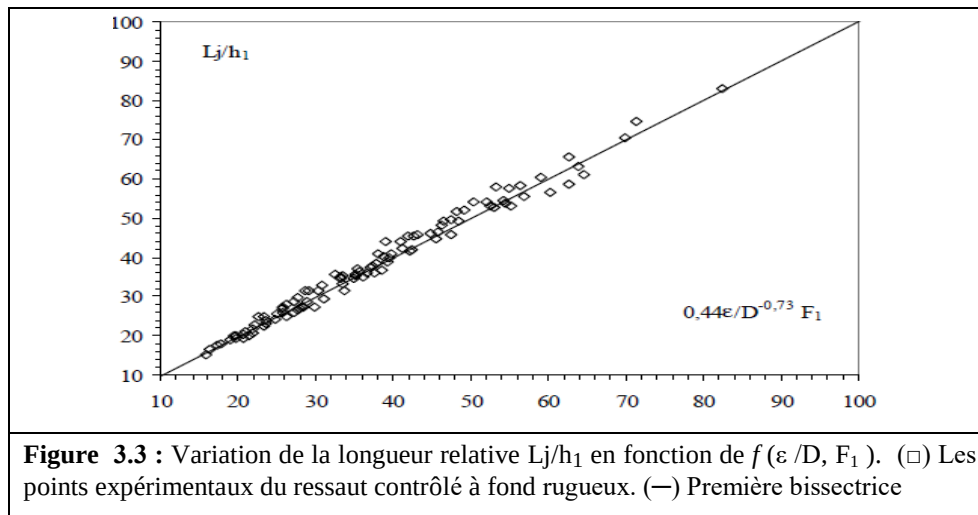


Figure 3.3 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de $f(\varepsilon/D, F_1)$. ($\square$) Les points expérimentaux du ressaut contrôlé à fond rugueux. (—) Première bissectrice

3.3.2. Longueur relative du rouleau L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

La Figure (3.4) présente la variation de la longueur du rouleau de surface L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude incident pour les quatre valeurs de rugosités absolues testées : $\varepsilon = 4,30$ mm ; $\varepsilon = 5,63$; $\varepsilon = 7,14$ mm et $\varepsilon = 9,11$ mm. L'analyse des points de mesures expérimentales, montre que chaque valeur de rugosité " ε " correspond une courbe de type linéaire de la forme :

$$\frac{L_r}{h_1} = a_2 (F_1)$$

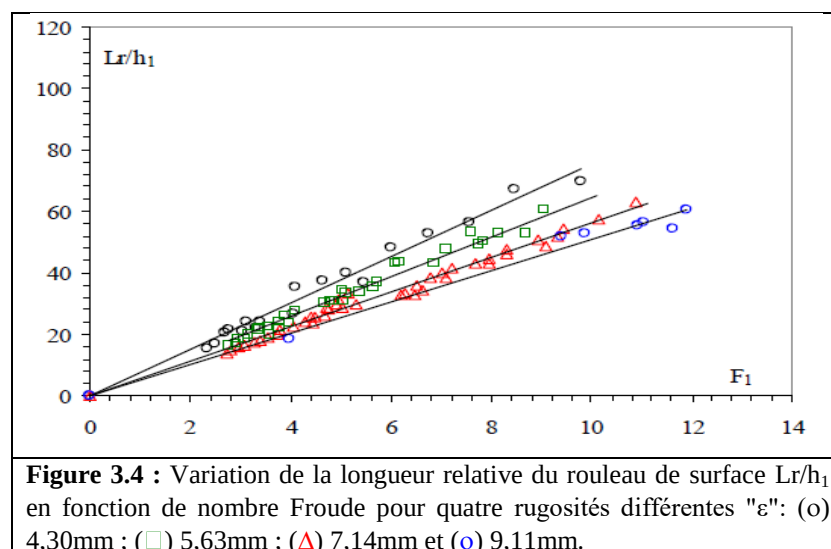
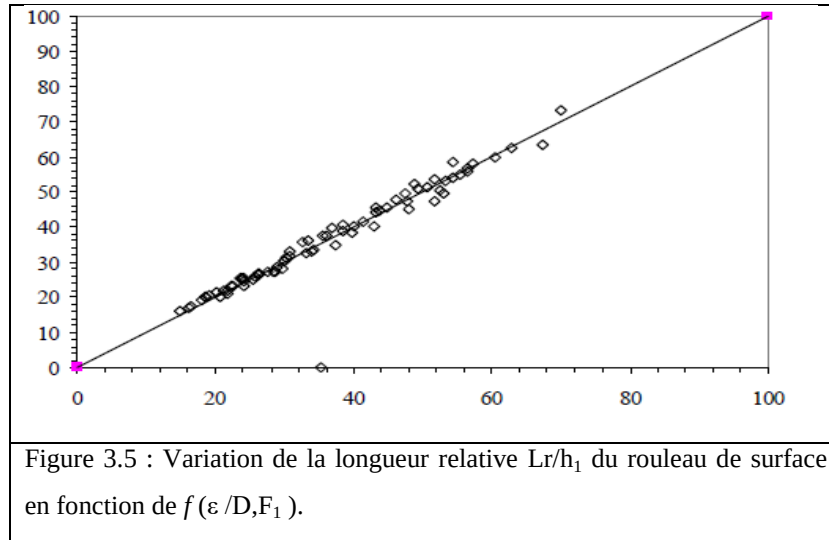


Figure 3.4 : Variation de la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 en fonction de nombre Froude pour quatre rugosités différentes " ε ": (o) 4,30mm ; ($\square$) 5,63mm ; (Δ) 7,14mm et (o) 9,11mm.

La figure (3.5) présente clairement la relation $Lr/h_1 = f(\varepsilon/D, F_1)$ qui ajuste les points de mesures expérimentales avec une très bonne corrélation. Ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice.

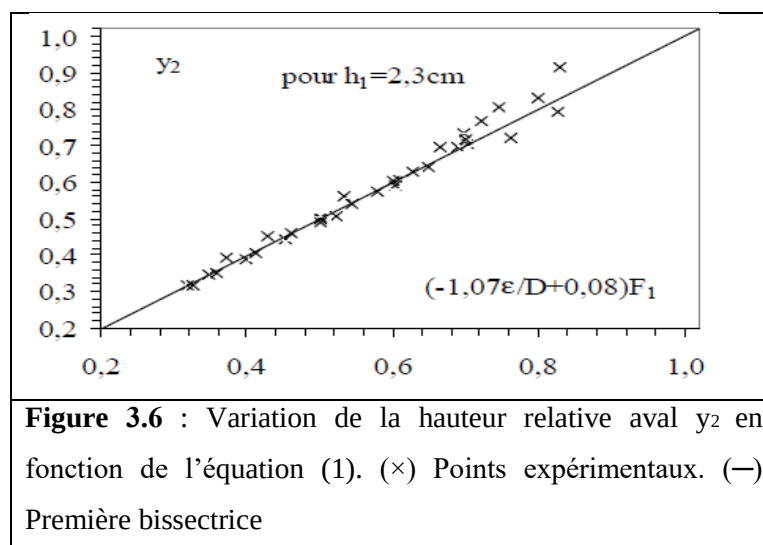


3.3.3. L'effet de la rugosité sur la hauteur relative aval du ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en "U" à fond rugueux .

3.3.3.1 Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction du nombre de Froude F_1

La figure (3.6) indique que la relation $y_2 = f(\varepsilon/D, F_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés donne l'équation (3.2) :

$$y_2 = (-1,07\varepsilon^* + 0,08) F_1 \quad (3.2)$$



3.4. CONCLUSION

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut hydraulique en fonction de nombre de Froude F_1 incident pour quatre valeurs de rugosité. On remarque quatre nuages de points différents correspondent chacun à une valeur bien déterminée de la rugosité. Par ailleurs, la longueur relative L_j/h_1 augmente avec l'accroissement de nombre de Froude F_1 et réduit avec l'augmentation de la rugosité imposée. D'autre part, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal profilé en "U" à fond rugueux, montre qu'un ajustement de type puissance est possible entre L_j/h_1 et F_1 . En plus, nous avons aussi analysé expérimentalement les mesures des Longueurs relatives du rouleau L_r/h_1 de surface en fonction du nombre de Froude F_1 incident de l'écoulement, ainsi cette analyse nous a permis d'obtenir une relation de type puissance entre la longueur relative du rouleau et du nombre de Froude incident de l'écoulement. Par ailleurs l'augmentation de la rugosité relative ϵ/D entraîne la réduction de la longueur relative du rouleau L_r/h_1 de surface.

Chapitre IV

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOIDAL

Chapitre IV

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOIDAL

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons citer quelques travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. Nous citerons particulièrement ceux effectués par Silvester (1964), Wanoschek et Hager (1989) sur le ressaut classique.

Les travaux entrepris par Silvester (1964) sur le ressaut hydraulique en canal de section prismatique trapézoïdal ont notamment contribué à définir la longueur du ressaut et l'ont exprimée sous la forme adimensionnelle.

$$L_J / (h_2 - h_1) = 7,1 \cdot (1 + 10M) \quad (4.1)$$

$$\text{Avec } M = mh_1/b$$

où

m : est la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal,

b : la base du trapèze

h_1, 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.

Ces considérations laissent penser que le ressaut en canal triangulaire devrait s'étendre sur une longueur beaucoup plus grande que son homologue du rectangulaire.

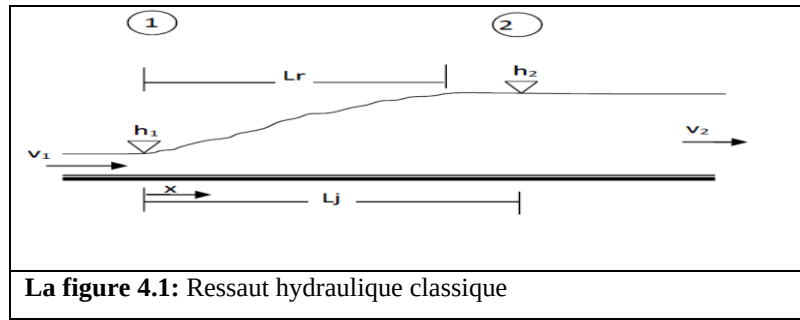
Plus récemment, Wanoschek et Hager (1989) ont décrit d'une manière détaillée le comportement du ressaut, dans un canal trapézoïdal, d'angle d'inclinaison de 45° ($m = 1$) et pour des valeurs de $M \leq 0,4$. Les observations ont révélé l'existence d'un rouleau du fond, jusqu'alors jamais détecté, et dont les caractéristiques géométriques, telles que la longueur à la base, la hauteur ainsi que la position sont définies.

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

4.2. Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal classique.

4.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées

La figure (4.1) montre un ressaut classique évoluant entre sa section initiale et finale 1 et 2.



L'aire A de la section mouillée de l'écoulement dans un canal trapézoïdal s'exprime par :

$$A = b \cdot h + m \cdot h^2$$

b : la base de la section du canal trapézoïdal.

h : la hauteur de l'eau

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

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

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

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

L'application de cette équation nécessite quatre hypothèses simplificatrices:

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

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

$$\frac{b \cdot h_1^2}{2} + \frac{m \cdot h_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2)} = \frac{b \cdot h_2^2}{2} + \frac{m \cdot h_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b \cdot h_2 + m \cdot h_2^2)} \quad (4.2)$$

h_1 et h_2 sont respectivement les hauteurs initiale et finale du ressaut, et g est l'accélération de la pesanteur.

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

$$F_1 = \sqrt{\frac{Q^2 [b(1 + 2M)]}{g [b h_1 (1 + M)]^3}} \quad (4.3)$$

L'équation (4.2) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (4.4)$$

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

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

4.2.1.1. Cas particulier du canal rectangulaire

pour le cas du ressaut hydraulique évaluant en canal rectangulaire, M ($m = 0$ et $M = 0$). Belanger (1828) propose la relation suivante pour déterminer le rapport des hauteurs conjuguées:

$$Y = 1/2((1+8F_1^2)^{1/2} - 1) \quad (4.5)$$

4.2.1.2. Cas particulier du canal triangulaire

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

$$Y = (3/2F_1^2 - 1)^{1/3} \quad (4.6)$$

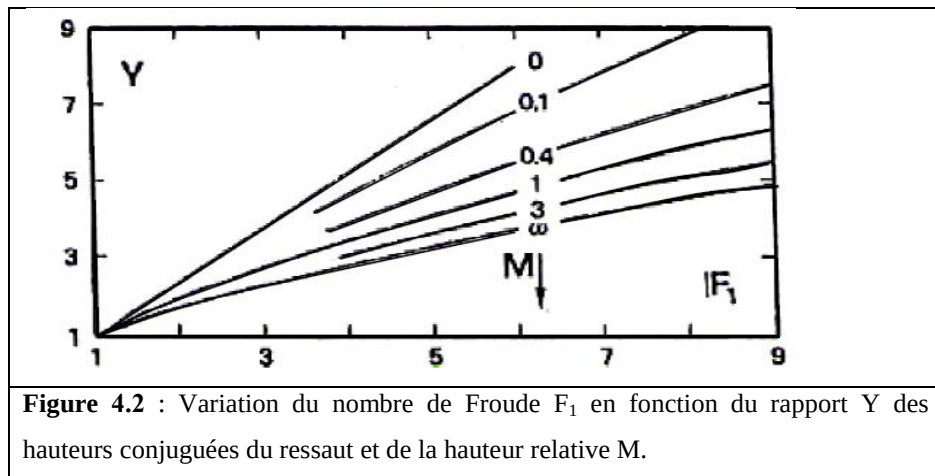


Figure 4.2 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M .

4.2.2. Longueur du ressaut

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

Hager et Wanoschek (1989) propose la formule suivante :

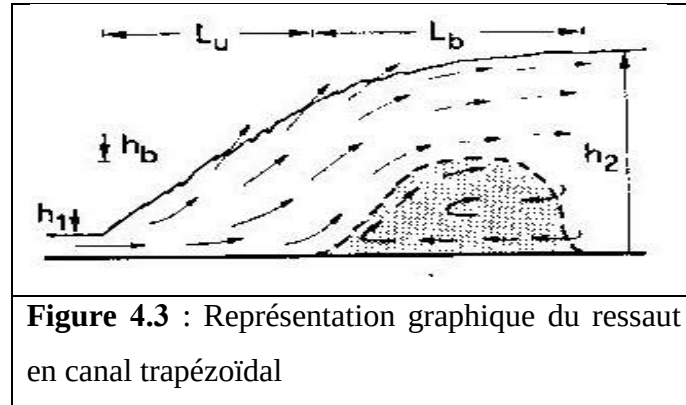
$$\frac{L_j}{(h_2 - h_1)} = 7,1. (1 + 10M) \quad (4.7)$$

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

L_u : distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau du fond.

L_b : longueur du rouleau du fond.

h_b : hauteur maximale du rouleau du fond (Figure 4.3)



4.2.3. Perte de charge relative du ressaut hydraulique

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

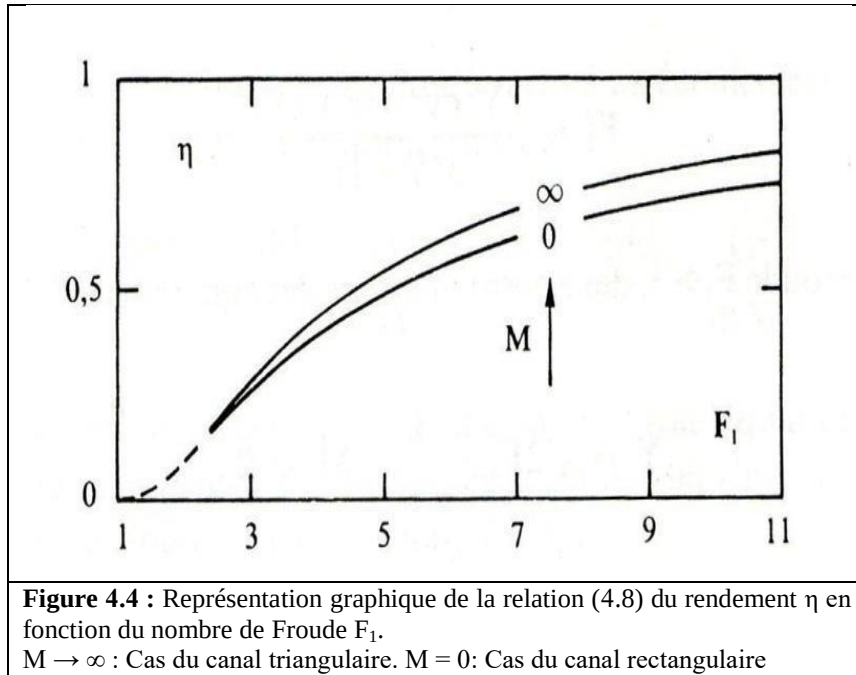
La perte de charge relative est par définition comme étant le rapport de ΔH à la charge initiale H_1 :

$$\eta = \Delta H / H_1 = (1 - H_2 / H_1)$$

la relation générale de la perte de charge relative du ressaut hydraulique est donnée par :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \left[\frac{(1+M)^3}{(1+2M)(1+M)^2} \right]}{1 + \frac{F_1^2}{2} \frac{(1+M)}{(1+2M)}} ; 0 < \eta < 1 \quad (4.8)$$

La représentation graphique (figure 4.4) de la relation générale (4.8), montre que pour le même nombre de Froude F_1 , le rendement du ressaut triangulaire est plus élevé que celui du rectangulaire ou du trapézoïdale. Comparé au rendement du ressaut rectangulaire, le rendement du ressaut trapézoïdal est environ 10 % plus important.



Sinniger (1985) a proposé une bonne approximation de cette équation pour le cas particulier du canal rectangulaire.

$$\eta = (1 - 2F_1^{1/2}) ; F_1 > 2,5 \quad (4.9)$$

Pour $F_1 > 3$, Hager et Sinniger (1985) proposent la relation approchée suivante pour le cas particulier du canal triangulaire :

$$\eta = (1 - (12/F_1^4)^{1/3})^2 \quad (4.10)$$

4.2.4. Profil de surface généralisé du ressaut

$$X = x / L_j \text{ et } Y(x) = [h(x) - h_1] / (h_2 - h_1)$$

L'emploi des variables X et $Y(x)$ permet de tracer le long de l'axe longitudinal du canal, le profil de surface du ressaut sous la forme adimensionnelle ; $h(x)$ désigne la hauteur du ressaut à la distance x comptée à partir du pied du ressaut. Pour $x = 0$, correspondant à $X = 0$, nous pouvons écrire que $h(x) = h_1$ et $Y(x) = 0$.

Par contre, pour $x = L_j$, correspondant à $X = 1$, nous pouvons écrire que $h(x) = h_2$ et $Y(x) = 1$. Les variables adimensionnelles X et $Y(x)$ définissant le profil de surface du ressaut le long de l'axe longitudinal du canal sont telles que $0 \leq X \leq 1$ et $0 \leq Y \leq 1$.

4.3. Conclusion

Ce chapitre a pour objectif de faire le point sur les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. La détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique, a été souvent l'objectif principal des travaux entrepris par Hager et Wanoschek (1989).

Dans ce chapitre nous avons montré 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.

Conclusion de la première partie

Cette première partie de notre étude a pour but de présenter les travaux les plus importants dans le domaine du ressaut hydraulique.

Le premier chapitre, est consacré au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire. Ce type du ressaut a fait la base théorique des études dans ce domaine.

On a commencé par l'équation de base, démontrée par Bélanger (1828) ; cette dernière est obtenue par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut classique, cette relation a exprimé sur le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction de nombre de Froude F_1 .

A travers les études de Hager et al (1990), sur le ressaut hydraulique, les auteurs ont montré que l'estimation des caractéristiques géométriques du ressaut, telle que la longueur du ressaut L_j et la longueur L_r du rouleau ne s'effectuent que par voie expérimentale.

Pour le deuxième chapitre, nous avons abordé les travaux les plus récents, dans le domaine du ressaut hydraulique en canal triangulaire. Nous avons cité les travaux de Debabeche et Achour qui ont contribué à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince. Leurs recherches expérimentales, ont été consacrées à la détermination de l'influence du seuil sur le rapport des hauteurs conjuguées Y .

Dans le troisième chapitre , nous avons abordé les travaux de GHOMRI et RIGUET (2012) . Cette étude a pour objectif de passer en revue les travaux expérimentaux du ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal profilé en 'U' à fond rugueux.

En fin, le dernier chapitre de cette étude, consiste à faire le point sur les travaux principaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique classique en canal trapézoïdal. La détermination des caractéristiques du ressaut, a été souvent l'objectif principal des travaux entrepris par : Hager et Wanoschek (1989).

PARTIE II

CHAPITRE I

DESCRIPTION DU MODELE EXPERIMENTAL

Chapitre I

Description du modèle expérimental

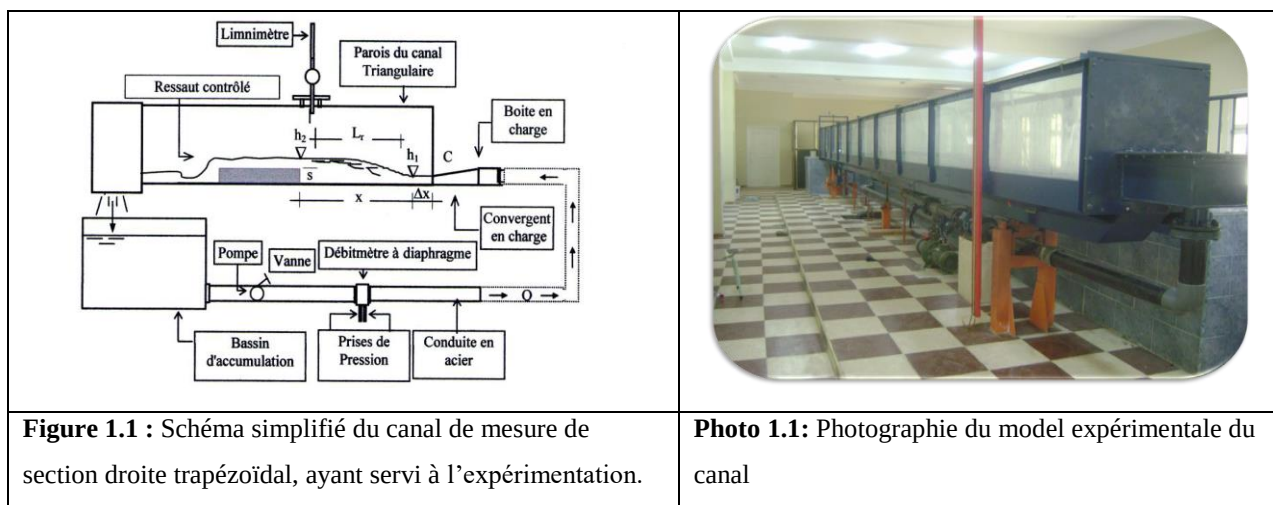
1.1. Introduction

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

1.2. Description du modèle

Le modèle (figure1.1 et photo1.1) est constitué essentiellement d'un canal de mesure en tôle et en plexiglas de 4 m de longueur avec une profondeur de 35 cm ainsi qu'un angle d'inclinaison des parois de 45° et une base de 15 cm de largeur à pente nulle. Les plaques en plexiglas permettant les prises de vue et observations. Les panneaux sont reliés entre eux par collage au silicone. L'étanchéité est assurée par des joints en caoutchouc et par le silicone. Le canal de mesure est surélevé sur des pieds-supports métalliques et maintenu horizontal à une pente nulle fixe. Un ruban gradué est collé pour effectuer des mesures des grandeurs longitudinales.

Le bassin d'accumulation de 350 litres de volume posé sur le sol et relié à un réservoir d'accumulation qui permet la mise en service des installations en circuit fermé . ce réservoir est doté d'une pompe horizontale dont le débit maximal est de 30 l/s .La pompe refoule dans la boîte sous pression au moyen d'une conduite en plastique de 110 mm de diamètre .



1.3. Canal de mesure

La longueur du canal de mesure est de 4,00 m , une profondeur de 0,35 m avec un angle d'inclinaison des parois de 45° et une base de 15 cm de largeur à pente nulle. Ce canal est collé par un ruban gradué pour effectuer des mesures des grandeurs longitudinales.

1.4. Appareillages de mesure

1.4.1. Débitmètre

Sur la conduite de refoulement est installé un débitmètre à diaphragme, avec deux tubes piézométriques fixés sur une planche verticale entre les deux tubes une règle graduée et collée ce qui permet la lecture de la différence de niveau Δh dans les tubes.

L'étalonnage du débitmètre est effectué après une série de mesures de débit à l'aide d'un déversoir triangulaire. L'ajustement de la courbe $Q = f(\Delta h)$ a donné la relation suivante :

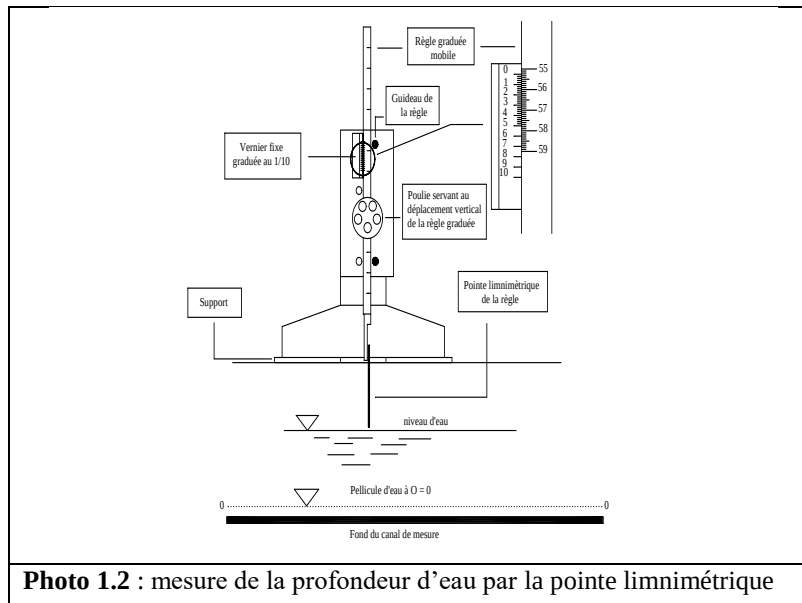
$$Q = 0,02218 \Delta h^{0,5083} \quad (1.1)$$

Q : Le débit en (m³/s)

Δh : La différence de niveau en mètre .

1.4.2. limnimètre

Le limnimètre (photo 1.2) est composé d'un tube en aluminium d'une longueur de 70 cm. Une réglette graduée de la précision à la lecture est de 0, 5 mm. Les limnimètres sont installés sur le canal de mesure.



1.5. Les seuils minces

Les seuils utilisés dans notre dispositif expérimental, sont façonnés en fer de forme trapézoïdale. Dans le but d'obtenir un nombre important de points de mesure de différentes

hauteurs. Dans nos essais nous avons préparé douze seuils, $s = 5,5 \text{ cm}$; $6,1 \text{ cm}$; $7,4 \text{ cm}$; 8 cm ; $9,2 \text{ cm}$; 10 cm ; 11 cm ; 14 cm ; 15 cm ; 16 cm ; $18,4 \text{ cm}$ et 20 cm .

1.6. Description des essais

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal à pente nulle. Les caractéristiques étudiées (figure 1.2) sont : le débit volume Q , la hauteur initiale h_1 , mesurée au pied de ressaut, la hauteur finale h_2 , mesurée au droit de la longueur du ressaut, la hauteur s du seuil, la longueur L_r du rouleau de surface, la longueur L_j du ressaut, mesurée dans le même endroit de la hauteur finale h_2 .

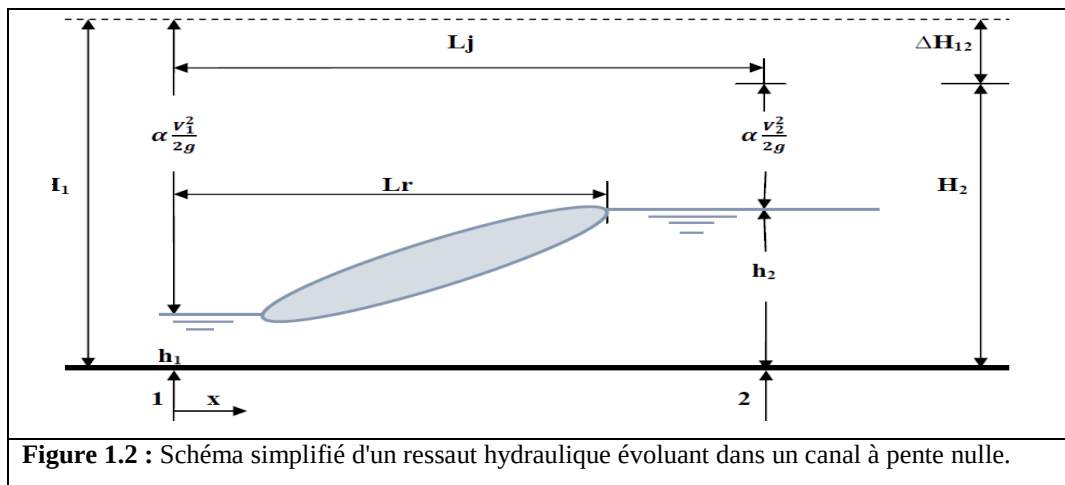


Figure 1.2 : Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal à pente nulle.

Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants :

- le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident;
- le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut;
- la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil;
- la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut;
- le coefficient de forme du canal $M = mh_1/b$.

L'expérimentation a été menée sous cinq hauteurs initiales : $h_1 \text{ (mm)} = 20 ; 30 ; 45 ; 60$ et 70 mm . Pour une gamme pratique de nombres de Froude incident a été ainsi obtenue : $1 < F_1 < 15$.

Les seuils de différentes hauteurs " s " ont été testés afin d'observer **leur influence sur le contrôle du ressaut**, douze seuils ont ainsi été confectionnés, dont la hauteur " s " varie entre $5,5 \text{ cm}$ et 20 cm . ($5,5 ; 6,1 ; 7,4 ; 8 ; 9,2 ; 10 ; 11 ; 14 ; 15 ; 16 ; 18,4$ et 20 cm).

Pour une hauteur h_1 et pour une hauteur "s" et une position x du seuil de l'écoulement incident, l'augmentation du débit volume Q , provoque l'apparition d'un ressaut. Le couple de valeur (Q, h_1) permet en outre le calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. L'accroissement de F_1 entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval ainsi l'augmentation de sa longueur du rouleau L_r et du ressaut L_j .

Pour obtenir les résultats expérimentaux, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Fixer la hauteur initial du ressaut hydraulique h_1
- Mesure de la longueur L_r du rouleau ;
- Mesure de la longueur L_j du ressaut ;
- Mesure de la hauteur géométrique s du seuil ;
- Mesure de la hauteur conjuguée aval h_2 du ressaut ;
- Mesure du débit volume ;
- Calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par application de la relation :

$$F_1 = \sqrt{\frac{Q^2 [b(1 + 2M)]}{g [bh_1 (1 + M)]^3}} \quad (1.2)$$

1.7. Conclusion

Notre travail a pour but de contribuer à l'étude **expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal de section droite trapézoïdal à pente nulle.**

Nous avons décrit dans un premier temps, le modèle physique qui nous a servi de banc d'essai, ainsi que les instruments et l'appareillage utilisé pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique.

Dans un second temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie pendant les essais. En passant en troisième temps aux résultats expérimentaux, cinq (05) hauteurs initiales h_1 ont été testées sur douze (12) seuils s de hauteurs différentes. Une large gamme des nombres de Froude incident a été ainsi obtenue.

Chapitre II

Etude Expérimentale

Chapitre II

Etude Expérimentale

2.1. Introduction

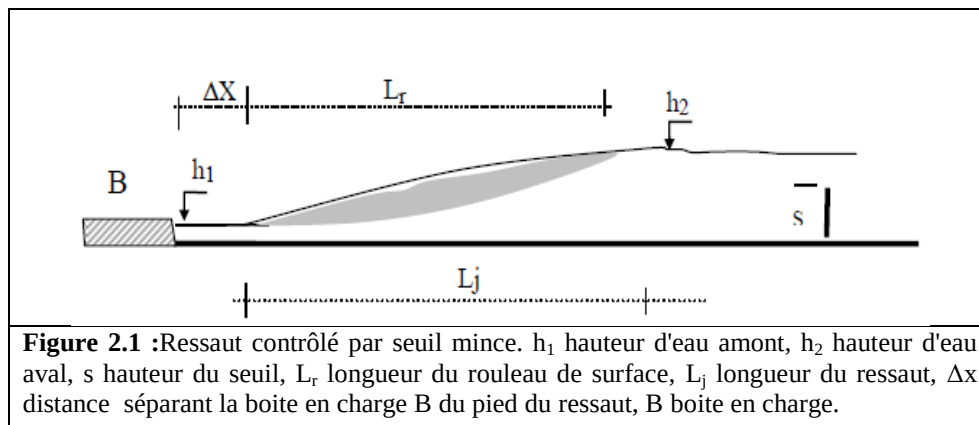
L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal trapézoïdal à angle d'inclinaison des talus de 45° . L'expérimentation a été menée sous cinq hauteurs initiales h_1 : 20 ; 30 ; 45 ; 60 et 70 mm. Pour une gamme pratique de nombres de Froude incident a été ainsi obtenue : $1 < F_1 < 15$.

2.2. Détermination expérimentale de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal trapézoïdal.

Les caractéristiques adimensionnelles essentielles, intervenant au phénomène du ressaut dans un canal trapézoïdal sont:

- le nombre de Froude F_1 ou le débit relatif Q^* ;
- le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut;
- la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil;
- et la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut.

La figure (2.1) montre clairement les différents paramètres qui constituent le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince.



2.2. 1. Hauteur relative du seuil:

La hauteur relative S du seuil est le rapport de la hauteur s du seuil sur la hauteur initiale du ressaut hydraulique h_1 . $S = s/h_1$

Les représentations graphiques des points expérimentaux (les figures 2-2 à 2-6) illustrent la variation de la hauteur relative S du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les cinq ouvertures h_1 : 20 ; 30 ; 45 ; 60 et 70 mm.

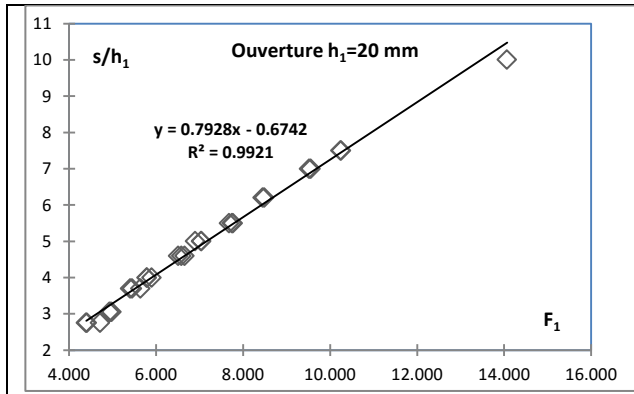


Figure 2.2: Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=20$ mm (—) Courbes d'ajustement.

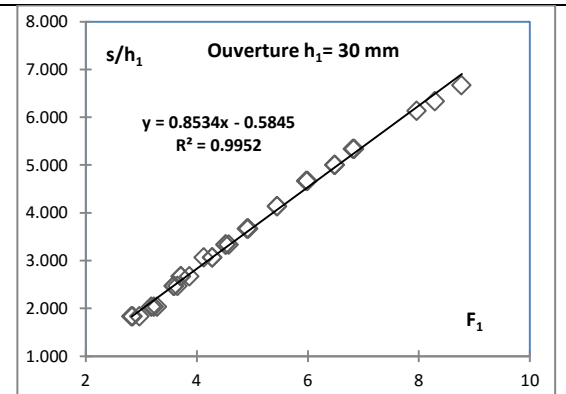


Figure 2.3 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=30$ mm, (—) Courbes d'ajustement.

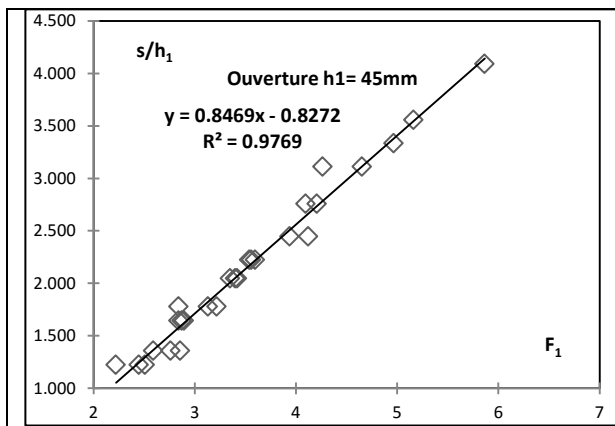


Figure 2.4: Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour l'ouverture $h_1=45$ mm (—) Courbes d'ajustement.

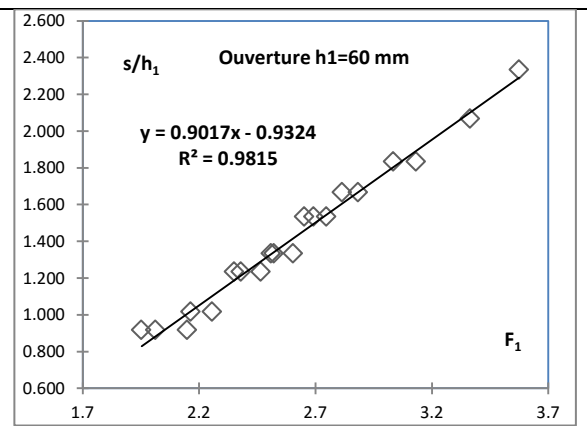


Figure 2.5: Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour l'ouverture $h_1=60$ mm (—) Courbes d'ajustement.

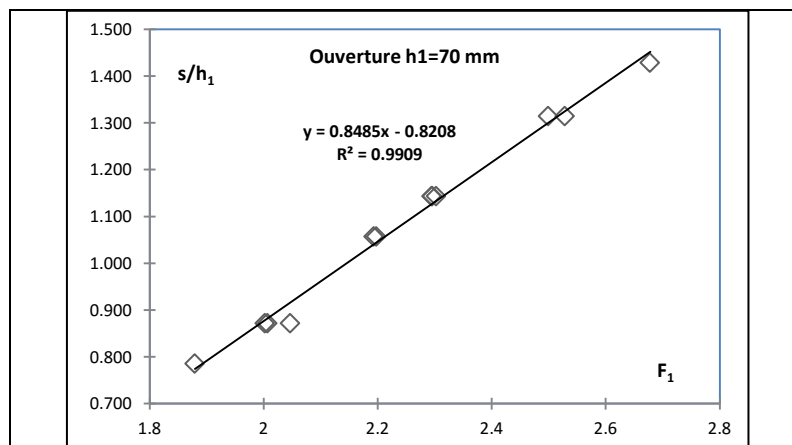


Figure 2.6 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour l'ouverture $h_1=70$ mm ; (—) Courbes d'ajustement.

Selon les figures (2.2 à 2.6), l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire de la forme : $s/h_1 = A (F_1) + B$

Le tableau (2.1) regroupe les paramètres a et b pour les cinq ouvertures.

Tableau 2.1 : Valeurs des paramètres a et b

Ouverture h_1 (mm)	a	b
20	0,792	-0,674
30	0,853	-0,584
45	0,846	-0,827
60	0,901	-0,932
70	0,848	-0,820

Le tableau (2.1) permet de calculer A et B, $A = \sum a_i / n$, $B = \sum b_i / n$

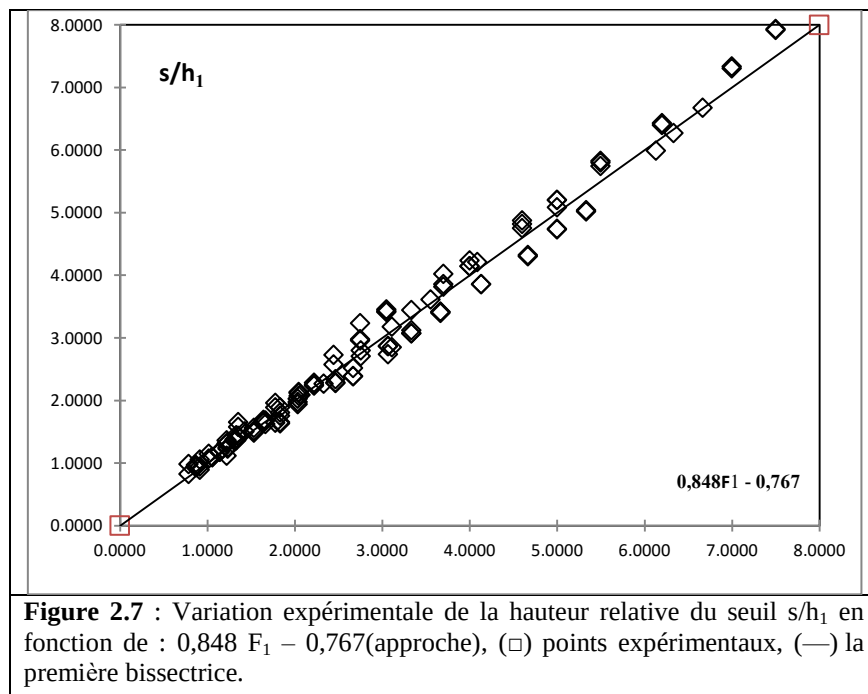
$$A = 0,848 \quad / \quad B = -0,767$$

En remplaçant les paramètres A et B par leurs valeurs respectives dans la relation $s/h_1 = A(F_1) + B$, on obtient la formule expérimentale générale suivante :

$$S = 0,848 F_1 - 0,767 \quad (2.1)$$

$$\text{avec } 1,87 < F_1 < 15$$

La figure ci-dessous (2.7) illustre une relation unique qui existe entre la hauteur relative S du seuil et le nombre de Froude F_1 . Cette figure montre que toutes les mesures expérimentales s/h_1 sont fiables car leurs valeurs en majorités tournent autour de la première bissectrice en les comparant avec les valeurs de l'approche obtenues.



2.2. 2. Rapport des hauteurs conjuguées:

Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y est le rapport de la hauteur d'eau aval du ressaut hydraulique h_2 sur la hauteur initial du ressaut hydraulique h_1 . ($Y = h_2/h_1$)

Les représentations graphiques des points expérimentaux ci-dessous (figure 2-8 à 2.12) illustrent clairement la variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les cinq ouvertures h_1 : 20 ; 30 ; 45 ; 60 et 70 mm.

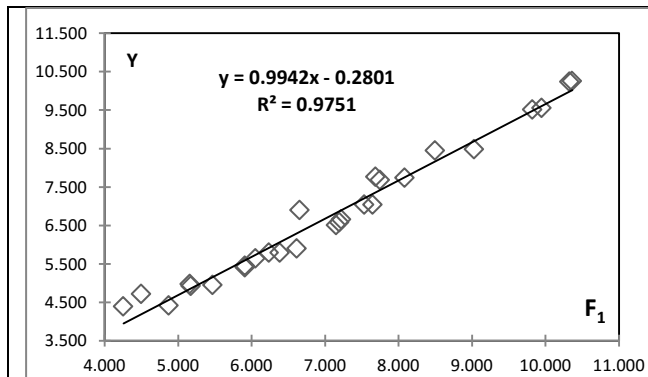


Figure 2.8: Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=20$ mm (—) Courbes d'ajustement.

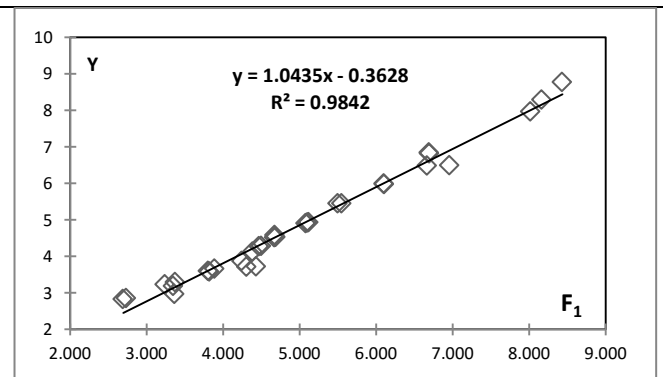


Figure 2.9 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=30$ mm, (—) Courbes d'ajustement.

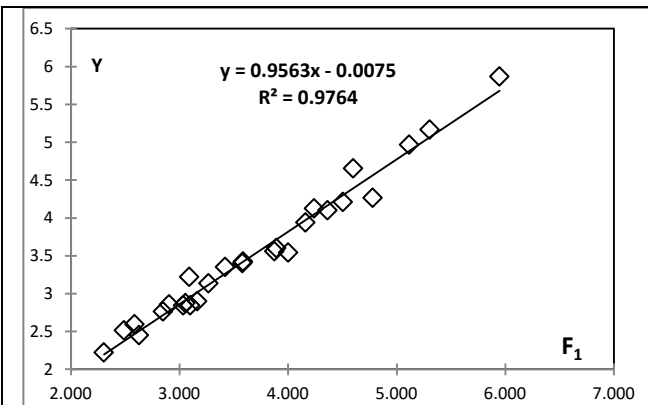


Figure 2.10: Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 , pour l'ouverture $h_1=45$ mm (—) Courbes d'ajustement.

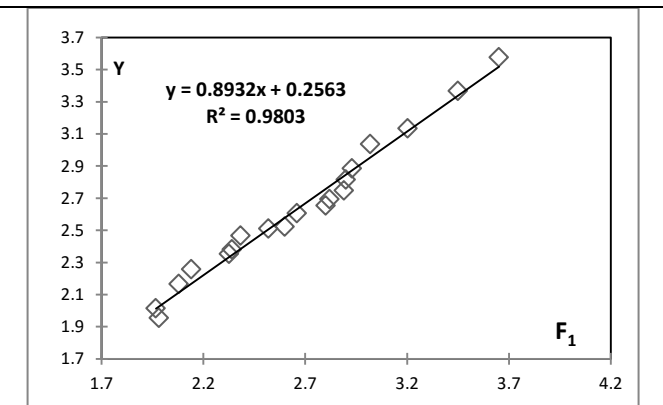
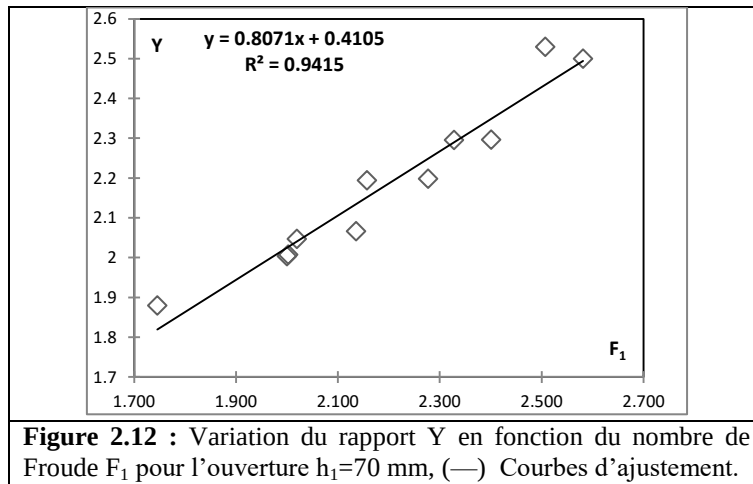


Figure 2.11: Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 , pour l'ouverture $h_1=60$ mm (—) Courbes d'ajustement.



Les mesures expérimentales nous permettent de tracer les courbes ci-dessus (figure 2.8 à 2.12), qui lient le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour chaque ouverture h_1 , les résultats obtenus sont motionnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.2 : les résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du F_1 pour chaque ouverture h_1

M	a	b	Equation d'ajustement	R^2
0,133	0,994	- 0,280	$Y = 0,994F_1 - 0,280$	0,9751
0,200	1,043	- 0,362	$Y = 1,043F_1 - 0,362$	0,9842
0,300	0,956	- 0,007	$Y = 0,956F_1 - 0,007$	0,9764
0,400	0,893	+0,256	$Y = 0,893F_1 + 0,256$	0,9803
0,466	0,807	+ 0,410	$Y = 0,807F_1 + 0,410$	0,9415

D'après le tableau (2.2) ; les valeurs moyennes des A et B, $A = \sum a_i/n$, $B = \sum b_i/n$

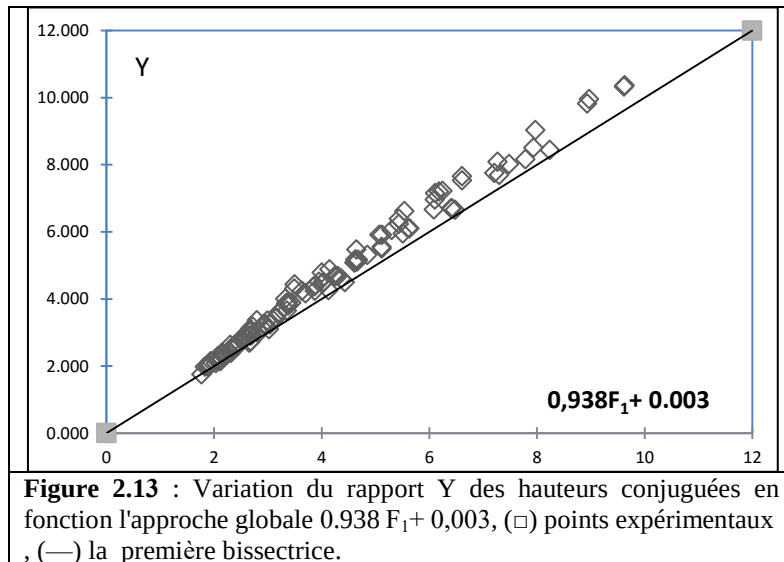
$$A = 0,938 \quad / \quad B = 0,003$$

En remplaçant les paramètres A et B par leurs valeurs respectives dans la relation $Y = A(F_1) + B$, on obtient l'approche expérimentale de la relation générale suivante :

$$\boxed{Y = 0,938 F_1 + 0,003} \quad (2.2)$$

Pour : $1,87 < F_1 < 15$

La représentation graphique (2.13) montre clairement que toutes les mesures expérimentales tournent approximativement autour de la première bissectrice qui fiabilisent la relation expérimentale globale obtenue (2.2). Tel que l'erreur relative est ne dépasse guères 5 %.



2.2. 3. La hauteur relative du seuil en fonction du rapport des hauteurs conjuguées

Les représentations graphiques (2.14 à 2.18) des différentes mesures expérimentales obtenues donnent une relation entre la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$ en fonction du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal $Y = h_2/h_1$, pour les différentes ouvertures h_1 .

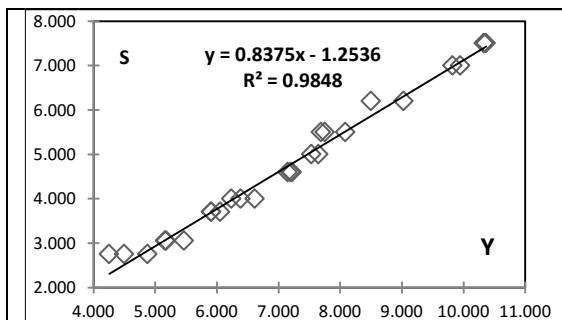


Figure 2.14: Variation du rapport s/h_1 en fonction du rapport des hauteurs conjuguées pour l'ouverture $h_1=20\text{mm}$ (—) Courbes d'ajustement.

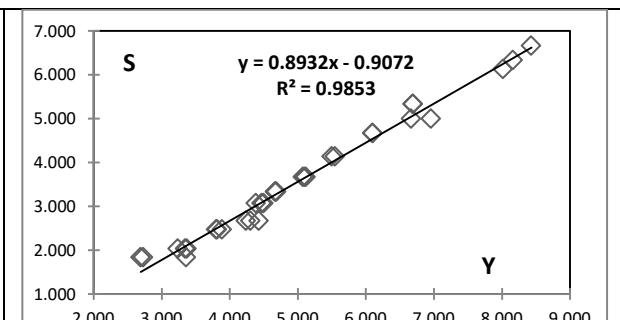


Figure 2.15: Variation du rapport s/h_1 en fonction du rapport des hauteurs conjuguées pour l'ouverture $h_1=30\text{ mm}$ (—) Courbes d'ajustement.

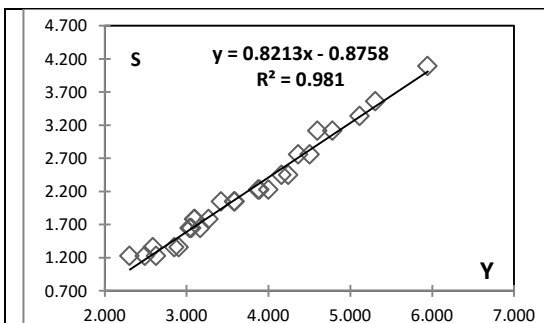


Figure 2.16: Variation du rapport s/h_1 en fonction du rapport des hauteurs conjuguées pour l'ouverture $h_1=45\text{mm}$, (—) Courbes d'ajustement.

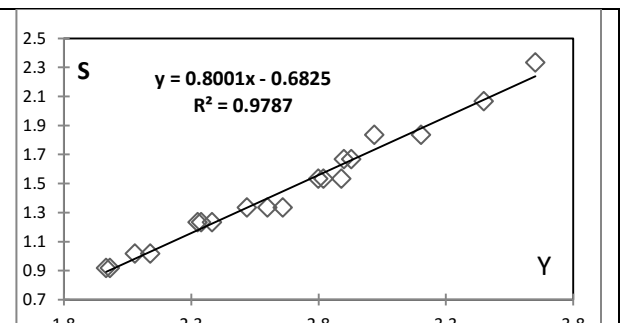
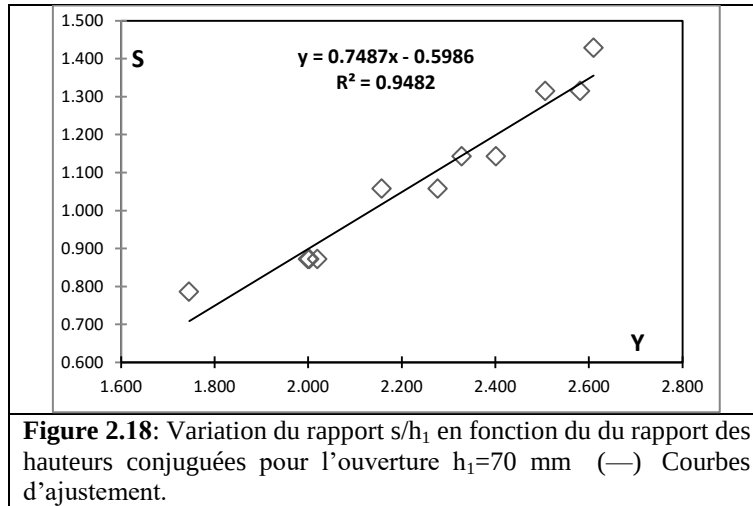


Figure 2.17: Variation du rapport s/h_1 en fonction du rapport des hauteurs conjuguées pour l'ouverture $h_1=60\text{ mm}$ (—) Courbes d'ajustement.



La figure ci-dessous (2.19) montre que l'ajustement des mesures expérimentales obtenus au laboratoire "LARHYSS" est de type linéaire $S = AY + B$.

Cinq figures ont été établies chacune montre la variation de s/h_1 en fonction de Y pour une ouverture bien déterminée. Les différentes valeurs des a_i et b_i sont mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.3 : les résultats expérimentaux du rapport S en fonction de Y pour chaque ouverture h_1

M	a	b	Equation d'ajustement	R^2
0,133	0,8375	- 1,2536	$S = 0,8375 Y - 1,2536$	0,9848
0,200	0,8932	- 0,9072	$S = 0,8932 Y - 0,9072$	0,9853
0,300	0,8213	- 0,8758	$S = 0,8213 Y - 0,8758$	0,981
0,400	0,8001	- 0,6825	$S = 0,8001 Y - 0,6825$	0,9787
0,466	0,7487	- 0,5986	$S = 0,7487 Y - 0,5986$	0,9482

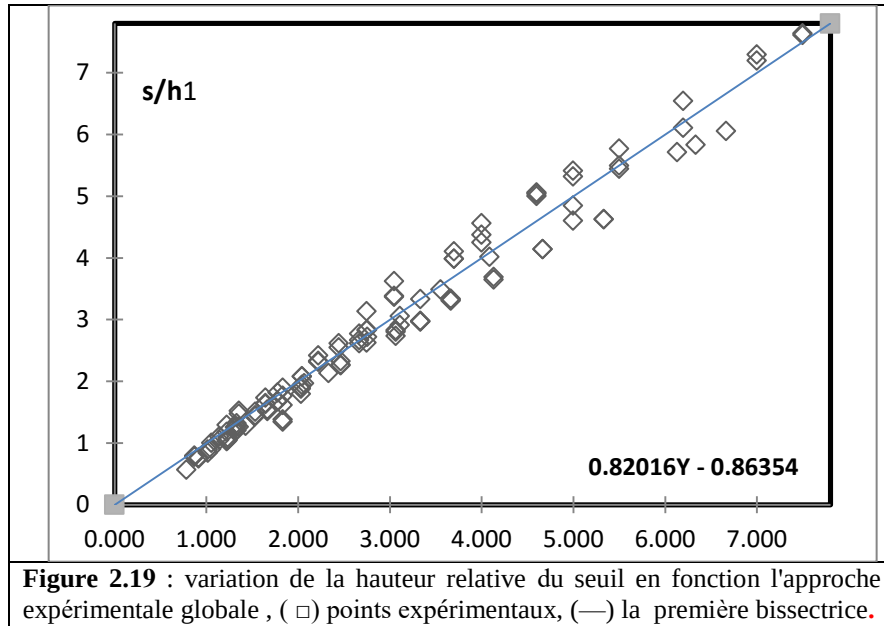
L'analyse de toutes les valeurs a_i ; b_i nous a donné une moyenne de $A = \sum a_i / n_i$, $B = \sum b_i / n_i$

$$A = 0,82 \quad / \quad B = - 0,863$$

En injectant les valeurs de : A , B dans l'équation générale qui est de forme: $s/h_1 = AY + B$

$$S = 0,82 Y - 0,863 \quad (2.3)$$

La figure (2.19) montre la variation des mesures expérimentales du seuil relative s/h_1 en fonction de l'approche expérimentale globale du seuil relative. On remarque que la plupart des mesures expérimentales tournent autour de la première bissectrice qui reflète la fiabilité de l'approche expérimentale globale obtenue (2.3).

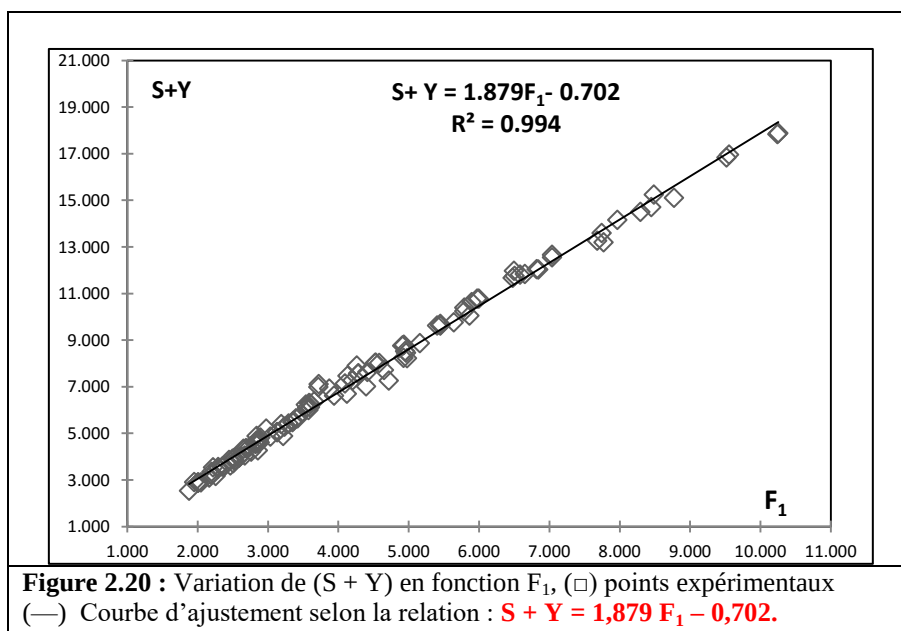


2.2.4. Variation de (S + Y) en fonction du nombre de Froude

En exploitant toutes les mesures expérimentales du seuil relative s/h_1 ; du rapport des hauteurs conjuguées Y et du nombre de Froude F_1 incident : la figure (2.20) ci-dessous montre la relation générale liant les différents paramètres adimensionnels du ressaut hydraulique contrôlé évoluant dans un canal trapézoïdal à pente nulle ($S + Y$, F_1), elle peut s'écrire sous la forme suivante:

$$S + Y = 1,879 F_1 - 0,702 \quad (2.4)$$

Cette relation est acceptable car le coefficient de détermination R^2 (la méthode des moindres carrés) est proche de l'unité.



2.2.5. La longueur relative du ressaut

La longueur relative du ressaut λ_j est le rapport entre la longueur du ressaut et la hauteur initiale du ressaut $\lambda_j = L_j/h_1$.

Les représentations graphiques des mesures expérimentales (les figures: 2-21 à 2.25) illustrent la variation de la longueur relative du ressaut λ_j en fonction du nombre de Froude F_1 pour les cinq ouvertures h_1 : 20 ; 30 ; 45 ; 60 et 70 mm.

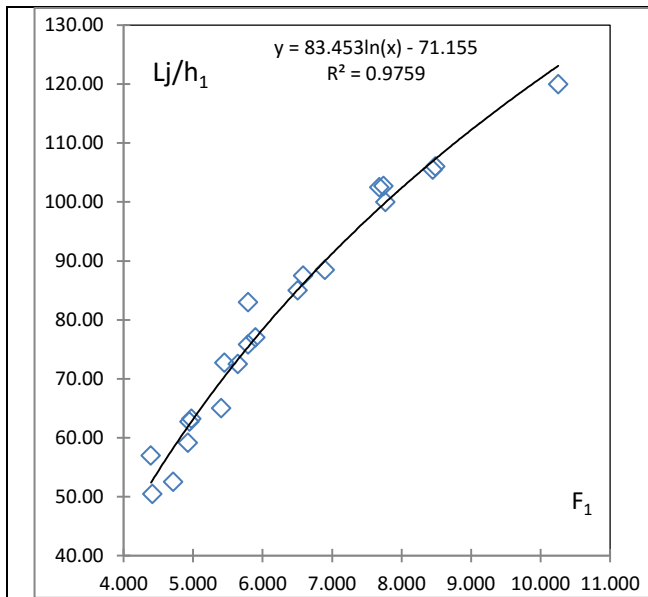


Figure 2.21: Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=20$ mm, (—) Courbes d'ajustement.

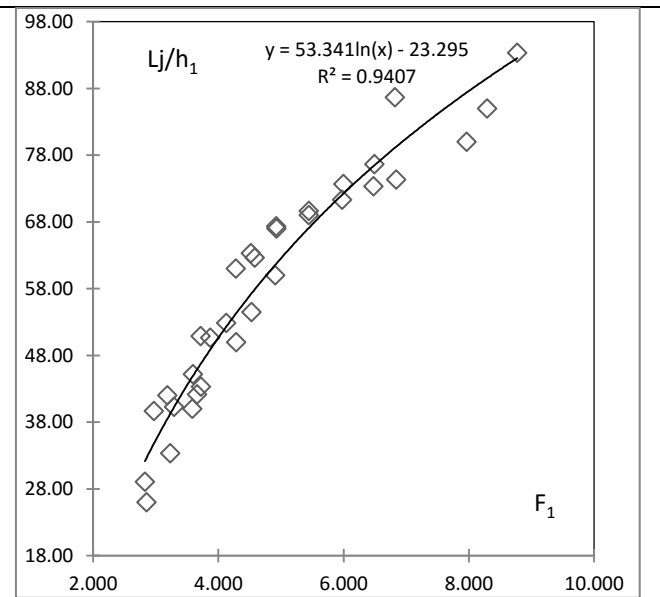


Figure 2.22: Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=30$ mm, (—) Courbes d'ajustement.

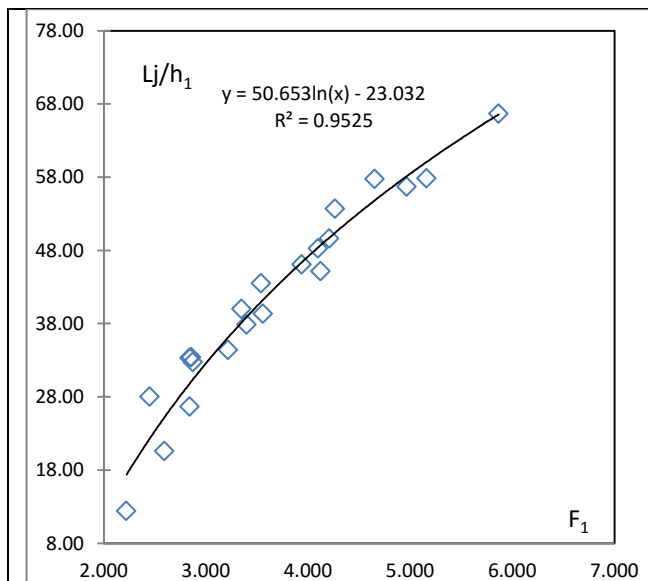


Figure 2.23: Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=45$ mm, (—) Courbes d'ajustement.

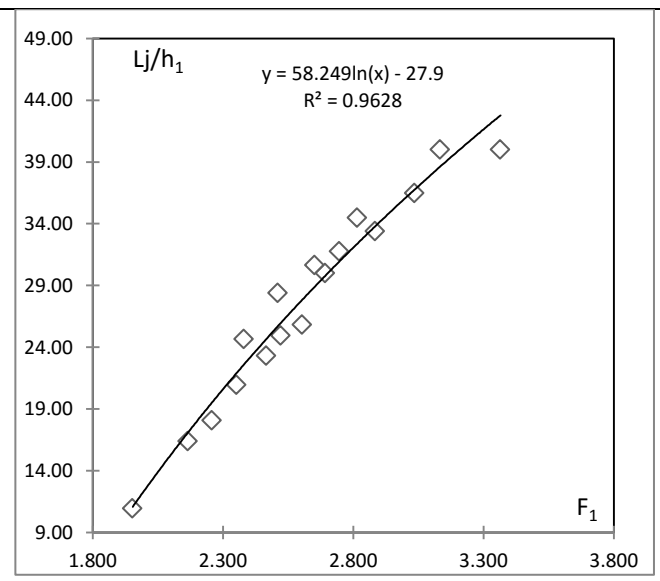
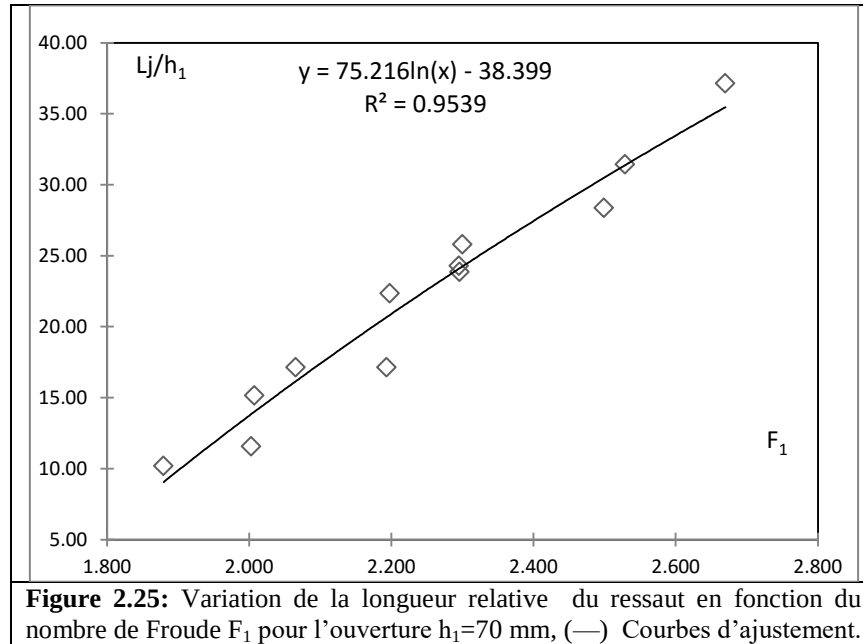


Figure 2.24: Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=60$ mm, (—) Courbes d'ajustement.



Le tableau ci-dessous (2.4) regroupe les résultats expérimentaux obtenus de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour chaque ouverture.

Tableau 2.4: les résultats expérimentaux de la longueur relative du ressaut L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour chaque ouverture h_1

M	a	b	Equation d'ajustement	R ²
0,133	83,453	-71,155	$L_j/h_1 = 83,453 \ln(F_1) - 71,155$	0,9759
0,200	53,341	-23,295	$L_j/h_1 = 53,341 \ln(F_1) - 23,295$	0,9407
0,300	50,653	-23,032	$L_j/h_1 = 50,653 \ln(F_1) - 23,032$	0,9525
0,400	58,249	-27,90	$L_j/h_1 = 58,249 \ln(F_1) - 27,90$	0,9628
0,466	75,216	-38,399	$L_j/h_1 = 75,216 \ln(F_1) - 38,399$	0,9539

Nous pouvons remarquer que d'après les figures présidentes (2.21 à 2.25), la relation générale liant la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal à pente nulle, elle peut s'écrire sous la forme suivante: **$L_j/h_1 = A \ln(F_1) + B$** .

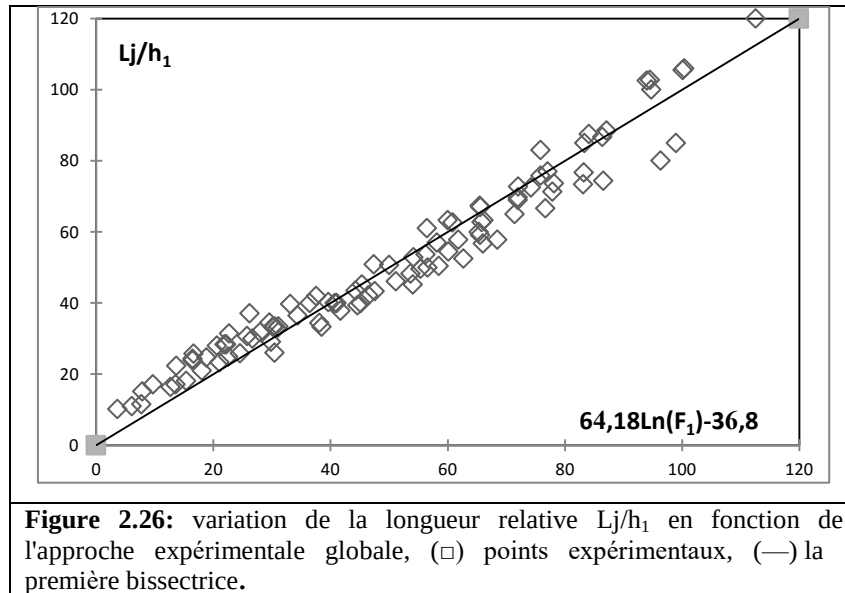
Le tableau (2.3) permet de calculer A et B, $A = \sum a_i / n$, $B = \sum b_i / n$

$$A = 64,18 \quad B = -36,8$$

En remplaçant les paramètres A et B par leurs valeurs respectives dans la relation générale $L_j/h_1 = A \ln(F_1) + B$, on obtient la formule expérimentale générale suivante :

$$L_j/h_1 = 64,18 \ln(F_1) - 36,8 \quad (2.5)$$

La représentation graphique (2.26) illustre clairement que les points expérimentaux obtenus se répartissent autour de la première bissectrice confirmant alors que (L_j/h_1) expérimentale est raisonnablement définie par la relation (1.5).

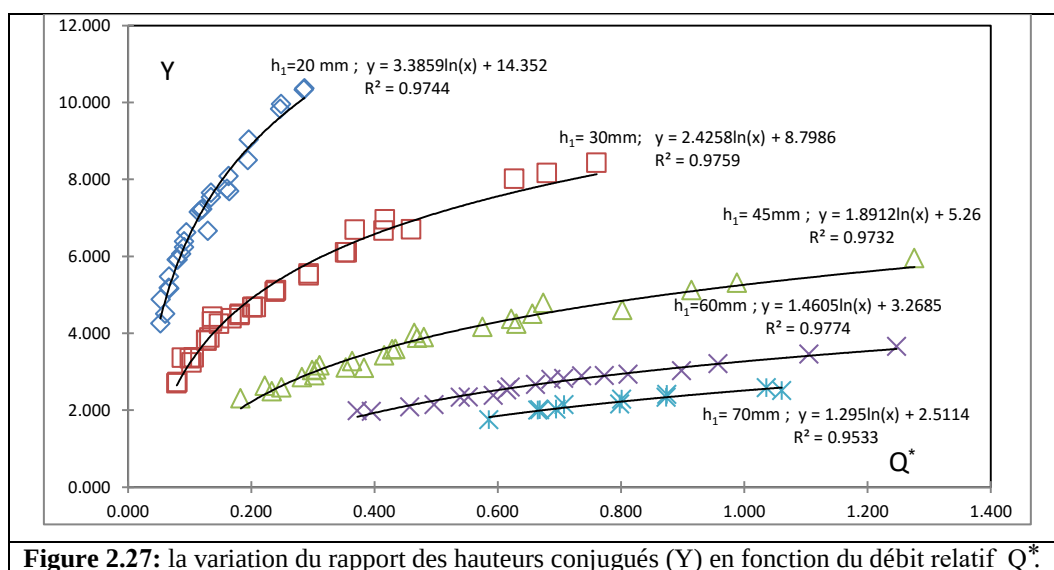


2.2.6. Hauteur relative en fonction du débit relatif

On peut calculer le **débit relatif** par l'application de la relation suivante :

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gD^5}}$$

Les représentations graphiques des points expérimentaux de la variation de la hauteur relative h_2/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif, pour les cinq ouvertures h_1 : 20 ; 30 ; 45 ; 60 et 70 mm sont regroupées dans la figure ci-dessous (figure2-27) .



Cette figure montre que la variation du rapport des hauteurs conjugués (Y) en fonction du débit relatif Q^* , on a obtenu cinq allures pour chacune représente l'effet de l'ouverture (h_1). On constate que : Pour le même débit relatif Q^* la deuxième hauteur relative Y augmente avec la diminution de l'ouverture initiale h_1 .

Le tableau ci-dessous (2.4) regroupe les résultats expérimentaux obtenus du rapport des hauteurs conjugués (Y) en fonction du débit relatif Q^* , pour chaque ouverture.

Tableau 2.5: les résultats expérimentaux du rapport des hauteurs conjugués (Y) en fonction du débit relatif Q^* , pour chaque ouverture h_1

M	a	b	Equation d'ajustement	R ²
0.133	3,3981	14,408	$Y = 3,3981 \ln(Q^*) + 14,408$	0,9744
0.200	2,4258	8,7986	$Y = 2,4258 \ln(Q^*) + 8,7986$	0,9759
0.300	1,8912	5,260	$Y = 1,8912 \ln(Q^*) + 5,260$	0,9732
0.400	1,4605	3,2685	$Y = 1,4605 \ln(Q^*) + 3,2685$	0,9774
0.4667	1,4001	2,5483	$Y = 1,4001 \ln(Q^*) + 2,5483$	0,9533

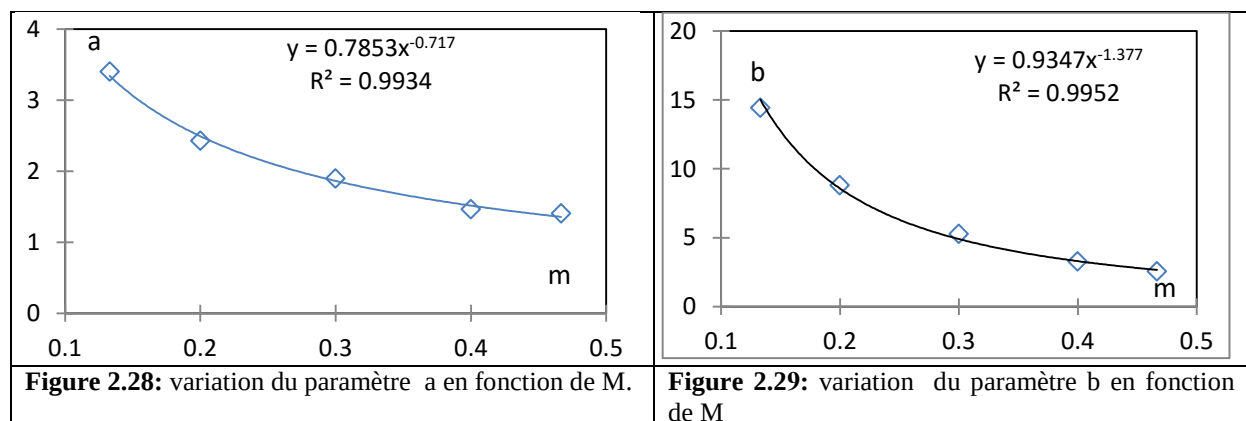
Selon la figure (2.27), l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport Y en fonction du nombre Q^* a donné une équation de type logarithmique de la forme: $Y = A \ln(Q^*) + B$.

Le tableau (2.6) représente les paramètres a et b pour les cinq ouvertures. Ces paramètres a, b varient en fonction de M selon le tableau ci-dessous.

Tableau 2.6 : Valeurs des paramètres a et b en fonction de M

a	b	M
3,3981	14,408	0,133
2,4258	8,7986	0,200
1,8912	5,260	0,300
1,4605	3,2685	0,400
1,4001	2,5483	0,4667

Les figures (2.28 et 2.29) ci-dessous illustrent la variation des paramètres a et b en fonction de M.



Les représentations graphiques permettent de calculer A et B,

$$A = 0,7853M^{-0,717} / B = 0,9347M^{-1,377}$$

En remplaçant les paramètres A et B par leurs expressions respectives dans la relation :

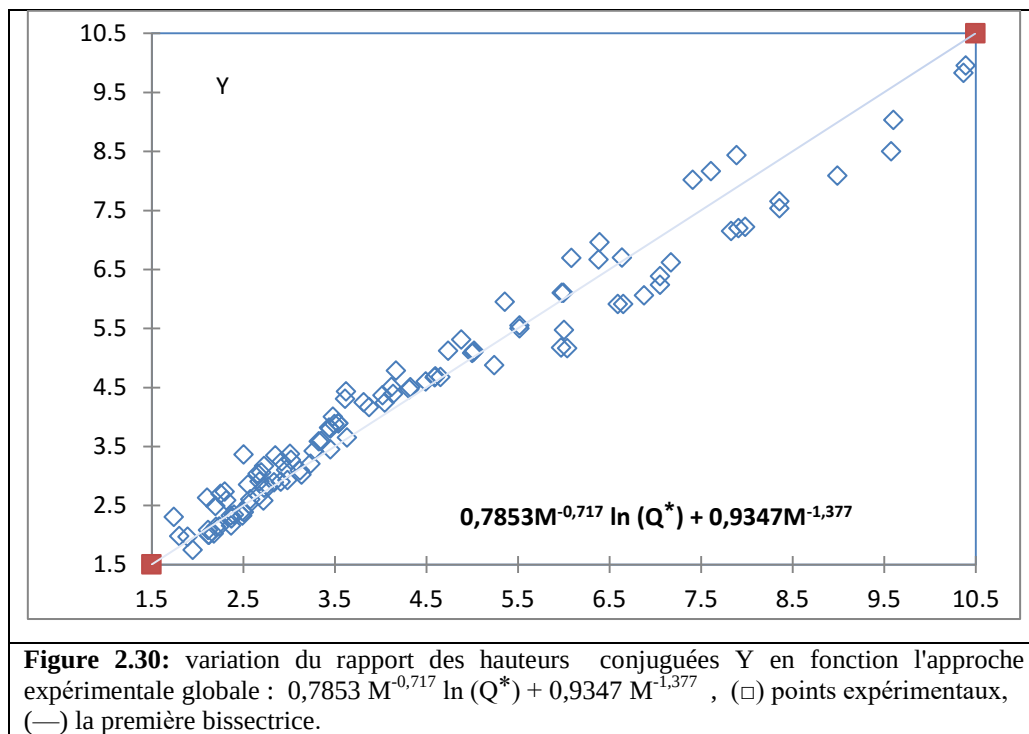
$$Y = A \ln(Q^*) + B$$

On obtient la relation expérimentale globale suivante :

$$Y = 0,7853M^{-0,717} \ln(Q^*) + 0,9347M^{-1,377} \quad (2.6)$$

$$\text{Pour : } 0,133 < M < 0,4667$$

La figure ci-dessous (figure 2.30) montre que les mesures expérimentales du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction des valeurs extraites de la relation globale expérimentale ($0,7853M^{-0,717} \ln(Q^*) + 0,9347M^{-1,377}$). On constate que la majorité des mesures expérimentales tourne autour de la première bissectrice qui justifie l'acceptation de l'approche globale obtenue(2.6).



2.2.7. Rendement du ressaut

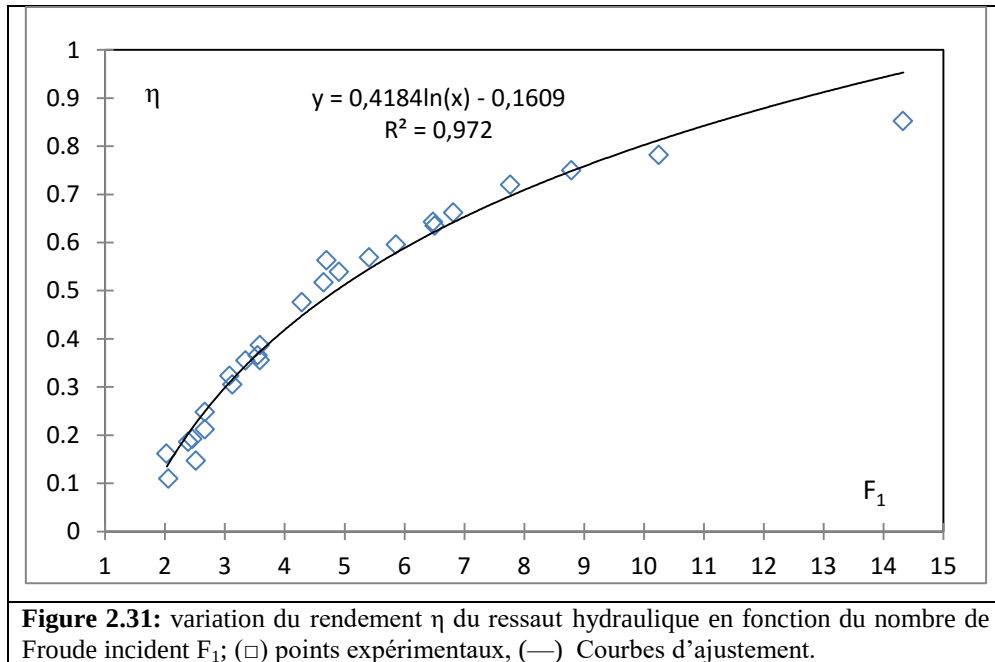
Le rendement η du ressaut est défini par le rapport de la perte de charge ΔH qu'il occasionne à la charge totale dans sa section initiale :

$$\eta = \Delta H / H_1$$

$$\text{avec : } \Delta H = H_1 - H_2$$

H_1 et H_2 désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut.

Les valeurs expérimentales du rendement sont regroupées dans le tableau n°06 en annexe.



Cette figure (2.31) montre la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident F_1 . L'ajustement des mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés donne une courbe de type logarithmique :

$$\eta = 0,41874 \ln (F_1) - 0,1609 \quad (2.7)$$

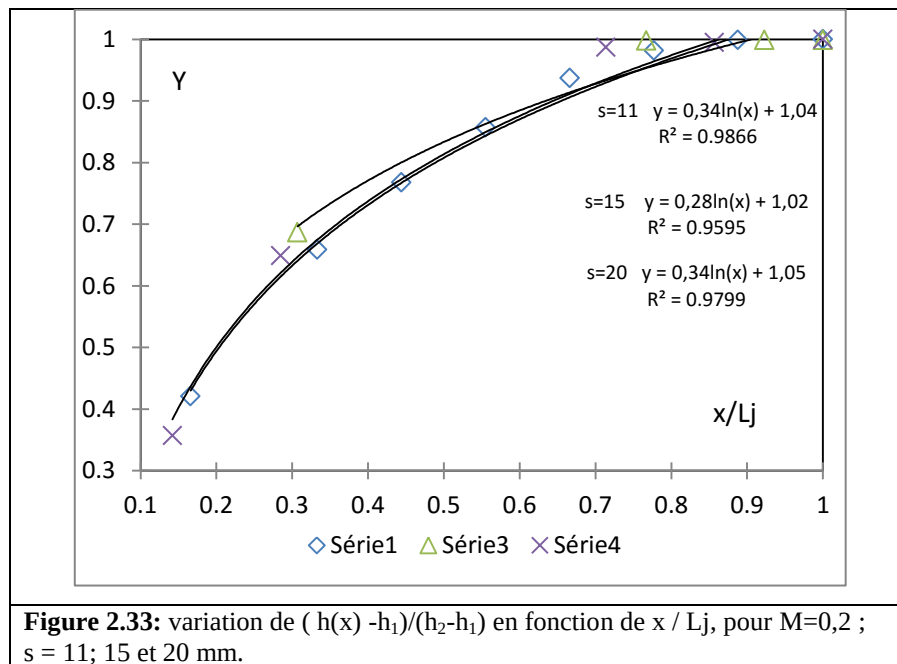
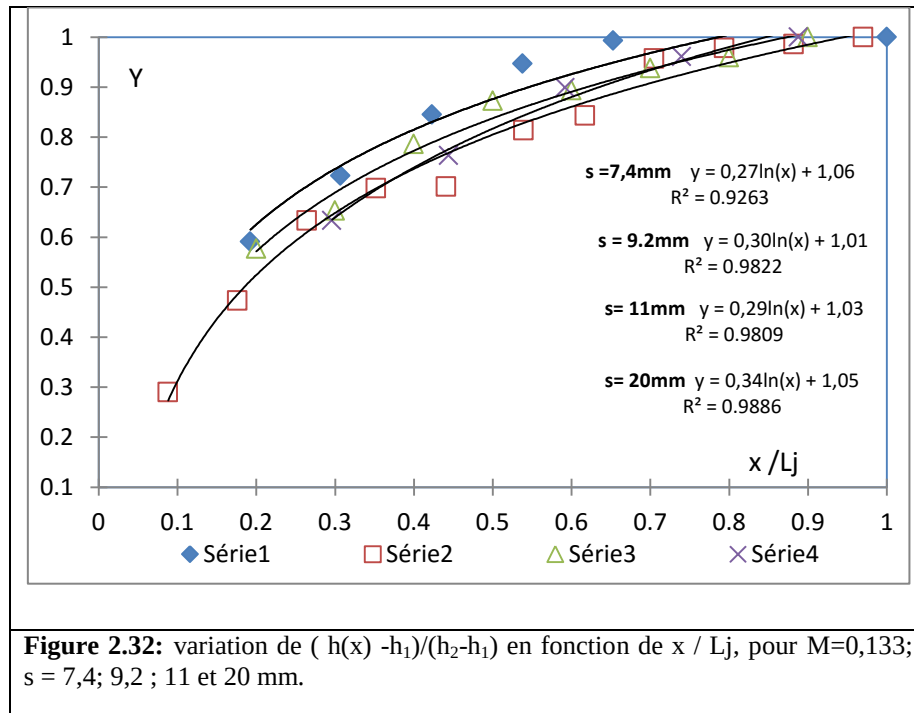
On remarque que pour les nombres de Froude F_1 pratique incident qui varient entre l'intervalle 2 et 8 : la dissipation d'énergie est importante .

2.2.8. Profil de surface généralisé

Le tableau n°05 en annexe regroupe les valeurs expérimentales des variables Y de X . La formule du profil de surface général du ressaut est donnée par l'expression suivante:

$$Y = (h(x) - h_1) / (h_2 - h_1) \quad \text{et} \quad X = x / L_j$$

Les représentations graphiques des points expérimentaux de la variation de $(h(x) - h_1) / (h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_j , pour les cinq ouvertures $h_1 = 20 ; 30 ; 45 ; 60$ et 70 mm sont regroupées dans les figures ci-dessous (figure 2-32 à 2.36) .



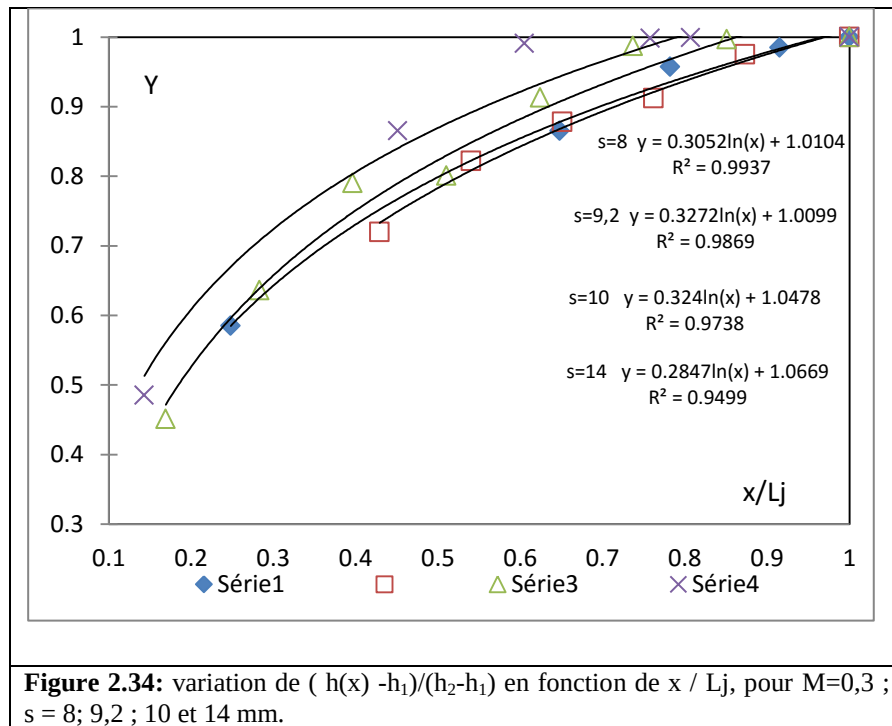


Figure 2.34: variation de $(h(x) - h_1)/(h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_j , pour $M=0,3$; $s = 8; 9,2 ; 10$ et 14 mm.

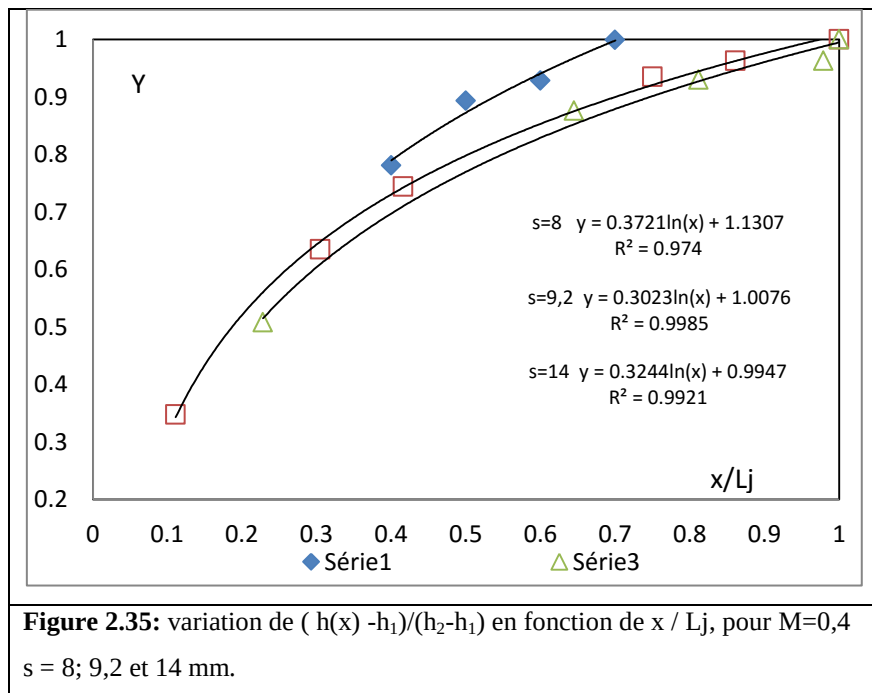
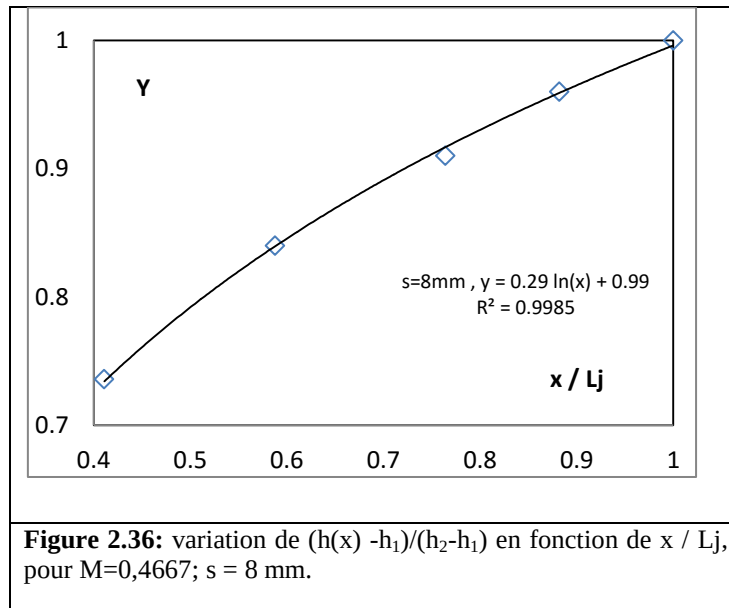


Figure 2.35: variation de $(h(x) - h_1)/(h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_j , pour $M=0,4$; $s = 8; 9,2$ et 14 mm.



Ces figures (2.32 à 2.36) illustrent la variation de $(h(x) - h_1) / (h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_j pour les cinq ouvertures initiales h_1 .

Le tableau ci-dessous (2.7) regroupe les résultats expérimentaux obtenus de $(h(x) - h_1)/(h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_j , pour chaque ouverture.

Tableau 2.7: les résultats expérimentaux du de $(h(x) - h_1)/(h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_j , pour chaque ouverture h_1 .

M	s (mm)	a	b	Equation d'ajustement	R ²
0,133	7,4	0,2734	1,0656	$Y = 0,2734 \ln(x / L_j) + 1,0656$	0,9263
	9,2	0,3061	1,0172	$Y = 0,3061 \ln(x / L_j) + 1,0172$	0,9822
	11	0,2907	1,0393	$Y = 0,2907 \ln(x / L_j) + 1,0393$	0,9889
	20	0,3474	1,0578	$Y = 0,3474 \ln(x / L_j) + 1,0578$	0,9886
0,200	11	0,3425	1,0451	$Y = 0,3425 \ln(x / L_j) + 1,0451$	0,9866
	15	0,2804	1,0270	$Y = 0,2804 \ln(x / L_j) + 1,0270$	0,9595
	20	0,3416	1,0503	$Y = 0,3416 \ln(x / L_j) + 1,0503$	0,9799
0,300	8	0,3052	1,0104	$Y = 0,3052 \ln(x / L_j) + 1,0104$	0,9937
	9,2	0,3272	1,0099	$Y = 0,3272 \ln(x / L_j) + 1,0099$	0,9869
	10	0,3244	1,0478	$Y = 0,3244 \ln(x / L_j) + 1,0478$	0,9738
	14	0,2847	1,0669	$Y = 0,2847 \ln(x / L_j) + 1,0669$	0,9499
0,400	6,1	0,3721	1,1307	$Y = 0,3721 \ln(x / L_j) + 1,1307$	0,9740
	9,2	0,3023	1,0076	$Y = 0,3023 \ln(x / L_j) + 1,0076$	0,9985
	14	0,3244	0,9947	$Y = 0,3244 \ln(x / L_j) + 0,9947$	0,9921
0,466	8	0,2945	0,9961	$Y = 0,2945 \ln(x / L_j) + 0,9961$	0,9985

Selon les figures (2.32 à 2.36) l'ajustement des mesures expérimentales a montré que le profil de surface généralisé du long du canal de section trapézoïdale contrôlé par un seuil à

paroi mince, la variation de $(Y = (h(x) - h_1)/(h_2 - h_1))$ en fonction de $(X = x / L_j)$ a donné une équation de type logarithmique de la forme: $Y = A \ln (X/L_j) + B$.

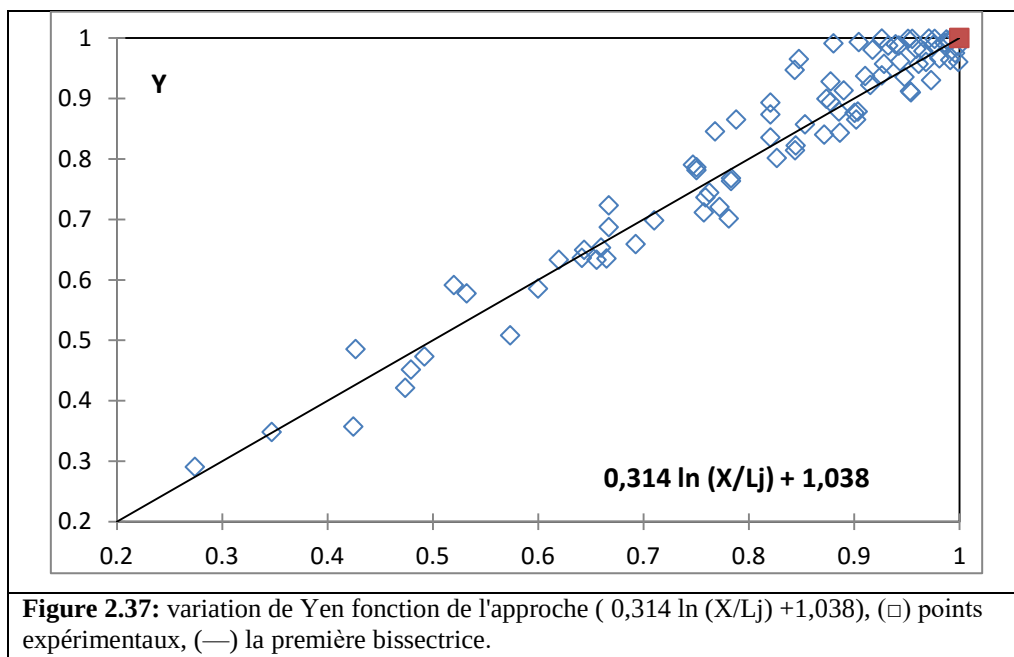
Le tableau (2.7) nous permet de calculer A et B, $A = \sum a_i / n$, $B = \sum b_i / n$

$$A = 0,314 \text{ et } B = 1,038$$

En remplaçant les paramètres A et B par leurs valeurs respectives dans la relation $Y = A \ln (X/L_j) + B$, on obtient l'approche expérimentale de la relation générale suivante :

$$Y = 0,314 \ln (X / L_j) + 1,038 \quad (2.8)$$

La représentation graphique (figure 2.37) illustre nettement que les points expérimentaux obtenus se répartissent en majorité s autour de la première bissectrice qui confirme la fiabilité de la relation expérimentale globale obtenue (2.8).



2.3. Conclusion

La deuxième partie de notre étude a concerné l'étude expérimentale **du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal de section trapézoïdale** à parois inclinées de 45° et d'une largeur sa base de 15 cm . L'analyse des résultats expérimentaux nous a permis de trouver des approches expérimentales globales très acceptables.

L'expérimentation a été consacrée en premier lieu la variation de la hauteur relative S du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 incident , puis la variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y en fonction du nombre de Froude F_1 incident. L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a mené à l'établissement des relations simples à l'emploi liant les trois variables adimensionnels (F_1 , Y , S), aussi, des approches globales entre la longueur relative du ressaut λ_j en fonction du nombre de Froude F_1 incident et la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du débit relatif. En terminant par l'approche globale expérimentale du profil de surface généralisé du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal à section trapézoïdale très acceptable .

Le tableau ci-après regroupe les principales relations issues de l'analyse des mesures expérimentales.

Tableau 2.8: Quelques caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal.

Ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal trapézoïdal. (parois inclinées de 45° et d'une largeur de la base de 15 cm.)	
1. Hauteur relative S du seuil en fonction du nombre de Froude incident F_1	➤ $S = 0,848 F_1 - 0,767$
2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y en fonction du nombre de Froude incident F_1	➤ $Y = 0,938 F_1 + 0,003$
3. Variation de s/h_1 en fonction de Y	➤ $S = 0,82 Y - 0,863$
4. Variation de $(S + Y)$ en fonction du nombre de Froude incident F_1	➤ $S + Y = 1,879 F_1 - 0,702$
5. Longueur relative du ressaut λ_j en fonction du nombre de Froude incident F_1	➤ $L_j/h_1 = 64,18 \ln(F_1) - 36,8$
6. Hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du débit relatif	➤ $Y = 0,7853M^{-0,717} \ln(Q^*) + 0,9347M^{-1,377}$
7. Rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident F_1 .	➤ $\eta = 0,41874 \ln(F_1) - 0,1609$
8. Profil de surface généralisé.	➤ $Y = 0,314 \ln(X / L_j) + 1,038$

DISCUSSION ET CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre étude a pour but de contribuer à l'étude expérimentale de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé évoluant dans un canal trapézoïdal avec angle d'inclinaison des parois de 45° et une base de 15 cm de largeur à pente nulle.

Notre travail se compose de deux parties fondamentales, dans la première partie, nous avons traité une étude bibliographique, et la deuxième partie nous avons exposé une étude expérimentale du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal.

La première partie de ce travail est composée par quatre chapitres principaux : Le premier chapitre, sert à l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire. On a commencé par la définition du ressaut classique et les classifications des différentes formes du ressaut selon Bradley et Peterka (1957). A la fin de ce chapitre nous avons cité les caractéristiques géométriques du ressaut classique.

Le deuxième chapitre, nous avons passé en revue les travaux principaux, établis par Hager et Wanoschek (1987), sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire d'angle d'ouverture 45° . Les auteurs ont appliqué le théorème de la quantité de mouvement. Une grande partie de ce chapitre, préoccupe les travaux les plus récents, ceux de Debabeche et Achour (2003), dans le domaine du ressaut hydraulique en canal triangulaire. Ces auteurs ont contribué à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince. Leurs recherches expérimentales, ont été consacrées à la détermination de l'influence du seuil sur le rapport des hauteurs conjuguées Y .

Dans le troisième chapitre, nous avons abordé les travaux de GHOMRI et RIGUET. Cette étude a pour objectif de l'exposer les travaux expérimentaux du ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal profilé en 'U' à fond rugueux., liant les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'effet de la rugosité du fond du canal.

Le dernier chapitre de cette étude bibliographique, a pour objectif d'identifier les caractéristiques du ressaut hydraulique classique en canal trapézoïdal et les travaux entrepris par Hager et Wanoschek (1989).

La deuxième partie se préoccupe essentiellement l'étude expérimentale à travers laquelle nous avons abordé les travaux expérimentaux de l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince évoluant dans un canal trapézoïdal.

Deux chapitres principaux sont proposés par cette partie d'étude. Le premier chapitre a été consacré à la description du modèle expérimental, utilisé dans notre étude du ressaut

hydraulique. Une description détaillée de l'appareillage utilisé pour les essais avec des illustrations photographiques qui nous ont aidés à donner une vue plus claire sur le déroulement des travaux d'expérimentation.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'analyse expérimentale des résultats obtenus. A travers cette analyse nous avons établis les relations fonctionnelles adimensionnelles à caractère général régissant le ressaut hydraulique. Les approches expérimentales obtenues sont indiquées ci-dessous:

1. Hauteur relative S du seuil en fonction du nombre de Froude incident F_1 .
2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique Y en fonction du nombre de Froude incident F_1 .
3. Variation du seuil relatif s/h_1 en fonction de Y .
4. Variation de $(S + Y)$ en fonction du nombre de Froude incident F_1 .
5. Longueur relative du ressaut λ_j en fonction du nombre de Froude incident F_1 .
6. Hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du débit relative Q^* .
7. Rendement du ressaut hydraulique η en fonction du nombre de Froude incident F_1 .
8. Profil de surface généralisé du ressaut hydraulique.

Finalement ,on espère bien qu' on a contribué à l'étude expérimentale de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince dans un canal à section prismatique trapézoïdale. Cependant, on recommandera de réaliser des travaux postérieures de ce type du ressaut à fond rugueux .

LISTE DES FIGURES

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE I :

Figure 1.1 : Ressaut Hydraulique.....	2
Figure 1.2.a : Ressaut ondulé.....	3
Figure 1.2.b : Le pré-ressaut.....	3
Figure 1.2.c : Le ressaut de transition.....	3
Figure 1.2.d : Le ressaut stable.....	4
Figure 1.2.e : Le ressaut clapoteux.....	4
Figure 1.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut.....	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.....	7
Figure 1.7 : Ligne de charge totale le long du ressaut classique.....	8
Figure 1.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction de nombre de Froude F_1	9

CHAPITRE II :

Figure 2.1 : Ressaut en canal semi-triangulaire, selon Hager et Wanoschek (1987).....	12
Figure 2.2 : Longueur relative L_j/h_2 du ressaut du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoschek (1987) ($m = 1$), (∇) : $m = 0.44$, selon Argyropoulos (1962)....	14
Figure 2.3 : Longueur relative L_r/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoschek (1987) ($m = 1$). (Δ) : $m = 0.58$, selon Rajaratnam(1964).....	15
Figure 2.4 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.....	15
Figure 2.5 : Variation expérimentale de $Y_S = f(S)$ lors du contrôle d'un ressaut triangulaire...16	
Figure 2.6 : Variation expérimentale de la hauteur relative S du seuil, en fonction du nombre de Froude F_1	17
Figure 2.7. : Variation de $(S+F_1^{0.4})$ en fonction de la position relative x/h_1 du seuil	17

CHAPITRE III :

Figure 3.1: Ressaut contrôlé par seuil mince. h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, L_r longueur du rouleau de surface, Δx distance séparant la boîte en charge B du pied du ressaut, B boîte sous pression.....	21
---	----

Figure 3.2 : Ressaut contrôlé dans un canal en "U" à fond rugueux. Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour quatre rugosités différentes " ε ".....	21
Figure 3.3 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de $f(\varepsilon/D, F_1)$	22
Figure 3.4 : Variation de la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 en fonction de nombre Froude pour quatre rugosités différentes " ε ".....	22
Figure 3.5 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction de $f(\varepsilon/D, F_1)$	23
Figure 3.6 : Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction de l'équation (1).....	23

CHAPITRE IV :

Figure 4.1: Ressaut hydraulique classique.....	27
Figure 4.2: Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M	28
Figure 4.3 : Représentation graphique du ressaut en canal trapezoidal.....	29
Figure 4.4 : Représentation graphique de la relation (4.8) du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1	30

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE I :

Figure 1.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal, ayant servi à l'expérimentation.....	34
Figure 1.2 : Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal à pente nulle.....	36

CHAPITRE II :

Figure 2.1 : Ressaut contrôlé par seuil mince. h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, L_r longueur du rouleau de surface, L_j longueur du ressaut, Δx distance séparant la boîte en charge B du pied du ressaut, B boîte en charge.....	39
Figure 2.2: Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=20$ mm	40
Figure 2.3 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=30$ mm	40
Figure 2.4: Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour l'ouverture $h_1=45$ mm.....	40

Figure 2.5: Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour l'ouverture $h_1=60$ mm.....	40
Figure 2.6 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour l'ouverture $h_1=70$ mm	40
Figure 2.7 : Variation expérimentale de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction de : $0,848 F_1 - 0,767$ (approche).....	41
Figure 2.8: Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=20$ mm	42
Figure 2.9 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=30$ mm.....	42
Figure 2.10: Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 , pour l'ouverture $h_1=45$ mm	42
Figure 2.11: Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 , pour l'ouverture $h_1=60$ mm	42
Figure 2.12 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=70$ mm.....	43
Figure 2.13 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction l'approche globale $0.938 F_1 + 0,003$	44
Figure 2.14: Variation du rapport s/h_1 en fonction du rapport des hauteurs conjuguées pour l'ouverture $h_1=20$ mm	44
Figure 2.15: Variation du rapport s/h_1 en fonction du rapport des hauteurs conjuguées pour l'ouverture $h_1=30$ mm	44
Figure 2.16: Variation du rapport s/h_1 en fonction du rapport des hauteurs conjuguées pour l'ouverture $h_1=45$ mm.....	44
Figure 2.17: Variation du rapport s/h_1 en fonction du rapport des hauteurs conjuguées pour l'ouverture $h_1=60$ mm.....	44
Figure 2.18: Variation du rapport s/h_1 en fonction du rapport des hauteurs conjuguées pour l'ouverture $h_1=70$ mm	45
Figure 2.19 : variation de la hauteur relative du seuil en fonction l'approche expérimentale globale	46
Figure 2.20 : Variation de $(S + Y)$ en fonction du nombre de Froude F_1	46
Figure 2.21: Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=20$ mm	47

Figure 2.22: Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=30$ mm.....	47
Figure 2.23: Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=45$ mm.....	47
Figure 2.24: Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=60$ mm.....	47
Figure 2.25: Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1=70$ mm.....	48
Figure 2.26: Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de l'approche expérimentale globale.....	49
Figure 2.27: Variation du rapport des hauteurs conjugués (Y) en fonction du débit relatif Q^*	49
Figure 2.28: Variation du paramètre a en fonction de M.....	50
Figure 2.29: Variation du paramètre b en fonction de M.....	50
Figure 2.30: Variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction l'approche expérimentale globale : $0,7853 M^{-0,717} \ln(Q^*) + 0,9347 M^{-1,377}$	51
Figure 2.31: Variation du rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident F_1	52
Figure 2.32: Variation de $(h(x) - h_1)/(h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_j , pour $M=0,133$; $s = 7,4; 9,2$; 11 et 20 mm.....	53
Figure 2.33: Variation de $(h(x) - h_1)/(h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_j , pour $M=0,2$; $s = 11; 15$ et 20 mm.....	53
Figure 2.34: Variation de $(h(x) - h_1)/(h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_j , pour $M=0,3$; $s = 8; 9,2$; 10 et 14 mm.....	54
Figure 2.35: Variation de $(h(x) - h_1) / (h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_j , pour $M=0,4$ $s = 8; 9,2$ et 14 mm.....	54
Figure 2.36: Variation de $(h(x) - h_1)/(h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_j , pour $M=0,4667$; $s = 8$ mm.....	55
Figure 2.37: Variation de Y en fonction de l'approche $(0,314 \ln(X/L_j) + 1,038)$	56

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

DEUXIEME PARTIE

CHAPITRE II :

Tableau 2.1 : Valeur des paramètres a et b.....	41
Tableau 2.2 :Les résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du F_1 pour chaque ouverture h_1	43
Tableau 2.3 :Les résultats expérimentaux du rapport S en fonction de Y pour chaque ouverture h_1	45
Tableau 2.4 :Les résultats expérimentaux de la longueur relative du ressaut L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour chaque ouverture h_1	48
Tableau 2.5 : Les résultats expérimentaux du rapport des hauteurs conjugués (Y) en fonction du débit relatif Q^* , pour chaque ouverture h_1	50
Tableau 2.6 : Valeurs des paramètres a et b en fonction de M.....	50
Tableau 2.7 : Les résultats expérimentaux du de $(h(x) - h_1)/(h_2 - h_1)$ en fonction de x / L_j , pour chaque ouverture h_1	55
Tableau 2.8: Quelques caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal.....	57

Tableau 01: valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince
Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

$h_1= 20\text{mm } M=0,133$					$h_1= 30\text{mm } M=0,2$				
Q	F_1	s	h_1	s/h_1	Q	F_1	s	h_1	s/h_1
6,72	4,717	5,5	2	2,75	7,74	2,854	5,5	3	1,833
6,26	4,394	5,5	2	2,75	8,77	3,234	6,1	3	2,033
7,02	4,928	6,1	2	3,05	9,73	3,588	7,4	3	2,467
7,70	5,405	7,4	2	3,7	7,67	2,828	5,5	3	1,833
6,29	4,415	5,5	2	2,75	8,93	3,293	6,1	3	2,033
7,05	4,949	6,1	2	3,05	9,93	3,661	7,4	3	2,467
7,77	5,454	7,4	2	3,7	10,1	3,724	8	3	2,667
8,25	5,791	8	2	4	11,63	4,288	9,2	3	3,067
9,27	6,507	9,2	2	4,6	8,07	2,975	5,5	3	1,833
7,09	4,977	6,1	2	3,05	8,65	3,189	6,1	3	2,033
8,04	5,644	7,4	2	3,7	9,76	3,599	7,4	3	2,467
8,40	5,897	8	2	4	10,08	3,717	8	3	2,667
9,38	6,585	9,2	2	4,6	11,2	4,13	9,2	3	3,067
9,83	6,90	10	2	5	12,29	4,531	10	3	3,333
11,07	7,771	11	2	5,5	13,32	4,911	11	3	3,667
8,25	5,791	8	2	4	10,5	3,871	8	3	2,667
9,48	6,655	9,2	2	4,6	11,61	4,281	9,2	3	3,067
10,03	7,041	10	2	5	12,27	4,524	10	3	3,333
10,94	7,68	11	2	5,5	13,36	4,926	11	3	3,667
12,04	8,452	12,4	2	6,2	14,78	5,45	12,4	3	4,133
13,56	9,519	14	2	7	16,21	5,977	14	3	4,667
14,61	10,256	15	2	7,5	17,58	6,482	15	3	5,000
20,04	14,068	20	2	10	12,43	4,583	10	3	3,333
14,59	10,242	15	2	7,5	13,38	4,933	11	3	3,667
13,61	9,554	14	2	7	14,78	5,45	12,4	3	4,133
12,09	8,487	12,4	2	6,2	16,27	5,999	14	3	4,667
11,03	7,743	11	2	5,5	17,62	6,497	15	3	5,000
10,03	7,041	10	2	5	18,5	6,821	16	3	5,333
$h_1= 45\text{mm } M=0,3$					16,56	6,843	16	3	5,333
Q	F_1	s	h_1	s/h_1	21,61	7,968	18,4	3	6,133
11,67	2,221	5,5	4,5	1,222	22,5	8,296	19	3	6,333
13,62	2,592	6,1	4,5	1,356	23,8	8,775	20	3	6,667
16,23	2,841	8	4,5	1,778	$h_1= 60\text{mm } M=0,4$				
16,23	2,841	8	4,5	1,778	Q	F_1	s	h_1	s/h_1
12,87	2,449	5,5	4,5	1,222	18,32	2,149	5,5	6	0,917
15,01	2,856	6,1	4,5	1,356	17,16	2,013	5,5	6	0,917
15,09	2,871	7,4	4,5	1,644	19,24	2,257	6,1	6	1,017
16,9	3,216	8	4,5	1,778	21,02	2,466	7,4	6	1,233
17,6	3,349	9,2	4,5	2,044	16,65	1,953	5,5	6	0,917
13,19	2,51	5,5	4,5	1,222	18,46	2,165	6,1	6	1,017
14,51	2,761	6,1	4,5	1,356	20,05	2,352	7,4	6	1,233
15,22	2,896	7,4	4,5	1,644	21,5	2,522	8	6	1,333
16,46	3,132	8	4,5	1,778	22,95	2,692	9,2	6	1,533
17,98	3,421	9,2	4,5	2,044	20,29	2,38	7,4	6	1,233
18,91	3,598	10	4,5	2,222	21,4	2,51	8	6	1,333
17,87	3,4	9,2	4,5	2,044	23,42	2,747	9,2	6	1,533
18,61	3,541	10	4,5	2,222	24,59	2,884	10	6	1,667
20,7	3,939	11	4,5	2,444	26,71	3,133	11	6	1,833
21,53	4,097	12,4	4,5	2,756	22,2	2,604	8	6	1,333
18,7	3,558	10	4,5	2,222	22,61	2,652	9,2	6	1,533
24,45	4,652	14	4,5	3,111	24	2,815	10	6	1,667
21,67	4,123	11	4,5	2,444	25,87	3,035	11	6	1,833
22,11	4,207	12,4	4,5	2,756	28,69	3,365	12,4	6	2,067
22,41	4,264	14	4,5	3,111	30,48	3,575	14	6	2,333
26,1	4,966	15	4,5	3,333	$h_1= 70\text{mm } M=0,466$				
27,13	5,162	16	4,5	3,556	Q	F_1	s	h_1	s/h_1

Tableau 01: valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince
Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 (suite).

30,83	5,866	18,4	4,5	4,089	22,26	2,003	6,1	7	0,871
$h_1 = 70\text{mm}$ $M=0,466$					25,52	2,296	8	7	1,143
Q	F_1	s	h_1	s/h_1	28,11	2,529	9,2	7	1,314
22,96	2,066	5,5	7	0,786	22,75	2,047	6,1	7	0,871
20,89	1,879	5,5	7	0,786	24,43	2,198	7,4	7	1,057
22,31	2,007	6,1	7	0,871	25,6	2,303	8	7	1,143
24,38	2,193	7,4	7	1,057	27,78	2,499	9,2	7	1,314
25,51	2,295	8	7	1,143	29,77	2,678	10	7	1,429

Tableau 02 : valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince
Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1

Q	h_1	h_2	F_1	Y	Q	h_1	h_2	F_1	Y
6,72	2	9	4,717	4,500	7,74	3	8,2	2,854	2,733
6,26	2	8,51	4,394	4,255	8,77	3	9,72	3,234	3,240
7,02	2	10,35	4,928	5,175	9,73	3	11,46	3,588	3,820
7,7	2	11,82	5,405	5,910	7,67	3	8,08	2,828	2,693
6,29	2	9,75	4,415	4,875	8,93	3	10,12	3,293	3,373
7,05	2	10,94	4,949	5,470	9,93	3	11,67	3,661	3,890
7,77	2	11,82	5,454	5,910	10,1	3	13,29	3,724	4,430
8,25	2	12,47	5,791	6,235	11,63	3	13,5	4,288	4,500
9,27	2	14,3	6,507	7,150	8,07	3	10,09	2,975	3,363
7,09	2	10,32	4,977	5,160	8,65	3	10,04	3,189	3,347
8,04	2	12,11	5,644	6,055	9,76	3	11,41	3,599	3,803
8,4	2	13,23	5,897	6,615	10,08	3	12,92	3,717	4,307
9,38	2	14,39	6,585	7,195	11,2	3	13,16	4,13	4,387
9,83	2	13,31	6,9	6,655	12,29	3	14,06	4,531	4,687
11,07	2	15,38	7,771	7,690	13,32	3	15,24	4,911	5,080
8,25	2	12,77	5,791	6,385	10,5	3	12,73	3,871	4,243
9,48	2	14,44	6,655	7,220	11,61	3	13,41	4,281	4,470
10,03	2	15,3	7,041	7,650	12,27	3	14,01	4,524	4,670
10,94	2	15,5	7,68	7,750	13,36	3	15,3	4,926	5,100
12,04	2	17	8,452	8,500	14,78	3	16,65	5,45	5,550
13,56	2	19,65	9,519	9,825	16,21	3	18,31	5,977	6,103
14,61	2	20,73	10,256	10,365	17,58	3	20	6,482	6,667
14,59	2	20,66	10,242	10,330	12,43	3	14,02	4,583	4,673
13,61	2	19,9	9,554	9,950	13,38	3	15,36	4,933	5,120
12,09	2	18,06	8,487	9,030	14,78	3	16,5	5,45	5,500
11,03	2	16,17	7,743	8,085	16,27	3	18,3	5,999	6,100
10,03	2	15,07	7,041	7,535	17,62	3	20,88	6,497	6,960
Q	h_1	h_2	F_1	Y	18,5	3	20,09	6,821	6,697
11,67	4,5	10,37	2,221	2,304	16,56	3	20,07	6,843	6,690
13,62	4,5	11,65	2,592	2,589	21,61	3	24,05	7,968	8,017
14,93	4,5	13,67	2,841	3,038	22,5	3	24,49	8,296	8,163
16,23	4,5	13,96	2,841	3,102	23,8	3	25,3	8,775	8,433
12,87	4,5	11,83	2,449	2,629	Q	h_1	h_2	F_1	Y
15,01	4,5	13,08	2,856	2,907	15,22	4,5	14,25	2,896	3,167
15,09	4,5	13,76	2,871	3,058	16,46	4,5	14,71	3,132	3,269
16,9	4,5	13,92	3,216	3,093	17,98	4,5	16,15	3,421	3,589
17,6	4,5	15,4	3,349	3,422	18,91	4,5	17,52	3,598	3,893
13,19	4,5	11,21	2,51	2,491	17,87	4,5	16,12	3,4	3,582
14,51	4,5	12,83	2,761	2,851	18,61	4,5	18,01	3,541	4,002

Tableau 02: valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince
Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 (suite).

Q	h_1	h_2	F_1	Y	Q	h_1	h_2	F_1	Y
20,7	4,5	18,73	3,939	4,162	17,16	6	11,8	2,013	1,967
21,53	4,5	19,65	4,097	4,367	19,24	6	12,84	2,257	2,140
18,7	4,5	17,44	3,558	3,876	21,02	6	14,3	2,466	2,383
24,45	4,5	20,7	4,652	4,600	16,65	6	11,89	1,953	1,982
21,67	4,5	19,09	4,123	4,242	18,46	6	12,48	2,165	2,080
22,11	4,5	20,28	4,207	4,507	20,05	6	13,96	2,352	2,327
22,41	4,5	21,52	4,264	4,782	21,5	6	15,6	2,522	2,600
26,1	4,5	23,03	4,966	5,118	22,95	6	16,92	2,692	2,820
27,13	4,5	23,88	5,162	5,307	20,29	6	14,04	2,38	2,340
30,83	4,5	26,76	5,866	5,947	21,4	6	15,12	2,51	2,520
Q	h_1	h_2	F_1	Y	23,42	6	17,34	2,747	2,890
22,96	7	14,95	2,0656	2,136	24,59	6	17,58	2,884	2,930
20,89	7	12,22	1,8794	1,746	26,71	6	19,22	3,133	3,203
22,31	7	14,02	2,0072	2,003	22,2	6	15,96	2,604	2,660
24,38	7	15,1	2,1934	2,157	22,61	6	16,8	2,652	2,800
25,51	7	16,3	2,2951	2,329	24	6	17,4	2,815	2,900
22,26	7	14	2,0027	2,000	25,87	6	18,12	3,035	3,020
25,52	7	16,81	2,296	2,401	28,69	6	20,7	3,365	3,450
28,11	7	17,55	2,529	2,507	30,48	6	21,91	3,575	3,652
22,75	7	14,14	2,0468	2,020	-	-	-	-	-
24,43	7	15,94	2,1979	2,277	-	-	-	-	-

Tableau 03: valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince
Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

Q	F_1	Lj	h_1	F_1	Lj/ h_1	Q	F_1	Lj	h_1	F_1	Lj/ h_1
6,72	4,717	105	2	4,717	52,50	13,36	4,926	202	3	4,926	67,33
6,26	4,394	114	2	4,394	57,00	14,78	5,45	207	3	5,45	69,00
7,02	4,928	118,3	2	4,928	59,15	16,21	5,977	214	3	5,977	71,33
7,7	5,405	130	2	5,405	65,00	17,58	6,482	220	3	6,482	73,33
6,29	4,415	100,9	2	4,415	50,45	12,43	4,583	188	3	4,583	62,67
7,05	4,949	125,5	2	4,949	62,75	13,38	4,933	201	3	4,933	67,00
7,77	5,454	145,5	2	5,454	72,75	14,78	5,45	209	3	5,45	69,67
8,25	5,791	151,6	2	5,791	75,80	16,27	5,999	221	3	5,999	73,67
9,27	6,507	170	2	6,507	85,00	17,62	6,497	230	3	6,497	76,67
7,09	4,977	126,5	2	4,977	63,25	18,5	6,821	260	3	6,821	86,67
8,04	5,644	145	2	5,644	72,50	16,56	6,843	223	3	6,843	74,33
8,4	5,897	154	2	5,897	77,00	21,61	7,968	240	3	7,968	80,00
9,38	6,585	175	2	6,585	87,50	22,5	8,296	255	3	8,296	85,00
9,83	6,9	177	2	6,9	88,50	23,8	8,775	280	3	8,775	93,33
11,07	7,771	200	2	7,771	100,00	11,67	2,221	55,8	4,5	2,221	12,40
8,25	5,791	166	2	5,791	83,00	13,62	2,592	92,6	4,5	2,592	20,58
10,94	7,68	205	2	7,68	102,50	14,93	2,841	120,1	4,5	2,841	26,69
12,04	8,452	211	2	8,452	105,50	16,23	2,841	150	4,5	2,841	33,33
14,61	10,256	240	2	10,256	120,00	12,87	2,449	126,2	4,5	2,449	28,04
12,09	8,487	212	2	8,487	106,00	15,01	2,856	150,3	4,5	2,856	33,40
11,03	7,743	205,4	2	7,743	102,70	15,09	2,871	147,3	4,5	2,871	32,73
7,74	2,854	78	3	2,854	26,00	16,9	3,216	154,8	4,5	3,216	34,40
8,77	3,234	100	3	3,234	33,33	17,6	3,349	180	4,5	3,349	40,00
9,73	3,588	120	3	3,588	40,00	17,87	3,4	170,3	4,5	3,4	37,84
7,67	2,828	87,2	3	2,828	29,07	18,61	3,541	195,7	4,5	3,541	43,49
8,93	3,293	120,8	3	3,293	40,27	20,7	3,939	207,3	4,5	3,939	46,07
9,93	3,661	126,5	3	3,661	42,17	21,53	4,097	217,3	4,5	4,097	48,29
10,1	3,724	130	3	3,724	43,33	18,7	3,558	177,1	4,5	3,558	39,36
11,63	4,288	150	3	4,288	50,00	24,45	4,652	260	4,5	4,652	57,78
8,07	2,975	119	3	2,975	39,67	21,67	4,123	203,3	4,5	4,123	45,18

Tableau 03: valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince
Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 (suite).

Q	F_1	Lj	h_1	F_1	Lj/ h_1	Q	F_1	Lj	h_1	F_1	Lj/ h_1
8,65	3,189	126	3	3,189	42,00	22,11	4,207	223,3	4,5	4,207	49,62
9,76	3,599	135,5	3	3,599	45,17	22,41	4,264	241,6	4,5	4,264	53,69
10,08	3,717	152,7	3	3,717	50,90	26,1	4,966	255,1	4,5	4,966	56,69
11,2	4,13	158,5	3	4,13	52,83	27,13	5,162	260,3	4,5	5,162	57,84
12,29	4,531	163,4	3	4,531	54,47	30,83	5,866	300	4,5	5,866	66,67
13,32	4,911	180	3	4,911	60,00	19,24	2,257	108,5	6	2,257	18,08
10,5	3,871	152	3	3,871	50,67	21,02	2,466	140	6	2,466	23,33
11,61	4,281	183	3	4,281	61,00	16,65	1,953	65,7	6	1,953	10,95
12,27	4,524	190	3	4,524	63,33	18,46	2,165	98,4	6	2,165	16,40
22,96	2,0656	120	7	2,0656	17,14	20,05	2,352	125,8	6	2,352	20,97
20,89	1,8794	71,4	7	1,8794	10,20	21,5	2,522	149,8	6	2,522	24,97
22,31	2,0072	106	7	2,0072	15,14	22,95	2,692	180	6	2,692	30,00
24,38	2,1934	120	7	2,1934	17,14	20,29	2,38	148	6	2,38	24,67
25,51	2,2951	170	7	2,2951	24,29	21,4	2,51	170,4	6	2,51	28,40
22,26	2,0027	80,9	7	2,0027	11,56	23,42	2,747	190,7	6	2,747	31,78
25,52	2,296	167	7	2,296	23,86	24,59	2,884	200,4	6	2,884	33,40
28,11	2,529	220	7	2,529	31,43	26,71	3,133	240	6	3,133	40,00
24,43	2,1979	156,4	7	2,1979	22,34	22,2	2,604	155	6	2,604	25,83
25,6	2,300	180,5	7	2,300	25,79	22,61	2,652	184	6	2,652	30,67
27,78	2,4993	198,5	7	2,4993	28,36	24	2,815	207	6	2,815	34,50
29,77	2,67	260	7	2,67	37,14	25,87	3,035	219	6	3,035	36,50

Tableau 04 : valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince
la variation du rapport des hauteurs conjugués (Y) en fonction du débit relatif Q^* .

Q*	Y	h_2	h_1	Q	Q*	Y	h_2	h_1	Q
0,066	5,175	10,35	2	7,02	0,207	4,673	14,02	3	12,43
0,080	5,910	11,82	2	7,7	0,240	5,120	15,36	3	13,38
0,053	4,875	9,75	2	6,29	0,293	5,500	16,5	3	14,78
0,067	5,470	10,94	2	7,05	0,355	6,100	18,3	3	16,27
0,081	5,910	11,82	2	7,77	0,417	6,960	20,88	3	17,62
0,091	6,235	12,47	2	8,25	0,459	6,697	20,09	3	18,5
0,115	7,150	14,3	2	9,27	0,368	6,690	20,07	3	16,56
0,067	5,160	10,32	2	7,09	0,627	8,017	24,05	3	21,61
0,087	6,055	12,11	2	8,04	0,680	8,163	24,49	3	22,5
0,095	6,615	13,23	2	8,4	0,760	8,433	25,3	3	23,8
0,118	7,195	14,39	2	9,38	0,183	2,304	10,37	4,5	11,67
0,165	7,690	15,38	2	11,07	0,249	2,589	11,65	4,5	13,62
0,091	6,385	12,77	2	8,25	0,299	3,038	13,67	4,5	14,93
0,121	7,220	14,44	2	9,48	0,354	3,102	13,96	4,5	16,23
0,135	7,650	15,3	2	10,03	0,222	2,629	11,83	4,5	12,87
0,161	7,750	15,5	2	10,94	0,302	2,907	13,08	4,5	15,01
0,195	8,500	17	2	12,04	0,306	3,058	13,76	4,5	15,09
0,247	9,825	19,65	2	13,56	0,383	3,093	13,92	4,5	16,9
0,287	10,365	20,73	2	14,61	0,416	3,422	15,4	4,5	17,6
0,286	10,330	20,66	2	14,59	0,234	2,491	11,21	4,5	13,19
0,249	9,950	19,9	2	13,61	0,283	2,851	12,83	4,5	14,51
0,196	9,030	18,06	2	12,09	0,311	3,167	14,25	4,5	15,22
0,163	8,085	16,17	2	11,03	0,364	3,269	14,71	4,5	16,46
0,135	7,535	15,07	2	10,03	0,434	3,589	16,15	4,5	17,98
0,080	2,733	8,2	3	7,74	0,480	3,893	17,52	4,5	18,91
0,103	3,240	9,72	3	8,77	0,429	3,582	16,12	4,5	17,87
0,127	3,820	11,46	3	9,73	0,465	4,002	18,01	4,5	18,61
0,079	2,693	8,08	3	7,67	0,575	4,162	18,73	4,5	20,7

Tableau 04 : valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince la variation du rapport des hauteurs conjugués (Y) en fonction du débit relatif Q^* (suite).

Q^*	Y	h_2	h_1	Q	Q^*	Y	h_2	h_1	Q
0,132	3,890	11,67	3	9,93	0,469	3,876	17,44	4,5	18,7
0,137	4,430	13,29	3	10,1	0,802	4,600	20,7	4,5	24,45
0,182	4,500	13,5	3	11,63	0,630	4,242	19,09	4,5	21,67
0,087	3,363	10,09	3	8,07	0,656	4,507	20,28	4,5	22,11
0,100	3,347	10,04	3	8,65	0,674	4,782	21,52	4,5	22,41
0,128	3,803	11,41	3	9,76	0,914	5,118	23,03	4,5	26,1
0,136	4,307	12,92	3	10,08	0,988	5,307	23,88	4,5	27,13
0,168	4,387	13,16	3	11,2	1,276	5,947	26,76	4,5	30,83
0,203	4,687	14,06	3	12,29	0,395	1,967	11,8	6	17,16
0,238	5,080	15,24	3	13,32	0,497	2,140	12,84	6	19,24
0,148	4,243	12,73	3	10,5	0,593	2,383	14,3	6	21,02
0,181	4,470	13,41	3	11,61	0,372	1,982	11,89	6	16,65
0,202	4,670	14,01	3	12,27	0,457	2,080	12,48	6	18,46
0,240	5,100	15,3	3	13,36	0,540	2,327	13,96	6	20,05
0,293	5,550	16,65	3	14,78	0,621	2,600	15,6	6	21,5
0,353	6,103	18,31	3	16,21	0,708	2,0656	14,95	7	22,96
0,415	6,667	20	3	17,58	0,586	1,8794	12,22	7	20,89
2,401	2,296	15,94	7	22,75	0,668	2,0072	14,02	7	22,31
2,020	2,0468	18,07	7	25,6	0,874	2,2951	16,3	7	25,51
2,277	2,1979	18,27	7	27,78	0,665	2,0027	14	7	22,26

Tableau 05 : Profil de surface généralisé

M	s	X/Lj	Y	M	s	X/Lj	Y	M	s	X/Lj	Y
0.133	7.4	0,1923	0,591	0.2	11	0,166	0,421	0,3	10	0,451	0,169
		0,307	0,723			0,333	0,659			0,636	0,283
		0,423	0,845			0,444	0,768			0,79	0,396
		0,538	0,947			0,555	0,857			0,801	0,510
		0,653	0,993			0,666	0,937			0,913	0,624
		1	1			0,777	0,982			0,987	0,737
	9.2	0,088	0,29			0,888	0,999			0,997	0,851
		0,176	0,473		15	0,409	0,711		0,4	1	1
		0,264	0,633			0,545	0,965			0,143	0,485
		0,352	0,698			0,681	0,980			0,451	0,865
		0,441	0,701			0,818	0,988			0,605	0,991
		0,539	0,814			0,954	0,994			0,758	0,998
		0,617	0,843		20	0,142	0,357			0,807	0,999
		0,705	0,957			0,285	0,649		6,1	0,4	0,781
		0,794	0,978			0,714	0,987			0,5	0,893
	11	0,2	0,577			0,857	0,995			0,6	0,928
		0,3	0,653		8	1	1			0,7	0,999
		0,4	0,786			0,248	0,585		9,2	0,111	0,348
		0,5	0,873			0,648	0,865			0,305	0,635
		0,6	0,894			0,782	0,957			0,416	0,744
		0,7	0,938			0,915	0,985			0,75	0,935
		0,8	0,96		9,2	1	1			0,861	0,963
		0,9	1			0,429	0,72		0,466	0,91	0,91
	20	0,296	0,633			0,54	0,822			0,971	0,97
		0,444	0,763			0,651	0,878			0,954	0,954
		0,592	0,899			0,762	0,912			0,997	0,997
		0,74	0,961			0,873	0,975			0,411	0,736
										0,588	0,84
										0,676	0,922
		0,888	1			1	1			0,764	0,91

Tableau 06 : Valeurs des rendements théoriques et expérimentals du ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

$F_{1\text{ th}}$	η_{th}	$F_{1\text{ exp}}$	η_{exp}
1,39	0,011	4,7	0,563
1,79	0,06	5,41	0,569
2,21	0,135	6,51	0,635
2,63	0,212	7,77	0,72
3,07	0,289	10,25	0,782
3,52	0,359	14,33	0,852
3,99	0,424	3,59	0,387
4,47	0,480	4,29	0,476
4,95	0,527	4,91	0,539
5,45	0,569	6,48	0,643
5,97	0,608	6,82	0,662
6,49	0,640	8,79	0,75
7,03	0,670	3,08	0,323
7,54	0,694	3,35	0,355
9,86	0,772	4,65	0,517
11,07	0,798	5,86	0,596
1,40	0,011	2,46	0,192
1,82	0,065	2,67	0,212
2,72	0,233	3,55	0,366
3,20	0,317	2,06	0,11
3,69	0,391	2,028	0,162
4,20	0,456	2,52	0,147
4,73	0,514	2,67	0,248

ANNEXE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Debabeche, M., Achour, B., (1996). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, 1er Séminaire Maghrébin sur l'eau, Université de Tizi-Ouzou.
- Achour, B., Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire. Journal of Hydraulic Research 41(3), 319-325.
- Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Achour, B., Debabeche, M., (2003), Ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en U, J. Hydraulic Research, vol. 41, N0.3, pp.319-325.
- Achour, B., Debabeche, M., (2003), Control of Hydraulic jump by sill in a triangular channel, J. Hydraulic Research, Vol. 41, No. 3, pp. 97-103 .
- GHOMRI, A. (2005). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant en canal profilé en U, Mémoire de Magister en Sciences Hydraulique, Département d'Hydraulique, Université de Biskra.
- Hager, W.H., Wanoschek, R (1989), Hydraulic jump in trapezoidal channel, J. hydraulic research, Vol. 27, 1989, N.3.
- Hager, W.H., (1989), Hydraulic jump in U-shaped channel, Proc.ASCE, J. Hydraulic Engineering, 115, 667-675.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES