



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté Technologie et génie civil

Département d'hydraulique



MEMOIRE DE FIND'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN HYDRAULIQUE

Option : Ouvrage hydraulique

l'intitulé du thème :

Contribution à l'étude de la variation des hauteurs conjuguées du Ressaut Hydraulique Forcé type A par seuil mince dans un Canal Rectangulaire Composée

▲ **Devant le jury composé de :**

- * Dr Sayeh Lambarek Mohamed
- * Dr GOHMRI ALI
- * Dr RIGUET FERHAT

Président
Examineur
Encadreur

Présenté par :

- * HAMIDANI YOUNES
- * TITA BACHIR

Promotion : Juin2024

Dédicaces :

Je dédié ce travail à tous ceux qui m'ont

Soutenu de près et de loin

Ama famille

Mes proches, A tous mes Amis

REMERCIEMENT

*Nous tenons à remercier tous premièrement **ALLAH** le tout puissant
pour la volonté, Laforce, le courage, la santé et la patient ce,
qu'il nous a donné durant tout ces longues années d'étude.*

*En premier lieu nous tenons à remercier monsieur RIGUET Ferhat mon notre
encadreur. et GHOMRI ALI co- encadreur pour l'intérêt qu'elle a porté à notre
recherche et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Nos vifs remerciements vont également au membre du jury monsieur
d'avoir accepté de présider le jury. et monsieur en
acceptant d'examiner notre travail*

RESUME

Notre travail concerne à la Contribution à l'étude de la variation des hauteurs conjuguées du Ressaut Hydraulique Forcé type A par seuil mince dans un Canal Rectangulaire Composé.

Notre travail se subdivise en deux parties essentielles, la première concernant une étude bibliographique et a seconde traite une expérimentation de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique Forcé type A par seuil mince dans un canal rectangulaire composée.

Mots clés : Ressaut hydraulique Forcé type A, Canal rectangulaire composé, écoulement brusquement varié.

ABSTRACT

Our work concerns the Contribution to the study of the variation of the combined heights of the Forced Hydraulic Jump Type A by thin threshold in a Compound Rectangular Canal

our work is subdivided into two essential parts, the first concerning a bibliographic study and the second deals with an experimentation of some characteristics of the Forced hydraulic jump type A by thin threshold in a rectangular compound channel.

Keywords: Forced hydraulic jump type A, Compound rectangular channel, suddenly varied flow.

الملخص

يتعلق عملنا بالمساهمة في دراسة تباين الارتفاعات المجمع للقفز الهيدروليكي القسري من النوع - أ - بواسطة عتبة رقيقة في قناة مستطيلة مركبة
ينقسم عملنا إلى قسمين أساسيين، الأول يتعلق بالدراسة الببليوغرافية والثاني يتناول تجربة بعض خصائص القفز الهيدروليكي القسري نوع - أ - بواسطة عتبة رقيقة في قناة مركبة مستطيلة.

الكلمات المفتاحية: القفزة الهيدروليكية - قناة مستطيلة مركبة - تدفق قوي ومفاجئ.

SOMMAIRE

Première Partie : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
INTRODUCTION GENERALE	
INTRODUCTION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre I: Ecoulement brusquement varié (ressaut hydraulique)	
1.1 introduction	5
1.2 Définition du ressaut hydraulique	5
1.3. Ressaut hydraulique classique	6
1.4. Ressaut hydraulique classique	6
1.5. Profondeurs conjuguées	8
1.6. Longueurs caractéristiques du ressaut	9
1.6.1. Longueur du rouleau	9
1.6.2. Longueur du ressaut	9
1.7. Perte d'énergie dans le ressaut hydraulique	10
1.8. Rendement du ressaut	11
1.9. Bassin d'amortissement	12
1.10. Application du ressaut hydraulique	12
1.11. Conclusion	13
Chapitre II : Ressaut hydraulique forcé dans un canal rectangulaire	
2.1. Introduction	15
2.2. APPROCHE DE RAND (1957)	12
2.3. APPROCHE DE BRETZ (1988)	18
2.3.1. Généralités	18
2.3.2. Procédure expérimentale	19
2.3.3. Hauteurs conjuguées du ressaut	20
2.3.4 Longueur relative du bassin	22
2.3.5. APPROCHE DE HAGER ET LI (1992)	24
2.3.5.1. Rapport des hauteurs conjuguées	24
2.4. Conclusion	26
Chapitre III : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée	
3.1. Introduction	28
3.2 . APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR (2000)	28

3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées	28
3.2.2. Rendement du ressaut	32
3.3. TRAVAUX DE RIGUET ET AL 2020	33
3.3.1. Position du problème	33
3.3.2. DESCRIPTION DES ESSAIS	34
3.3.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX	35
3.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées	35
3-4. Conclusion	36
Deuxième partie : Introduction de la Partie EXPERIMENTALE	
Chapitre IV : Description du model expérimental	
4.1. Introduction	40
4.2. Description du canal	40
4.3. Les seuils à paroi mince :	43
4.4. Procédure de mesure des débits :	45
4.5. Limnimètre	46
4.6.. Conclusion	46
Chapitre V : Etude expérimentale	
5.1. Introduction	48
5.2. Description des essais	48
5.3. Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	52
5.4. Conclusion	58
CONCLUSION GENERALE	59
ANNEXE	
REFERENCEBIBLIOGRAPHIE	

liste des figures

LISTE DE FIGURE

Première Partie_: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre I : Ecoulement brusquement varié (ressaut hydraulique)	
Fig. 1.1 : Ressaut hydraulique	5
Fig.1.2 : Ressaut hydraulique au pied d'un barrage-déversoir	6
Fig.1.3 : Classification des ressauts	7
Fig.1.4 : Dissipation d'énergie	10
Fig.1.5: Schéma de principe d'un bassin d'amortissement	12
Chapitre II : Ressaut hydraulique forcé dans un canal rectangulaire	
Fig.2.1 : Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes : 0) ressaut classique ; 1) classe 1, longueur LS,min ; 2) classe 2, longueur intermédiaire LS; 3) classe 3, longueur LS,max, et 4) ressaut classique avec hauteurs conjuguées h1 et h2. s : hauteur du seuil, sc : hauteur critique du seuil et smax : hauteur maximale du seuil.	16
Fig.2.2: Hauteurs conjuguées $h_2/h_1 = f(S,K)$ pour $F_1 = 9$. Valeurs et courbes expérimentales ; (---) limite d'influence de l'aval sur l'amont.	17
Fig.2.3: Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $IF_1=5,23$ et $S=1,42$. a)ressaut type A; a) Ressaut type B; c)ressaut type B minimum ;d) ressaut type C et e) onde.(Bretz,1987).	18
Fig. 2.4: Ressaut forcé par seuil : définition des termes. H1 charge amont, H2 charge aval, ΔH perte de charge. h1 hauteur d'eau amont, h2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x0 position du pied du ressaut, xS position du seuil, xrf position de la fin du rouleau de fond à l'aval, LR longueur du rouleau de surface, LS position du seuil par rapport au pied du ressaut, LRF longueur du rouleau de fond aval, LB distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval.	19
Fig.2.5: Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_A = f(IF_1, S)$ avec $0,5 \leq S \leq 6$. $S=s/h_1$. (□) courbe selon l'équation de Bélanger. (---) courbe du ressaut classique selon l'équation (1.48).	20
Fig.2.6: Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_B = f(IF_1, S)$. Même notation que la (fig.2.7).	21
Fig.2.7:: Ressaut forcé type B-min. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_{B-min} = f(IF_1, S)$. Même notation que la (fig.2.7).	21
Fig.2.8 (a, b, c) : longueur relative $\lambda_s=f(F_1)$ pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B-min. (□) courbe selon l'equ : a) (II.6), b) (II.8) et c) (2.8) respectivement. (---) courbe limite.	23
Fig.2.9 (a, b, c): longueur relative $\lambda_B=f(F_1)$ pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B-min. (□) courbe selon l'equ : a) (II.7), b) (II.9) et c) (2.9) respectivement. (---) courbe limite.	23

Fig.2.10 : Réduction de hauteur aval ΔY_S suite à la présence du seuil, fonction de la position relative $(1-\Lambda)^2$ et de la hauteur relative S du seuil. $S = (\nabla)$ 1, (o) 2, (Δ) 3 et $(\square)$ 4. (...) équation (2.13). (---) équation (2.14).	24
Fig.2.11 : Variation de δ en fonction de la position relative $(1-\Lambda)$ pour $S = (\nabla)$ 1, $(\bullet)$ 2, (Δ) 3 et $(\square)$ 4	25
Chapitre III : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé	
Fig.3.1 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit	28
Fig.3.2 : Variation de Y , calculé par (3-6), en fonction de $F1$.(-- -): $\beta=1$	31
Fig.3.3 : Variation Y en fonction de $F1$. (0):équation2, (+):équation 1	31
Fig.3.4 : Variation de η en fonction de $F1$. (---) : $\beta=1$. Y est calculé par l'équation (3).	32
Fig.3.5 : Variation η en fonction de $F1$. (0) : équation2, (+): équation 1	33
Fig.3.6 : Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire composé.	34
Fig.3.7 Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du nombre de Froude $F1$ pour les Deux lits du canal composé. ($\square$) points de mesures expérimentales en lit majeur ;(Δ) points de mesures expérimentales en lit mineur. ($\square$) Courbes d'ajustements.	35
Deuxième Partie : ETUDE EXPERIMENTALE	
Chapitre IV : Description du model expérimental	
Fig.4.1 : Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composé	41
Photo4.1 : Photographie du model expérimentale du canal	41
Photo4.2 : Pompe centrifuge axial	42
Photo4.3 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit	42
Photo. 4.4 :Photographie d'une boite en charge	43
Photo.4.5 : Photographie des seuils minces testés	44
Photo.4.6 : Photographie de support du seuil.	44
Photo.4.7 Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit	45
Fig.4.2 : Photographie des seuils minces testés	46
Chapitre V : Etude expérimentale	
Fig.5.1 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude $F1$ pour le lit mineur. ($\square$) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement	48
Fig. 5.2 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude $F1$ pour le lit majeur. ($\square$) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement	49
Fig.5.3 : montre clairement un décalage entre les valeurs de Y du ressaut forcé par seuil mince, pour les mêmes nombres de Froude $F1$.	50
Fig.5.4 : Variation du rapport $s/h1$ en fonction du nombre de Froude $F1$ pour les deux lits du canal composé. (+) points de mesures expérimentales en lit mineur ; Pour $h0/h2 >1$.	52
Fig. 5.5 : Variation du rapport $s/h1$ en fonction du nombre de Froude $F1$ pour le lit majeur du canal composé. ($\square$) points de mesures expérimentales en lit majeur.	53

Fig.5.6. (a, b, c, d, e). Variation du rapport $S = s/h_1$ de la hauteur relative du seuil du ressaut forcé en fonction de nombre de Froude respectivement pour $h_1/B = (0.06 ; 0.058 ; 0,05 ; 0,0416 ; 0,033)$. (o) points expérimentaux. (—) courbe d'ajustement.	54
Fig.5.7: Variation du paramètre 'b' en fonction de h_1/B	56
Fig.5.8 : Variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction de la relation $f(F_1, h_1/B)$. (o) Points expérimentaux. (□) Première bissectrice d'équation : $s/h_1 = f(F_1, h_1/B)$.	57

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre III : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme	
Tableau3.1 : symboles et notation	29
Chapitre V : Etude expérimentale	
Tableau.5.1. Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F1)$ pour $h0/h2 \geq 1$ et $h0/h2 < 1$.	51
Tableau.5.2. Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $s/h1 = f(F1)$ pour $h0/h2 \geq 1$ et $h0/h2 < 1$.	55
Tableau.5.3. Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant $s/h1$ au nombre de Froude $F1$ pour différentes hauteurs $h1$ des ouvertures	56

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les ressauts hydrauliques sont des phénomènes complexes qui se produisent dans les canaux lorsque le flux d'eau passe d'une section à une autre, entraînant une élévation soudaine du niveau de l'eau suivie d'une chute abrupte. Ces phénomènes, bien que fascinants du point de vue hydraulique, présentent également des défis importants en matière de conception et de gestion des ressources en eau.

Dans le cadre de cette étude, nous nous concentrons spécifiquement sur le ressaut hydraulique forcé de type A, qui se produit lorsque le débit du canal est supérieur au débit critique. Nous examinons comment la présence d'un seuil mince dans un canal rectangulaire composé influe sur la variation des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique.

Les objectifs principaux de cette étude sont les suivants:

- Analyser l'impact de la présence d'un seuil mince sur la formation et l'évolution du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé.
- Examiner les variations des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction des paramètres du canal et du seuil mince.
- Valider les résultats théoriques par des expériences en laboratoire et des simulations Numériques .

Ce travail est subdivisé en deux parties principales qui se résument comme suit :

- ***Première partie: etude bibliographique.***
- ***Deuxième partie: étude expérimental Laboratoire d'Hydraulique Souveraine et de Surface (LARHYSS) BISKRA***

Il est composé de cinq chapitres :

Chapitre I : Ecoulement brusquement varié (ressaut hydraulique)

Chapitre II : Ressaut hydraulique forcé dans un canal rectangulaire

Chapitre III : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée

Chapitre IV : Description du modèle expérimental

Chapitre V : Etude expérimentale

Première partie

Etude bibliographique

1- INTRODUCTION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

La première partie de notre étude traite le Ressaut hydraulique classique qui a pour but principal, de passer en revue les travaux les plus intéressants, ayant abordé le ressaut hydraulique dans quelques canaux prismatiques cités sous les chapitres cités dans la partie bibliographique suivante :

- ***Le premier chapitre*** a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur l'écoulement brusquement varié (ressaut hydraulique)
- ***Le deuxième chapitre*** de cette partie sera consacré aux travaux les plus importants concernant le ressaut hydraulique forcé type A dans un canal rectangulaire.
- ***Le dernier chapitre*** traite le Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composé

Chapitre I

**Ecoulement brusquement varié
(ressaut hydraulique)**

1.1. INTRODUCTION

Un écoulement brusquement varié se produit lorsqu'il y a un changement soudain dans les conditions d'écoulement d'un fluide dans un canal ou une conduite. Cela peut se produire lorsque la section transversale du canal change rapidement, par exemple, lorsque l'eau passe d'une conduite de grand diamètre à une conduite de petit diamètre.

Dans de telles situations, plusieurs phénomènes se produisent simultanément, notamment des variations de la vitesse, de la pression et de la profondeur de l'eau. Ces variations peuvent générer des ondes de choc et des turbulences dans le fluide.

1.2 Définition du ressaut hydraulique

Le ressaut hydraulique (fig.1.1) est une surélévation brusque de la surface libre d'un courant survenant lorsqu'un régime torrentiel devient fluvial sur une courte distance

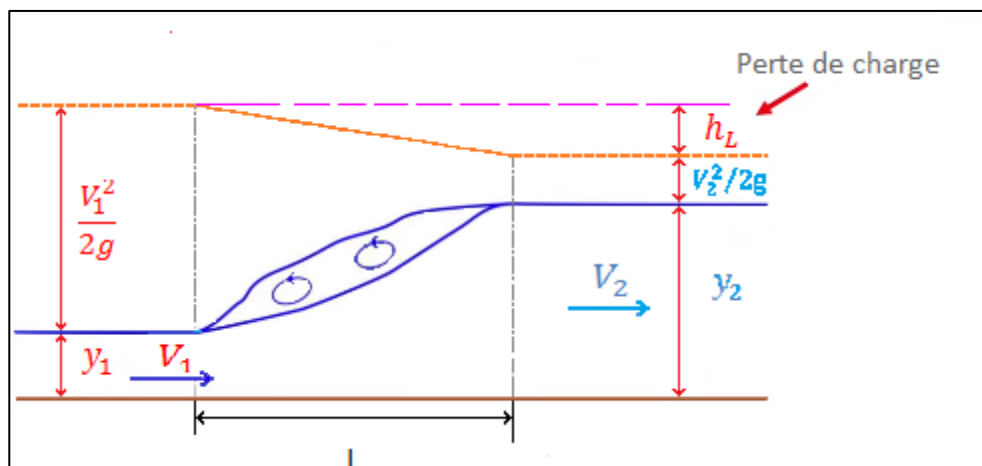


Fig.1.1 Ressaut hydraulique

Le ressaut hydraulique peut se produire dans différentes circonstances : par exemple au pied d'un barrage-déversoir (fig.1.2) ou à l'aval d'un écoulement en-dessous d'une vanne de fond ou encore dans un canal à forte pente débouchant dans un écoulement fluvial.

La ligne d'énergie, indiquée en pointillé sur la (fig.1.2), montre que le Ressaut hydraulique provoque une dissipation d'énergie par turbulence (h_L).

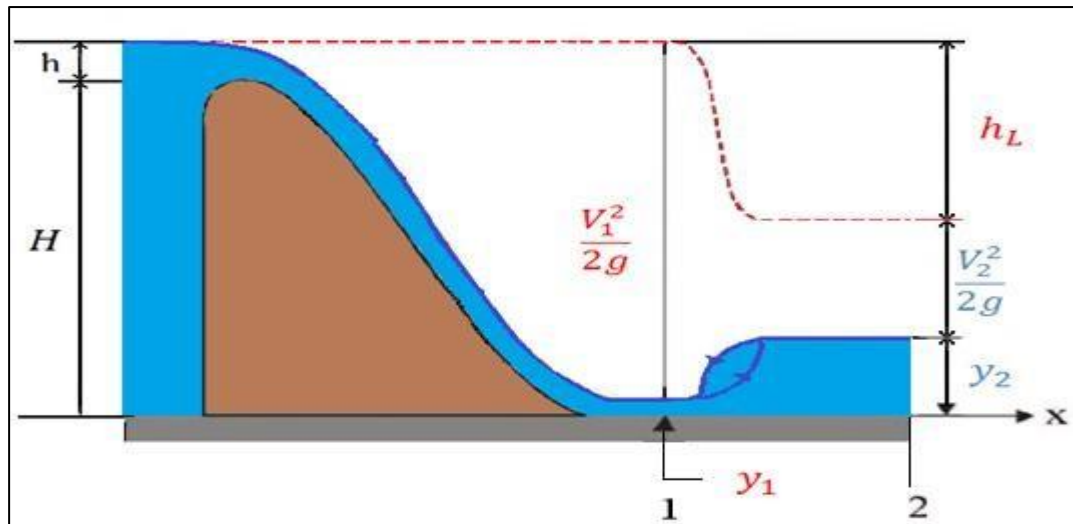


Fig.1.2 Ressaut hydraulique au pied d'un barrage-déversoir

1.3. Ressaut hydraulique classique

Le ressaut hydraulique classique se produit dans un canal rectangulaire de pente nulle ou faible, sa facilité la rend le profil le plus utilisé dans la pratique et dont plusieurs travaux notamment expérimentaux qui ont contribué davantage à une compréhension meilleure du phénomène.

1.4. Classification de ressaut

Le paramètre déterminant pour cette classification est le nombre de Froude (F_1) qui correspond aux conditions à l'amont.

On rappelle que le nombre de Froude est le rapport entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation des perturbations de l'écoulement.

- Pour les valeurs de $F_1 \leq 1$, le régime est lent, ou critique, il n'y a pas de ressaut.
- 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 (fig.1.3 a)

Selon la classification de Bradly et Peter ka (1957) on distingue quatre formes de ressaut classique pour les valeurs de Froude supérieures à 1,7.

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 (fig.1.3 b).

2. Pour des valeurs de $2.5 < F1 < 4.5$ l'écoulement est pulsative ; la plus grande turbulence se vérifie soit près de fond, ou à la surface : c'est le ressaut d'oscillant (fig.1.3 c).
3. Pour des valeurs de $4.5 < F1 < 9$, le ressaut est bien caractérisé et localisé. Ce type du ressaut est souvent adopté pour les bassins de dissipation d'énergie pour son bon rendement (45% et 70%) : c'est le ressaut stable (fig.1.2 d)
4. Pour des valeurs de $F1 > 9$, 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 (fig.1.3 e).

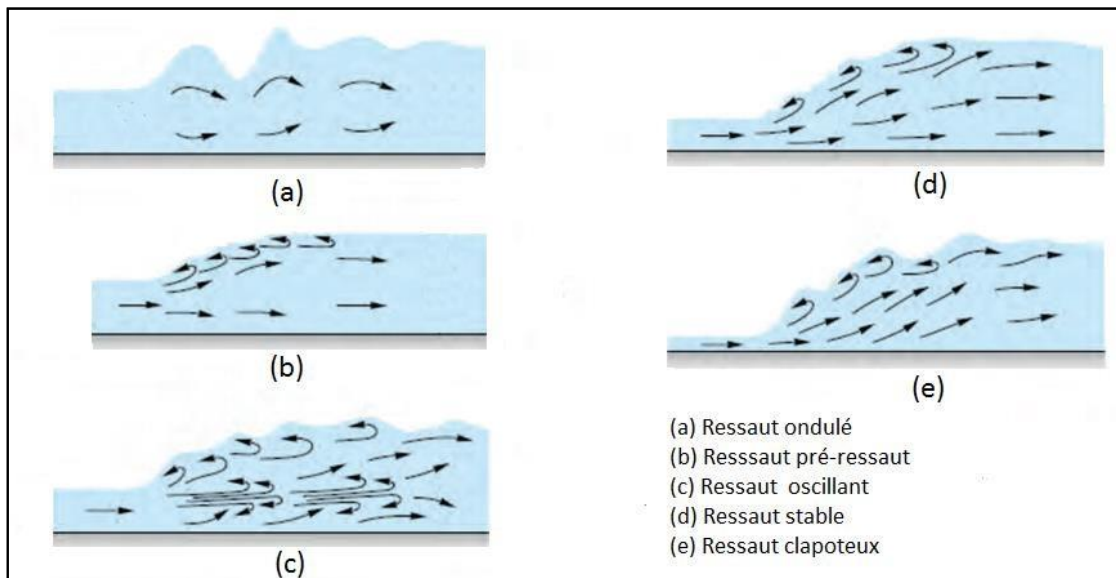


Fig.1.3 Classification des ressauts

1.5. Profondeurs conjuguées

On appelle profondeurs conjuguées les profondeurs y_1 , et y_2 observées respectivement en amont et en aval du ressaut hydraulique (fig.1.1).

Pour trouver la relation entre les deux profondeurs conjuguées y_1 , et y_2 pour un canal rectangulaire, l'application de l'équation de la quantité de mouvement pour un volume de contrôle compris entre les sections 1 et 2 (fig.1.1) :

On obtient la relation (1.1a) permettant de calculer une des profondeurs conjuguées (y_1 , ou y_2) quand on connaît l'autre.

$$y_1 y_2 \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right) = \frac{q^2}{g} \quad (1.1a)$$

Où q est le débit unitaire exprimée en $m^3/s/m$.

L'expression (1.1b) s'écrit encore

$$y_1 y_2 \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right) = y_c^3 \quad (1.1b)$$

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{g b^2 y_1^3} \quad (1.2)$$

Et sachant que $V_1 = \frac{Q}{A_1}$

L'équation e de Bélanger (1928) liant le rapport Y de sauteurs conjugués du ressaut au nombre de Froude F_1

$$Y = \frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (1.3)$$

1.6. Longueurs caractéristiques du ressaut

Le ressaut est caractérisé par la longueur L_r de son rouleau ainsi que par la longueur L_j sur laquelle il s'étend. Ces caractéristiques n'ont pas pu être évaluées que par la voie expérimentale.

1.6.1. Longueur du rouleau

Le rouleau est une zone de recirculation du fluide ; l'eau remonte vers l'amont, au moins au voisinage de la surface. On peut donc définir la fin du rouleau comme le point, à la surface du fluide, de vitesse horizontale nulle (Hager et al., 1990).

Les mesures ont permis d'aboutir à la loi expérimentale suivante qui donne la longueur L_r , (Hager et al. 1990).

$$\frac{L_r}{h_1} = -12 + 160 \tanh \frac{F\tau_1}{20} \text{ pour } \frac{h_1}{b} < 0.1 \quad (1.5)$$

$$\frac{L_r}{h_1} = -12 + 160 \tanh \frac{F\tau_1}{12.5} \text{ pour } 0.1 < \frac{h_1}{b} < 0.7 \quad (1.6)$$

Les auteurs ont proposé une relation plus simple pour le nombre de Froude compris entre 2,5 et 8 :

$$\frac{L_r}{h_1} = 8F_r - 12 \text{ pour } 2.5 < F\tau_1 < 8.0 \quad (1.7)$$

1.6.2. Longueur du ressaut

La seconde longueur caractéristique est la longueur du ressaut L_j , plusieurs formules ont été présentées afin de localiser la section finale du ressaut.

Hager et al. (1990) ont proposé une relation permettant d'évaluer la longueur L_j du ressaut.

$$\frac{L_j}{h_1} = 220 \tanh \frac{(F\tau_1 - 1)}{22} \quad (1.8)$$

Selon Carlier (1980), on a la formule de Smetana (1933)

$$L_j = 6(y_2 - y_1) \quad (1.9)$$

1.7. Perte d'énergie dans le ressaut hydraulique

La perte d'énergie dans le ressaut hydraulique se calcule en appliquant l'équation de Bernoulli entre les sections 1 et 2 (fig.1.1).

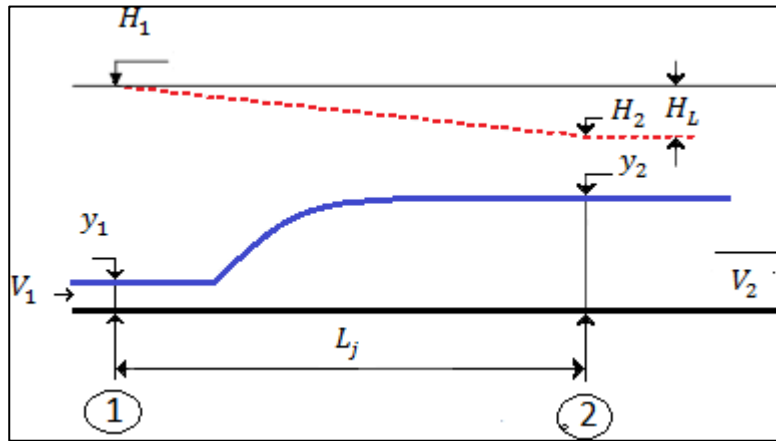


Fig.1.4 Dissipation d'énergie

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

$$h_l = H_1 - H_2 = y_1 + a_1 \frac{V_1^2}{2g} - \left(y_2 + a_2 \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (1.10)$$

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.

En raison du caractère permanent de l'écoulement, l'équation de la continuité, nous donne

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (1.11)$$

Où

$$A_1 = b y_1 \quad \text{et} \quad A_2 = b y_2 \quad (1.12)$$

En tenant compte des relations (1.11), (1.12), la relation (1.10) s'écrit :

$$h_L = y_1 - y_2 + \left(\frac{Q^2}{2g b y_1} - \frac{Q^2}{2g b y_2} \right) \quad (1.13)$$

Comme le débit unitaire, $q = \frac{Q}{b}$ l'équation (1.13) devient :

$$h_L = y_1 - y_2 + \frac{q^2}{2g} \left(\frac{1}{y_1^2} - \frac{1}{y_2^2} \right) \quad (1.14)$$

L'expression suivante (1.14) du débit unitaire peut être déduite de l'expression de la quantité de mouvement définie par la relation (1.1).

$$\frac{q^2}{2g} = \frac{y_1 y_2^2 + y_2 y_1^2}{4} \quad (1.15)$$

Ainsi, l'équation (1.15) s'écrit sous sa forme définitive :

$$h_L = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad (1.16)$$

1.8. 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 :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} \quad (1.17)$$

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

H_1 et H_2 désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut (fig.1.4).

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (1.18)$$

Le rapport $\frac{H_2}{H_1}$ est appelé efficacité du ressaut

$$\text{Nous avons } H_1 = y_1 \left[1 + \frac{F_1^2}{2} \right] \quad H_2 = y_1 \left[y + \frac{F_1^2}{2y^2} \right] \quad (1.19)$$

Où Y est le rapport de hauteurs conjuguées du ressaut classique

En remplaçant H_1 et H_2 par leurs valeurs dans l'expression du rendement du ressaut, on obtient :

$$\eta = 1 - \left[\frac{\left(y + \frac{F_1^2}{2y^2} \right)}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \right] \quad (1.20)$$

1.9. Bassin d'amortissement

Les vitesses à l'aval du ressaut (régime fluvial) sont inférieures aux vitesses à l'amont du ressaut (régime torrentiel). Cette propriété fait utiliser le ressaut comme dissipateur d'énergie pour réduire la vitesse de la lame d'eau (fig.1.5)

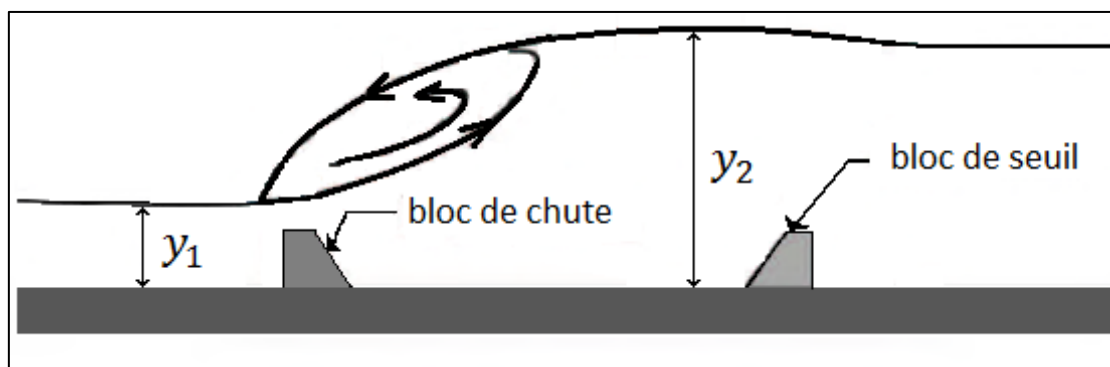


Fig.1.5 Schéma de principe d'un bassin d'amortissement

Afin de confiner le ressaut hydraulique dans un espace déterminé et éviter l'affouillement de l'ouvrage et l'érosion des berges on construit un bassin d'amortissement dont les caractéristiques sont spécifiées. L'aménagement du bassin d'amortissement se fera selon la valeur du nombre de Froude.

1.10. Application du ressaut hydraulique

- Dans les écoulements à surface libre, le ressaut hydraulique est utilisé pour : Dissiper de l'énergie dans les écoulements sous les barrages, les déversoirs et autres structures hydrauliques
- Maintenir un haut niveau d'eau dans les canaux de.
- Mixer des produits chimiques utilisés pour la purification ou traitement d'eau usée
- Utiliser dans les applications industrielles et les processus de fabrication.

1.11. CONCLUSION

En conclusion, les écoulements brusquement variés sont des phénomènes complexes qui se produisent lorsqu'il y a un changement soudain dans les conditions d'écoulement d'un fluide dans un canal ou une conduite. Ces changements peuvent entraîner des variations importantes de la vitesse, de la pression et de la profondeur du fluide, ainsi que la formation d'ondes de choc et de turbulences.

La compréhension des écoulements brusquement variés est cruciale dans de nombreux domaines de l'ingénierie, notamment l'hydraulique .

Chapitre II

Ressaut hydraulique forcé dans un canal rectangulaire

2.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous examinerons les avancées les plus récentes dans la recherche sur le ressaut hydraulique forcé dans un canal de section droite rectangulaire. Le ressaut hydraulique est un phénomène complexe et dynamique qui a attiré l'attention des chercheurs depuis des décennies. Nous nous concentrerons sur les études les plus récentes, mettant en lumière les découvertes clés, les modèles théoriques et les applications pratiques liées à ce sujet.

2.2. APPROCHE DE RAND (1957)

En 1957, *Rand* a établi une classification du ressaut forcé par seuil continu à son extrémité en 10 cas typiques, se rapportant aux effets de la hauteur du seuil et de sa position. Le ressaut classique sert de cas de référence.

Ces cas peuvent être groupés en trois classes se distinguant par la position du seuil par rapport au pied du ressaut (figure 2.1) :

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

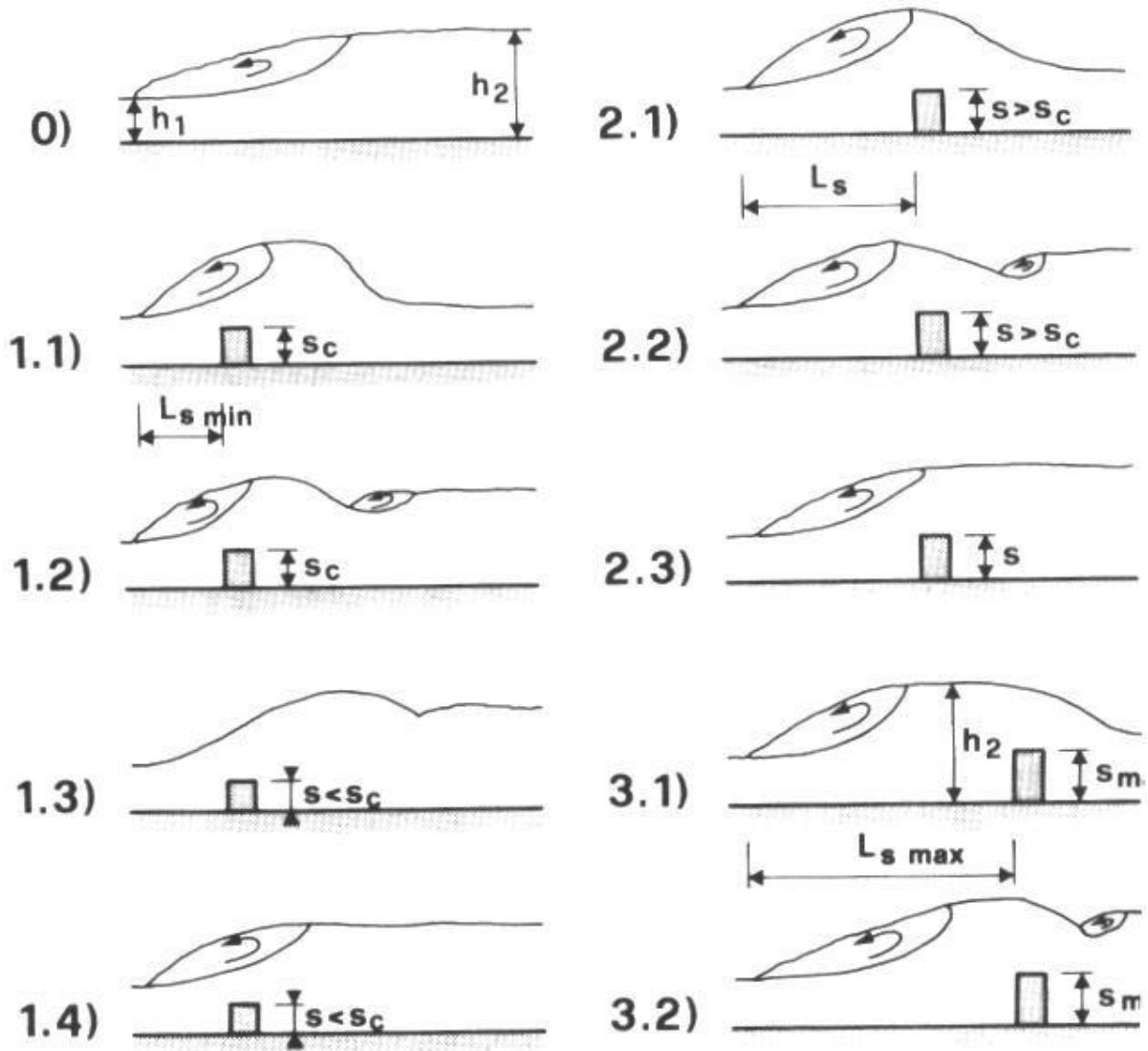


Fig.2.1 : Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes :
 0) ressaut classique ; 1) classe 1, longueur $L_{S,min}$; 2) classe 2, longueur intermédiaire L_S ;
 3) classe 3, longueur $L_{S,max}$, et 4) ressaut classique avec hauteurs conjuguées h_1 et h_2 . s :
 hauteur du seuil, s_c : hauteur critique du seuil et s_{max} : hauteur maximale du seuil.

Afin de décrire tous les cas, Rand (1957) définit un facteur de position :

$$k = \frac{(L_S - h_1) - (L_S/h_1)_{min}}{(L_S/h_1)_{max} - (L_S/h_1)_{min}} \quad (2-1)$$

Variant entre $K = 0$ pour le ressaut dans la position minimale et $K = 1$ pour la position maximale. De plus, l'auteur en (1957) a réussi d'établir des diagrammes qui permettent d'exprimer le rapport des hauteurs conjuguées Y_F en fonction de IF_1 pour différentes hauteurs relatives de seuil $S = s/h_1$ et ceci pour 5 valeurs de K . La (fig.2.2) montre ce diagramme, qui montre que, l'augmentation de la hauteur relative du seuil, engendre la

diminution de la hauteurs conjuguées et qu'une augmentation de F conduit à la disparition du rôle du seuil, ce qui pourrait signifier que le seuil devient inutile, pour de très grands nombres de Froude IF_1 !. La hauteur du seuil nécessaire à la formation d'un ressaut peut être tirée de ces diagrammes.

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

En 1965, Rand a de nouveau représenté ces cartes sous une autre forme. Cette fois Il a utilisé un canal avec vanne plane : la détermination de h_1 est donc recommandée dans ce cas. Un diagramme pour une valeur de IF_1 est dressé $Y_F = h_2/h_1$ en fonction de $S = s/h_1$ pour diverses valeurs de K , arrangement plus pratique à utiliser pour le dimensionnement (figure 2.2), mais avec l'inconvénient qu'il faut tracer un diagramme pour chaque nombre de Froude.

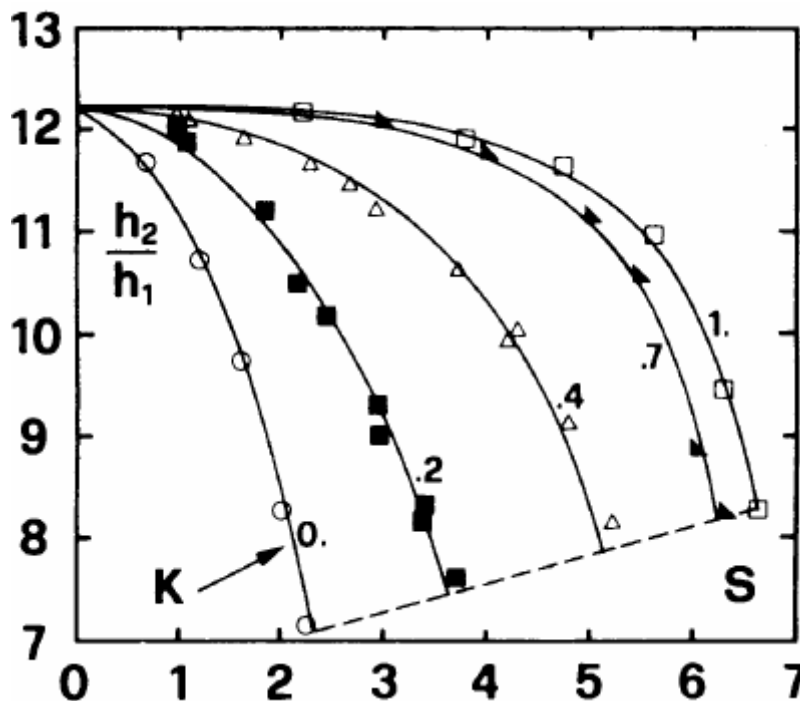


Fig.2.2 : Hauteurs conjuguées $h_2/h_1 = f(S, K)$ pour $F_1 = 9$. Valeurs et courbes expérimentales ; (---) limited'influence de l'aval sur l'amont.

2.3. APPROCHE DE BRETZ (1988)

2.3.1. Généralités

A l'instar de *Rand (1965)*, *Bretz en 1988* a conduit une étude expérimentale sur l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique. Ses résultats ont été confirmés par *Hager et Bretz (1988)*, *Hager et Sinniger (1989)*, et *Hager et Li (1991)*.

Une description détaillée et une classification des différents types d'écoulements du ressaut forcé par seuil sont présentées (figure 2.3).

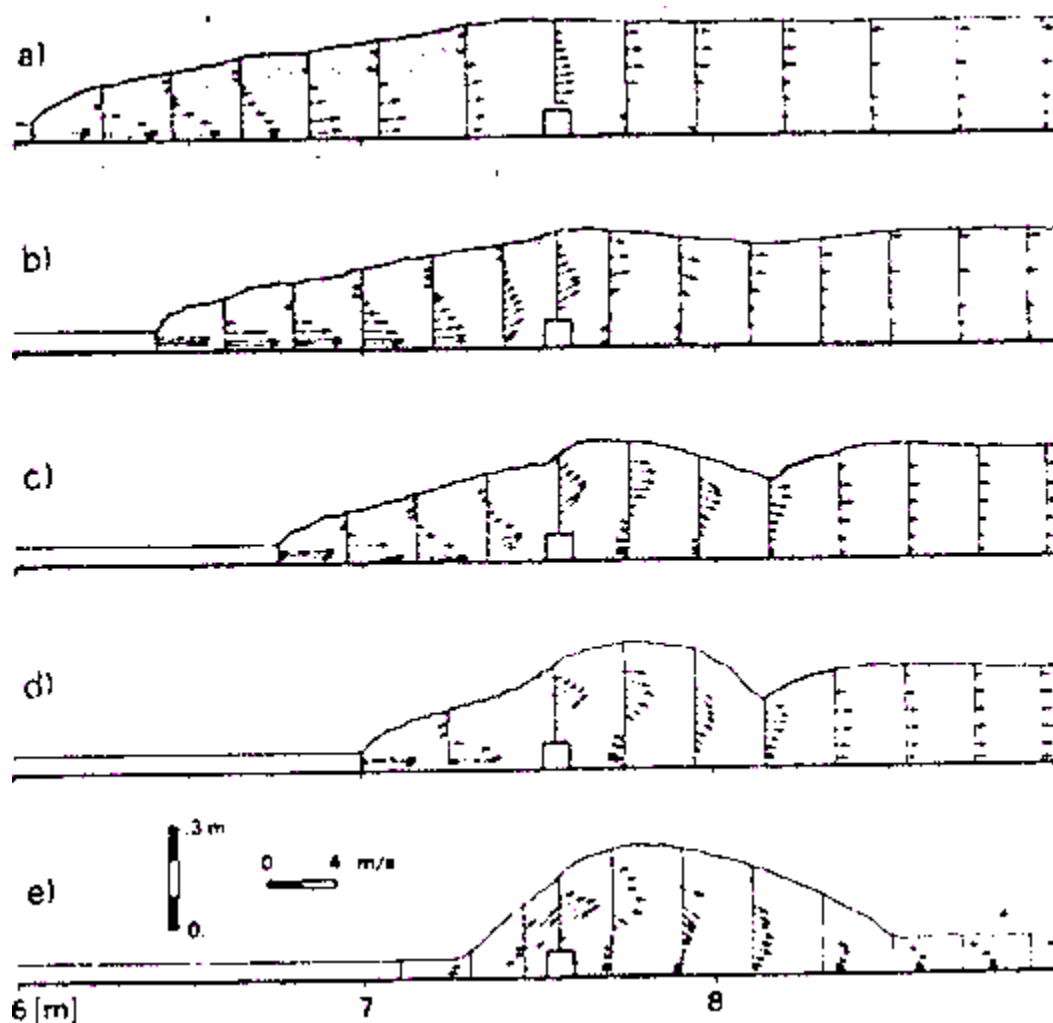


Fig.2.3 : Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $IF_1=5,23$ et $S=1,42$. a) ressaut type A) ressaut type B ; c) ressaut type B minimum ; d) ressaut type C et e) onde. (Bretz, 1987).

En effet, trois types de ressaut forcé par seuil sont retenus et analysés dans quatre sections longitudinales. Trois paramètres sont étudiés, d'abord indépendamment les uns des autres, puis en combinaison : le nombre de Froude IF_1 , le niveau aval h_2 et la hauteur relative S du seuil. L'attention est portée particulièrement sur les hauteurs conjuguées caractérisant le ressaut forcé par seuil et les profils de surface.

2.3.2. Procédure expérimentale

Dans le but d'augmenter le nombre de Froude F_1 et de pouvoir simultanément contrôler la hauteur d'eau amont h_1 , une vanne plane est installée dans la partie horizontale du canal.

La procédure des essais est la même que celle décrite pour le ressaut classique.

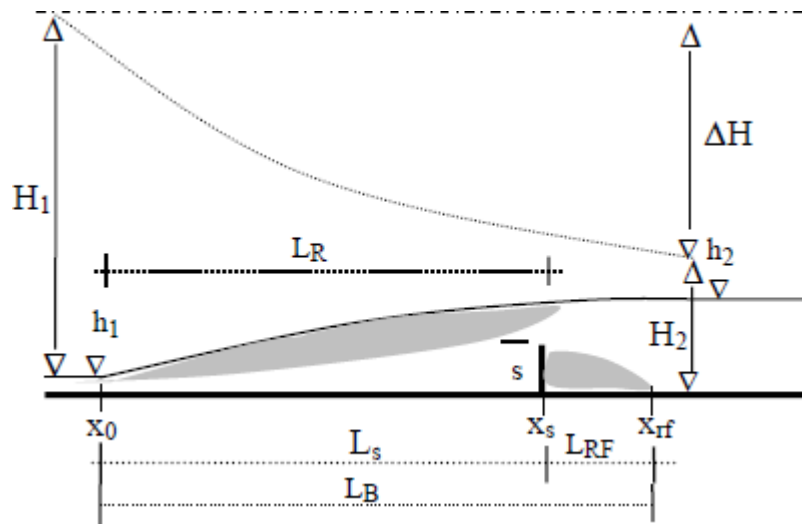


Fig.2.4: Ressaut forcé par seuil : définition des termes. H_1 charge amont, H_2 charge aval, ΔH perte de charge. h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x_0 position du pied du ressaut, x_s position du seuil, x_{rf} position de la fin du rouleau de fond à l'aval, L_R longueur du rouleau de surface, L_S position du seuil par rapport au pied du ressaut, L_{RF} longueur du rouleau de fond aval, L_B distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval.

Les grandeurs suivantes sont relevées : charge à l'amont de la vanne H_0 , hauteur d'eau aval h_2 , position du pied du ressaut x_0 et position de la fin du rouleau de fond x_{rf} . Les essais sont répétés pour les hauteurs relatives de seuil $S = 1, 2, 3$ et 4 mm, dont l'emplacement est fixe. Le pied du ressaut a été placé le plus près possible de la vanne, pour éviter l'effet du frottement dans cette frange de l'écoulement.

Un débit est amorcé pour provoquer un ressaut forcé (type A, B ou $B_{\min}$). 45 essais pour chaque type de ressaut ont alors été effectués.

2.3.3. Hauteurs conjuguées du ressaut

Pour le cas du ressaut forcé de type A, la figure 2.5 montre que plus la hauteur relative S du seuil est grande, plus la courbe correspondante s'éloigne de la courbe $S = 0$ correspondante au ressaut classique (sans seuil).

Pour les diverses hauteurs relatives S , les courbes ont été approchées à l'aide de l'équation suivante :

$$Y_A = 1.307 \cdot IF_1 - 0.4 \cdot S^{0.85} - 0.142 \quad (2-2)$$

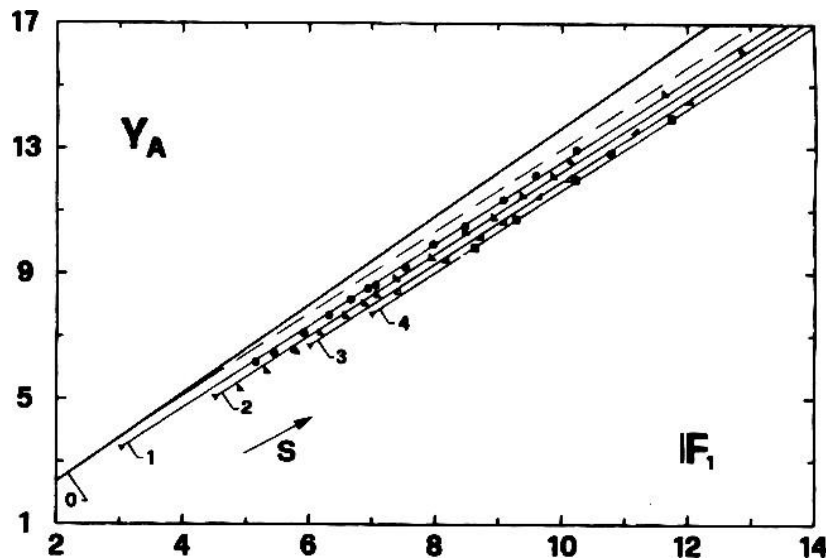


Fig.2.5 : Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_A = f(IF_1, S)$ avec $0,5 \leq S \leq 6$. $S = s/h_1$. (—) courbe selon l'équation de Bélanger. (---) courbe du ressaut classique selon l'équation (1.48).

Pour le ressaut forcé type B des courbes analogues sont représentées sur la (fig.2.6), avec un décalage plus important vers le bas. Elles sont exprimées par l'équation :

$$Y_B = 1.307 \cdot F_1 - 0.142 - 0.6 \cdot S^{0.75} \quad (2-3)$$

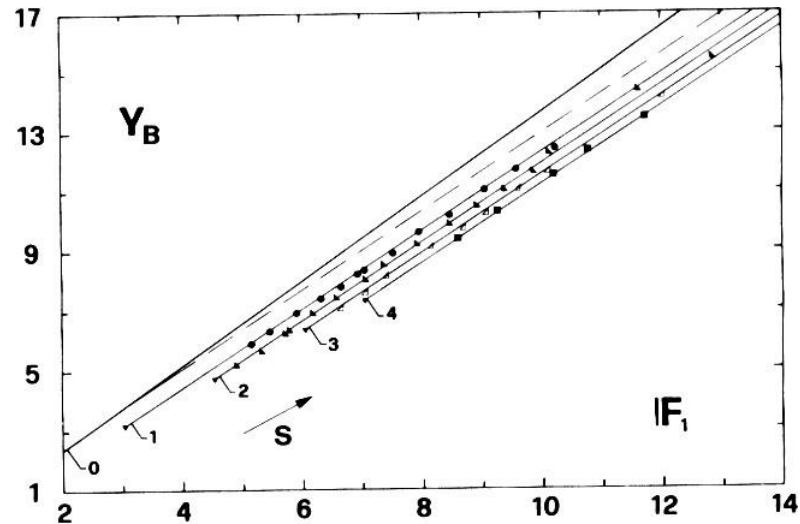


Fig.2.6 : Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_B = f(IF_1, S)$.
Même notation que la (fig.2.7).

Finalement pour le cas du ressaut forcé type B-minimum (fig.2.7), le décalage vers le bas devient encore plus grand. L'équation devient :

$$Y_{B-min} = 1.307 \cdot F_1 - 0.142 - 0.85 \cdot S^{0.65} \quad (2-4)$$

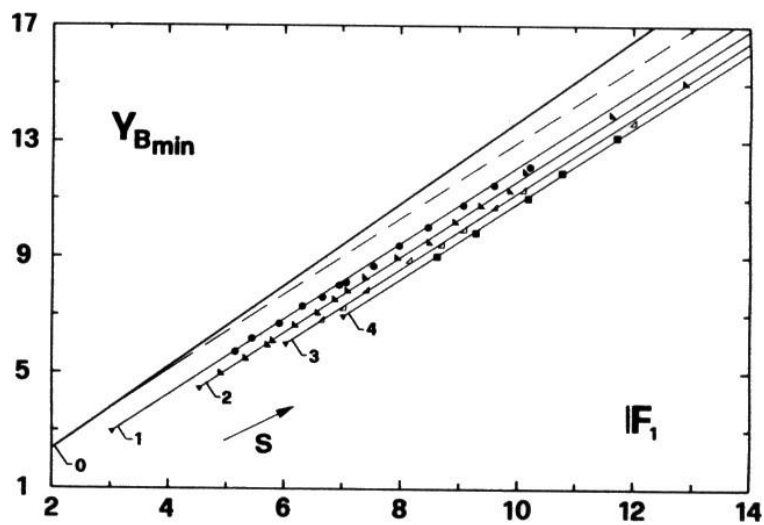


Fig.2.7 : Ressaut forcé type B-min. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_{B-min} = f(IF_1, S)$.
Même notation que la (fig.2.7).

Autrement dit le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut forcé par seuil est représenté en fonction du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique par l'équation :

$$Y_F = Y_{RC} - \Delta Y_S \quad (2-5)$$

Y_F est donnée par les équations (2-3), (2-4) et (2-5), Y_{RC} par les mêmes équations pour $S = 0$ et ΔY_S est l'effet du seuil défini par $\Delta Y_S = \alpha \cdot Y_S^\beta$. Les valeurs des coefficients α et β sont données ci-après :

	Type A	Type B	Type B-min
α	0,4	0,6	0,85
β	0,85	0,75	0,65

2.3.4. Longueur relative du bassin

La variation de la position relative du seuil $\lambda_S = L_S/h_1$ et de la longueur relative du bassin $\lambda_B = L_B/h_1$, en fonction du nombre de Froude IF_1 , sont représentées respectivement dans les (fig.2.10 et fig2.11).

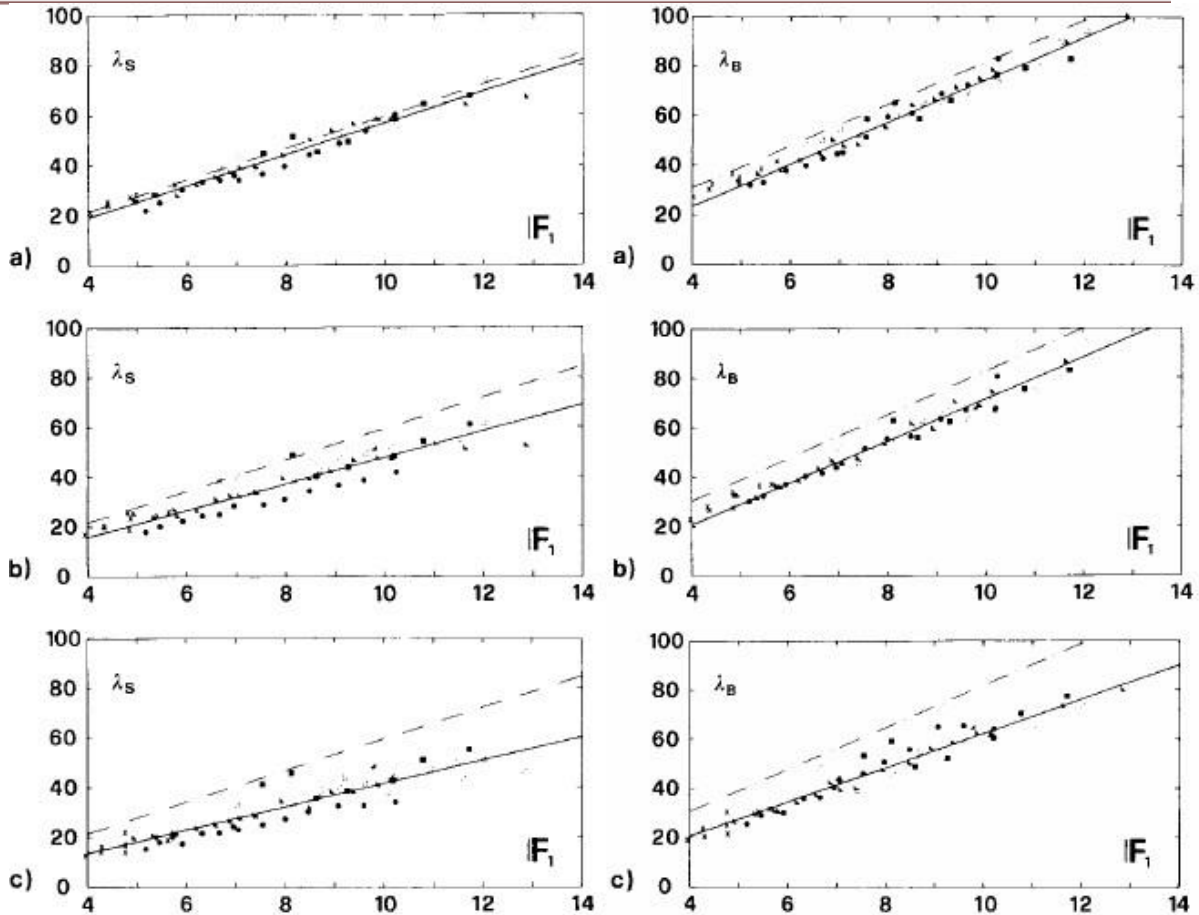


Fig.2.8 (a, b, c) : longueur relative $\lambda_s = f(F_1)$ pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B-min. (—) courbe selon l'équ : a) (II.6), b) (II.8) et c) (2.8) respectivement. (---) courbe limite.

Fig.2.9 (a, b, c): longueur relative $\lambda_B = f(F_1)$ pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B-min. (—) courbe selon l'équ : a) (II.7), b) (II.9) et c) (2.9) respectivement. (---) courbe limite.

Pour les trois types de ressauts forcés, λ_s augmente presque linéairement avec le nombre de Froude IF_1 . Ainsi, la pente de la courbe est plus forte pour le type A et la moins pour le type B-min. Quant à λ_B , les courbes présentent une pente plus forte que celle pour λ_s . Les courbes pour les divers types de ressaut forcé sont situées au-dessous de celles du ressaut classique. Ce fait indique la réduction nette de la longueur du ressaut forcé par rapport au ressaut classique. Pour les trois types de ressaut forcé, les courbes sont données par les équations suivantes, avec le domaine de validité $5 \leq IF_1 \leq 13$:

1. Ressaut forcé type A $\lambda_s = 6,27 \cdot IF_1 - 5,75$ (2-6), $\lambda_B = 8,68 \cdot IF_1 - 11,23$ (2-7)
2. Ressaut forcé type B $\lambda_s = 5,29 \cdot IF_1 - 5,37$ (2-8), $\lambda_B = 8,44 \cdot IF_1 - 12,96$ (2-9)
3. Ressaut forcé type B-min $\lambda_s = 4,64 \cdot IF_1 - 4,84$ (2-10), $\lambda_B = 6,93 \cdot IF_1 - 6,83$ (2-11)

2.3.5. APPROCHE DE HAGER ET LI (1992)

2.3.5.1. Rapport des hauteurs conjuguées

En 1992 *Hager et Li* analysent à nouveau les points de mesures de *Bretz (1988)* et montre que la réduction $\Delta Y_S = Y^* - Y$ du niveau aval due à la présence du seuil peut s'exprimer en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ et de la position relative $\Lambda = L_S / L_r^*$ du seuil. La figure 2.12 montre bien que la variation de la hauteur relative S et de la position relative du seuil, permet le passage d'un type de ressaut forcé à un autre.

Les auteurs établissent alors la relation suivante :

$$\Delta Y_S = 0.7 \cdot S^{0.7} + 3S(1 - \Lambda)^2 \quad \text{Pour } \Lambda > 0,5 \quad (2-12)$$

Le rapport Y^* des hauteurs conjuguées est donné par l'équation (1.3).

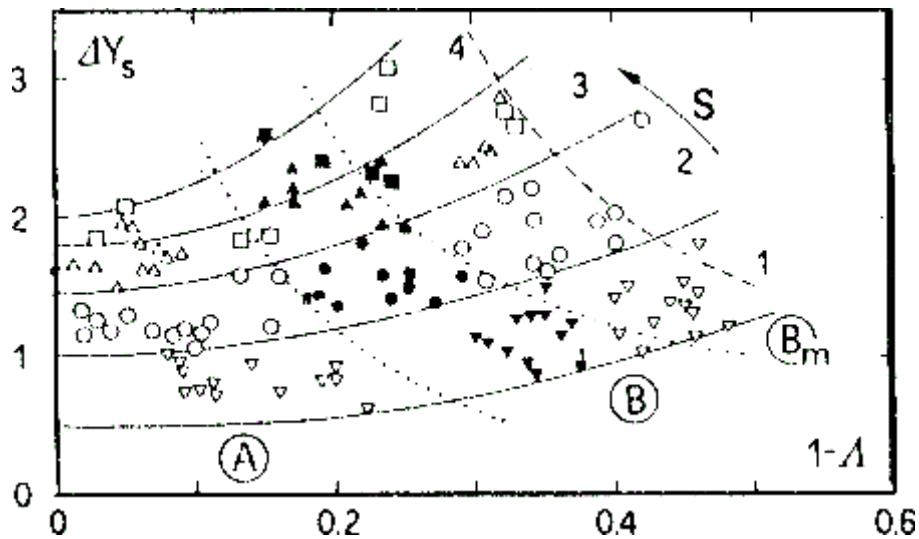


Fig.2.10 : Réduction de hauteur aval ΔY_S suite à la présence du seuil, fonction de la position relative $(1-\Lambda)^2$ et de la hauteur relative S du seuil. $S = (\nabla)$ 1, (o) 2, (Δ) 3 et $(\square)$ 4. (...) équation (2.13). (---) équation (2.14).

Selon *Hager et Li (1992)*, les hauteurs relatives limites S_L de seuils peuvent être approchées à :

$$S_L = [C_L - (1 - \Lambda)]^{-2} \quad (2-13)$$

où $C_L = 4$ pour transiter du ressaut type A au ressaut type B

et $C_L = 2,5$ entre B et B-min

La limite supérieure S_+ de l'apparition du ressaut type B-min est :

$$S_+ = 1/[9(1 - \Lambda)^3] \quad (2-14)$$

La figure 2.13 représente la variation de $\delta = (\Delta Y_s - 0.7^{0.7}) / (3.S)$ en fonction de $1-\Lambda$.

D'après les mesures de *Basco (1971)* relatives au ressaut contrôlé par chicanes, *Hager et Li (1992)* proposent une équation permettant la détermination de la hauteur optimale du seuil en fonction du nombre de Froude IF_1 :

$$S_{opt} = 1 + (IF_1^{2.5} / 200) \text{ ou } 3 \leq IF_1 \leq 10 \quad (2-15)$$

Cette équation est valable pour le cas d'un seuil continu car la hauteur optimale du seuil est quelque peu inférieure à la hauteur optimale des chicanes.

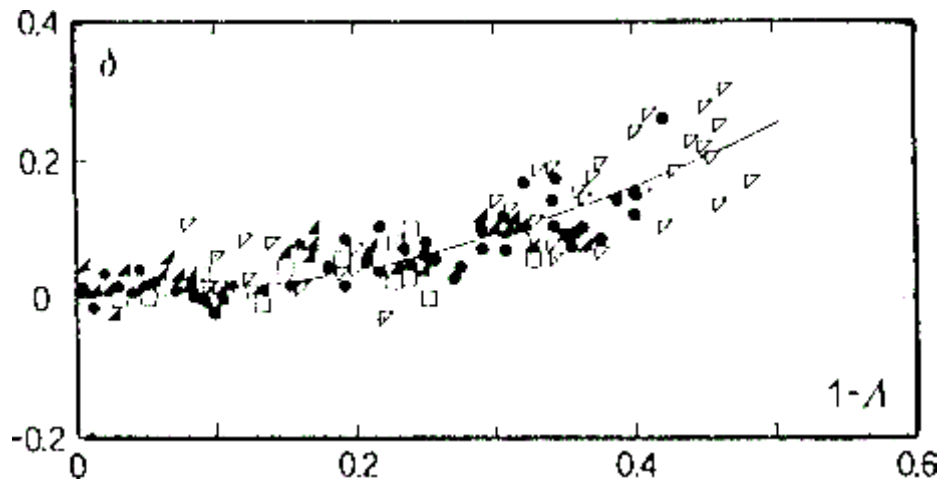


Fig.2.11 : Variation de δ en fonction de la position relative $(1-\Lambda)$ pour $S = (\nabla)$ 1, $(\cdot)$ 2, (Δ) 3 et (O) 4

$$\text{où } \Lambda = L_B / L_j^* \text{ et } \Lambda = L_S / L_r^* \quad (2-16)$$

Nous avons enfin présenté les travaux de *Hager et Li (1992)* qui analysent les points de mesures de *Bretz (1988)* et montrent que la réduction $\Delta Y_S = Y^* - Y$ du niveau aval due à la présence du seuil peut s'exprimer en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ et de la position relative $\Lambda = L_S / L_r^*$ du seuil. Ils définissent la longueur du bassin comme égale au moins à la distance qui sépare le début du ressaut de la fin du rouleau de fond. La longueur relative $\Lambda_B = L_B / L_r^*$ peut également s'exprimer en fonction de S et de Λ .

Les auteurs présentent le ressaut forcé par seuil, comparé au ressaut classique, comme plus avantageux par une hauteur aval moindre, un bassin plus court et une efficacité plus grande.

Par la suite *Hager et Bretz (1988)* montrent que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude F_1 . La dissipation relative d'énergie $\eta = \Delta H / H_1$ est définie par la perte de charge ΔH à travers le ressaut hydraulique comparée à l'énergie amont, soit $H_1 = h_1 + q^2 / (2gh_1^2)$. L'étude montre que l'efficacité

relative minimale est donnée par le ressaut hydraulique type A et celle la plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique type B-min sur marche négative.

L'étude expérimentale, a permis aux auteurs de conclure enfin que la marche positive offre un bassin de dissipation plus courte.

2.4.Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons examiné les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique forcé dans un canal rectangulaire, où nous avons présenté en premier lieu Une classification de ceux-ci en se basant sur celle de *Rand (1957)*. ensuite Bretz 1988 a conduit une étude expérimentale sur l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique, ou une classification des différents types d'écoulements du ressaut forcé par seuil sont présentées.

En dernier lieu HAGER et LI (1992) on constaté que la variation de la hauteur relative du S et de la position relative du seuil, permet le passage d'un type de ressaut forcé à un autre type.

Chapitre III

**Ressaut hydraulique dans un
canal Rectangulaire de forme
composé**

3.1. INTRODUCTION

L'étude des écoulements uniformes, ou plus encore les écoulements non uniformes en lit composé sont très compliqués à cause du transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmaret al. 2005).

Deux approches seront traitées pour ce présent chapitre, la première approche théorique présentée par Chetaoui et Achour en 2012 concernant le ressaut hydraulique en lit composé,

La deuxième approche expérimentale, concernant les travaux de F. Riguet, M. Debabeche et A. Ghomri en 2020 reflétant l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée.

3.2. APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR (2000)

3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées

La (fig.3.1) montre les différentes caractéristiques géométriques et hydrauliques du ressaut hydraulique en lit composé droit.

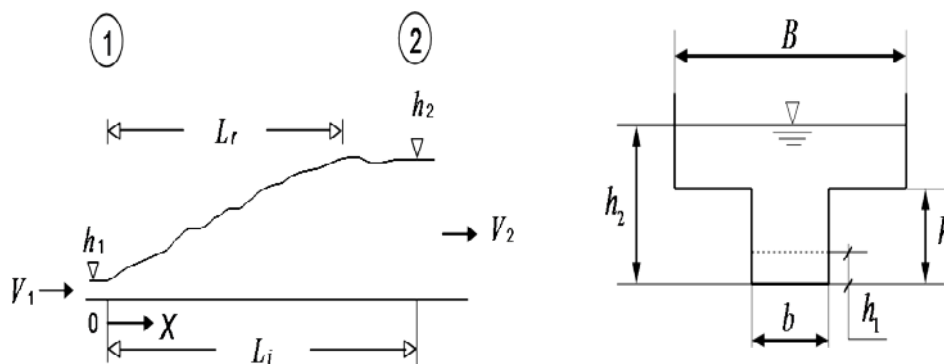


Fig.3.1: Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit

Tableau3.1 : symboles et notation

F_X : Force de résistance	b: Largeur du lit mineur
$Y=h_2/ h_1$: Rapport des hauteurs conjuguées	B: Largeur du lit majeur
$\tau=h_1/h$: Rapport des hauteurs	h_1 et h_2 : 1 ^{ère} et 2 ^{ème} hauteur conjuguée du ressaut
$\beta=b /B$: Rapport de l'élargissement	h : Hauteur de plein bord du lit mineur
F_1 : Nombre de Froude de l'écoulement incident	L_j : Longueur du ressaut
f_1 et f_2 : Forces hydrostatiques au pied et à la fin du ressaut	L_r : Longueur du rouleau
A_1 et A_2 : Aires De la section au pied et à la fin du ressaut	V_1 et V_2 : Vitesses moyennes au pied et à la fin du ressaut
H_1 et H_2 : Charges totales au pied et à la fin du ressaut	Q : Débit
ΔH : Pertes déchargeuse au ressaut	g: Accélération de la pesanteur
ϖ : Poids spécifique du liquide	k : Coefficient
η : Rendement du ressaut	

Le transfert de masse et de quantité de mouvement se produit à l'interface entre le lit mineur et le lit majeur (Bousard et al. 2004).

L'équation de la quantité de mouvement appliquée entre le pied et la fin du ressaut, défini par la figure (3.1), s'écrit comme suit :

$$\rho Q(\beta_2 \cdot V_2 - \beta_1 \cdot V_1) = f_1 - f_2 \quad (3-1)$$

s'inspirant de l'article de Achour (2000), par analogie à la relation de Borda-Carnot et au vue de la forme de la relation (3.1), Khattaoui et Achour (2012) ont conclu qu'il paraît admissible de rajouter une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement aurait comme expression:

$$f_x = -K\omega(h_2 - h)^x h_1^y (B - b)^z \quad (3-2)$$

C'est une source de perte de charge liée nécessairement au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur. Les exposants x, y et z sont

Liés par la relation $x + y + z = 3$. Le coefficient k est tel que $k = \varphi (L_{jou}, L_r, h_2, h_1, h)$.

En tenant compte de f_x , l'équation d'Euler devient :

$$\rho Q(1/A_2 - 1/A_1) = f_1 - f_2 + f_x \quad (3-3)$$

Analysons l'équation pour la fonction :

$$f_x = (1/2) \omega(h_2 - h)h_1(B - b) \quad (3-4)$$

L'hypothèse d'une distribution uniforme pour les vitesses dans les sections transversales correspondant au pied et à la fin du ressaut implique que $\beta_1 = \beta_2 = 1$. Les sections A_1 et A_2 sont données respectivement par : $A_1 = bh_1$ et $A_2 = B(h_2 - h) + bh$.

En supposant également que la distribution des pressions est hydrostatique dans les sections 1 et 2 du ressaut, ce qui donne

Les expressions des forces :

$$f_1 = \omega(h_1/2)bh_1 \text{ et } f_2 = \omega(h_2 - h/2)bh + \omega[(h_2 - h)/2]B(h_2 - h) \quad (3-5)$$

Entenant compte de toutes ces hypothèses et informations ainsi que de l'équation de continuité, $V_1A_1 = V_2A_2 = Q$, les auteurs ont pu écrire l'équation finale (III.3), après l'avoir réarrangée, comme suit :

$$2F_1^2 \left(\frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{((2Y-1/\tau))}{\tau} - \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (3-6)$$

$$\text{Ou: } F_1 = Q / \sqrt{b^2 h_1^3 g} \quad (3-7)$$

En négligeant la force de résistance f_x , l'équation résultante a été donnée sous la forme :

$$2F_1^2 \left(\frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{((2Y-1/\tau))}{\tau} - \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} \quad (3-8)$$

Les relations (3-3) et (3-6) sont des équations fonctionnelles de forme.

$\emptyset(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$ Notez que les équations (3-6) et (3-8) peuvent être écrites sous la forme $Y^3 + aY^2 + bY + c = 0$

En faisant le changement de variable $Y = x - a/3$, l'équation de troisième degré de vient sous la forme $Y^3 + pY + q = 0$ dont la résolution peut se faire aisément en utilisant la méthode trigonométrique.

La figure (3.2) illustre la variation de Y , calculé par l'équation 6, en fonction de F_1 . L'une des variables, β ou τ , est fixée, l'autre varie avec un pas de 0,2. Pour que le ressaut se produise effectivement dans le canal composé ($h_2 > h$), les valeurs de F_1 à considérer doivent être strictement supérieur à la valeur minimale

$$F_{1\min} = [1/(2\sqrt{2})] \cdot \sqrt{(2/\tau + 1)^2 - 1} \quad (3-9)$$

Correspondant à ($h_2 = h$).

Compte tenu de ces figures et pour un β et τ données, Y augmente continuellement avec l'accroissement de F_1 . L'augmentation du rapport Y en fonction de F_1 est plus rapide pour de grandes

valeurs de β . Pour un F_1 fixé, Y croît avec l'accroissement de β et diminue avec l'augmentation de τ .

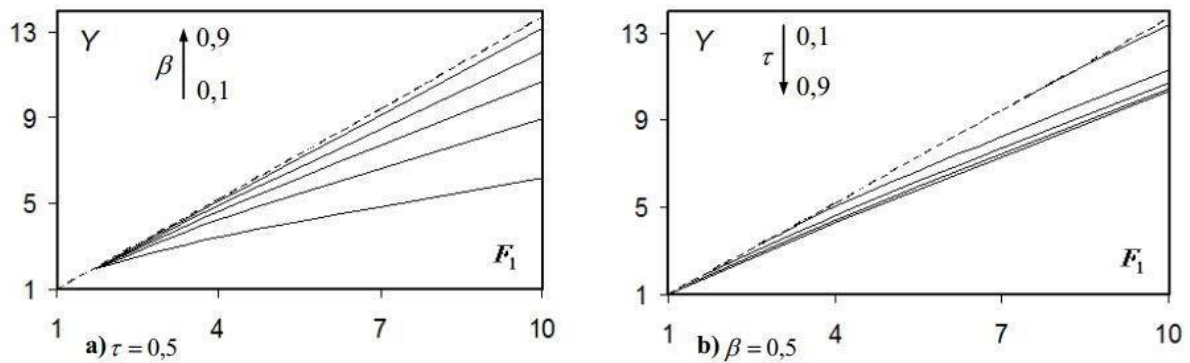


Fig.3.2: Variation de Y , calculé par (3-6), en fonction de F_1 .(--): $\beta = 1$

Sur la (fig.3.2) est représentée la variation de Y en fonction de F_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. Les valeurs de Y calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont inférieures à celles calculées en la négligeant. La différence est plus claire au fur et à

mesure que le nombre de Froude F_1 augmente. La force f_x traduit les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut

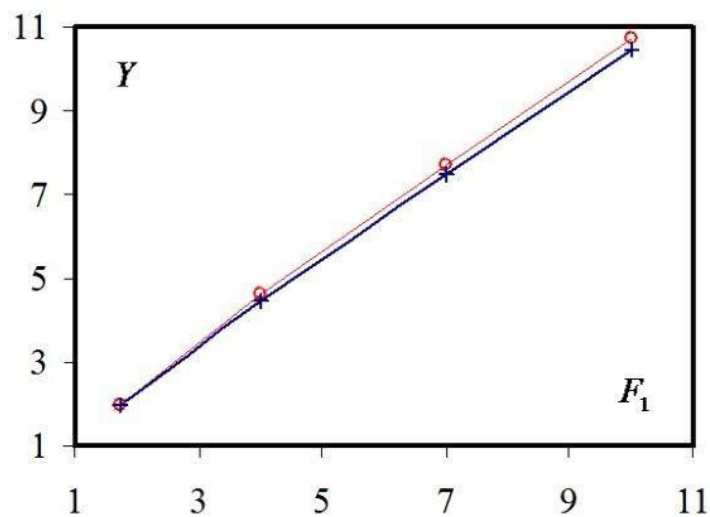


Fig.3.3: Variation Y en fonction de F_1 . (0): équation 2, (+): équation 1

3.2.2. Rendement du ressaut

En considérant les mêmes hypothèses précédentes, le rendement, $\eta = \Delta H/H_1$, peut être exprimé par :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (3-10)$$

L'équation (3-10) permet le calcul, d'une manière explicite, le rendement du ressaut se produisant en lit composé droit, connaissant F_1 , Y ainsi que β et τ . En considérant les valeurs de Y calculées avec la relation (3-8), nous avons représenté sur la (fig.3.4) la variation de η en fonction de F_1 . Pour un τ et un β fixés, il est clairement illustré sur la figure que le rendement η d'un ressaut hydraulique dans un lit composé, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de F_1 . Pour un τ connu, en fixant F_1 , η diminue avec l'augmentation de β . Pour un β et un F_1 fixé, on peut aisément voir que le η augmente avec l'accroissement de τ .

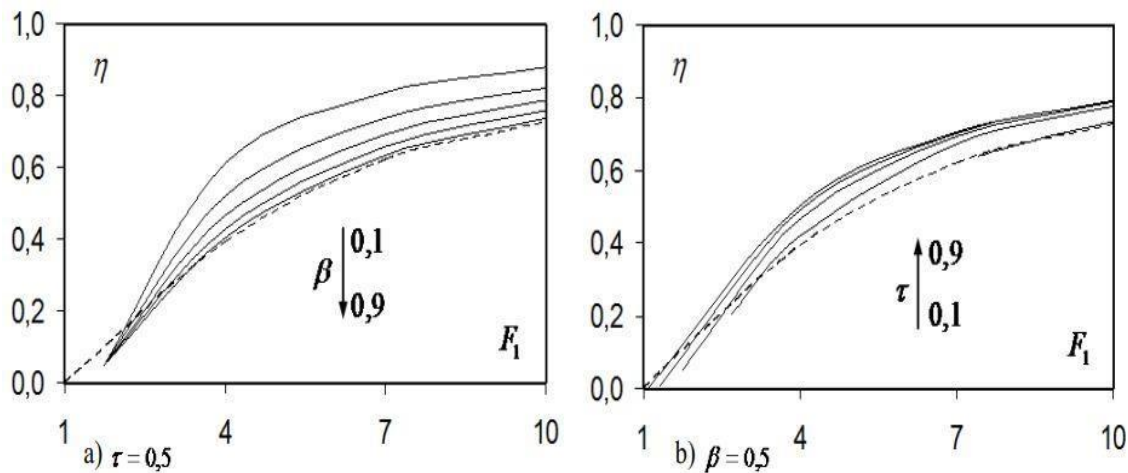


Fig.3.4 : Variation de η en fonction de F_1 . (---) : $\beta=1$. Y est calculé par l'équation (3).

Sur la (fig.3.5) : est représentée la variation de η en fonction de F_1 pour $\beta=\tau=0,5$. Il est bien illustré que les η calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont supérieures à celles calculées en la négligeant.

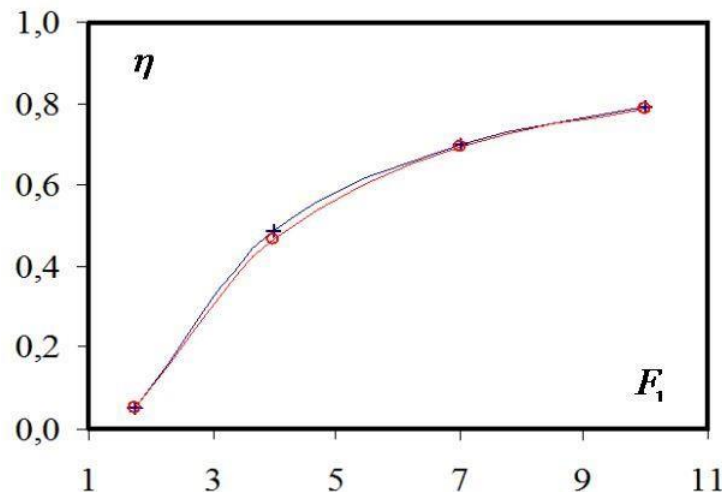


Fig.3.5 : Variation η en fonction de F_1 . (0) : équation 2, (+): équation 1

3.3. TRAVAUX DE RIGUET ET AL 2020

3.3.1 Position du problème

La modification des conditions à l'amont (débit, hauteurs, ...etc.) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur, ...etc.), peut conduire à différentes configurations de ressaut. Le ressaut est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente faible ou nulle, sans obstacle à l'aval. Il est dit contrôlé lorsque sa formation est conditionnée par la mise en place d'un obstacle à l'aval de l'écoulement. Il est dit force lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle. Le ressaut hydraulique peut évoluer dans des canaux prismatiques ou non prismatiques, à fond lisse ou rugueux.

Pour l'étude actuelle il s'agit d'un ressaut contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire de section composée pour différentes ouvertures h_1 .

En effet, pour une hauteur initiale h_1 fixe, l'accroissement du débit entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation de sa longueur de rouleau L_r . La distance Δx sur laquelle le ressaut s'étend augmente également et pour ramener celui-ci dans sa position initiale, c'est à dire à environ 5 cm de la sortie du convergent, le seuil de hauteur s doit être surélevé. Ainsi à chaque valeur du nombre de Froude IF_1 , correspond une longueur L_j du ressaut et L_r du rouleau, ainsi qu'une hauteur h_2 à l'aval du ressaut et une hauteur s du seuil (Fig.3.6).

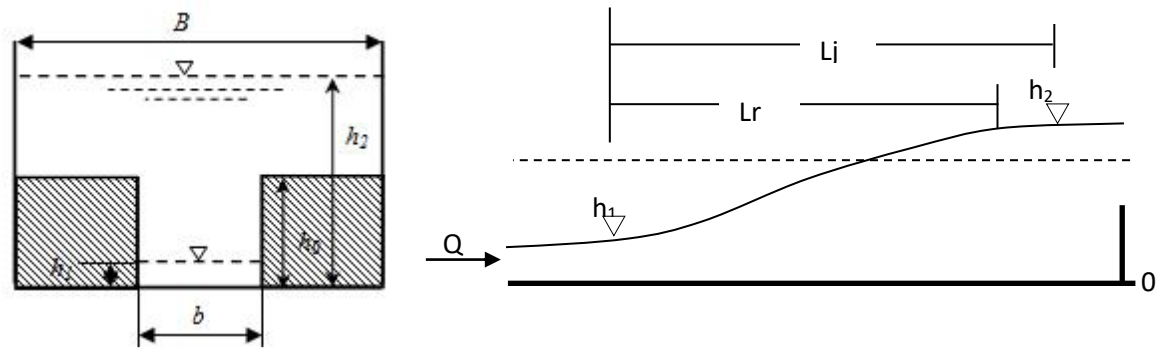


Fig.3.6. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire composé.

3.3.2 DESCRIPTION DES ESSAIS

Un échantillon constitué de plusieurs points de mesures expérimentales, pour chacun des paramètres intervenant au phénomène, a permis également pour ce type de ressaut, d'aboutir à des résultats significatifs. Ces paramètres sont : le débit Q , la hauteur initiale h_1 , la hauteur finale h_2 , la hauteur du seuil s . Ceux-ci permettent de composer les produits adimensionnels suivants : le nombre de Froude F_1 , le rapport $Y = h_2/h_1$ du ressaut hydraulique. Le nombre de Froude F_1 est tel que :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{b^2 h_1^3 g} \quad (3-11)$$

Ainsi lorsque nous obtenons une configuration du ressaut contrôlé, nous effectuons, pour une hauteur initiale h_1 et une position x de seuil fixées, les opérations suivantes :

1. Lecture de la hauteur déversant h_q du déversoir rectangulaire.
2. Calcul du débit volume correspondant, par application de la relation du débitmètre rectangulaire (Hachemi 2006):

$$Q = 0,3794 \cdot B \sqrt{2g} \beta (1 + 0,16496 \beta^{2,0716})^{3/2} H_{dev}^{3/2} \quad (3-12)$$

Avec :

Q : le débit en (m³/s).

$\beta = b/B$: Rapport de forme.

b : largeur de l'échancrure (m).

B : la largeur du canal (m).

g : l'accélération de la pesanteur (m/s²).

H_{dev} : La hauteur de la lame déversant (m).

3. Calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par application de la relation (1).

4. Mesure de la hauteur finale h_2 du ressaut.

3.3.3 RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées

Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y est le rapport de la hauteur d'eau h_2 sur la hauteur initiale h_1 ($Y = h_2/h_1$) du ressaut hydraulique. Les représentations graphiques des points expérimentaux ci-dessous 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 : 2 ; 2,5 ; 3 ; 3,5 et 4cm pour les deux lits du canal Composée.

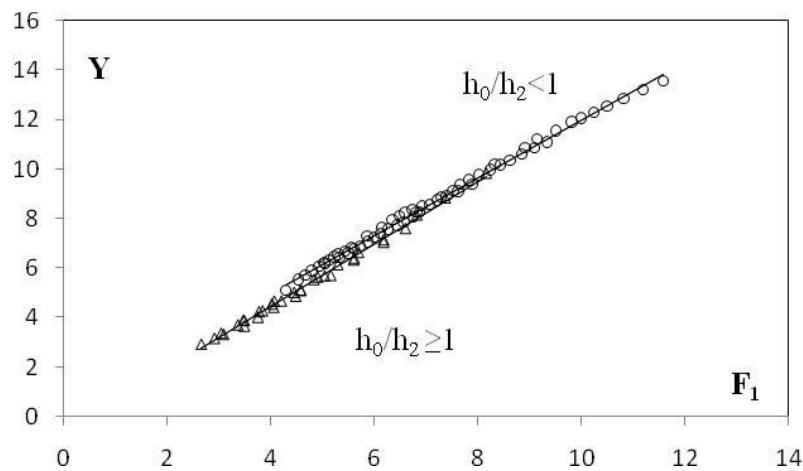


Fig.3.7 Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour les Deux lits du canal composée. (o) points de mesures expérimentales en lit majeur ; (Δ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustements.

Cette figure montre que le rapport Y des hauteurs conjuguées est moindre en lit mineur que celui dans le lit majeur.

L'analyse des points de mesures expérimentales, montre clairement que pour chaque valeur de h_0/h_2 , un ajustement linéaire est possible, de la forme $Y = a F_1 + b$. L'équation liant le rapport des hauteurs conjuguées au nombre de Froude incident s'écrit alors :

$$\text{Pour } h_0/h_2 \geq 1 : 2,64 < F_1 < 8,14 \quad Y = 1,258 F_1 - 0,573 \quad (3-13)$$

$$\text{Pour } h_0/h_2 < 1 : 4,27 < F_1 < 11,58 \quad Y = 1,165 F_1 + 0,328 \quad (3-14)$$

3.4. CONCLUSION

A travers ce premier chapitre, nous avons cité, en premier temps les travaux de Khattoui et Achour en 2012, concernant le ressaut hydraulique formé en canal rectangulaire de forme composée. Cette relation fonctionnelle est de forme $\phi(F_{r1}, Y, \beta, \tau) = 0$ sans tenir compte des forces de frottements. Une relation deuxième a été exposée y compris les forces de frottements. L'approche globale est déduite par le développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie.

En deuxième temps, nous avons étudié les travaux de riguet et all 2020, l'étude s'est intéressée a la variation de Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour cinq ouvertures différentes dans les deux lits du canal composé. En remarque en premier lieu que l'augmentation du nombre de Froude F_1 entraîne celle du rapport Y des hauteurs conjuguées pour les deux sections du canal.

On conclue que le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée a un effet réducteur aux caractéristiques de l'écoulement en lit mineur plus que le lit majeur.

Deuxième partie :

Etude expérimentale

INTRODUCTION DE LA PARTIE EXPERIMENTALE

La deuxième partie est consacré au traitement des données prises sur *Laboratoire d'Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS)*, Département de Génie Civil et l'Hydraulique, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Mohamed Khider, *(Biskra)*.

Notre étude, concernera notre propre contribution à la Contribution à l'étude de la variation des hauteurs conjuguées du Ressaut Hydraulique Forcé type A par seuil mince dans un Canal Rectangulaire Composé.

Cette étude semble se concentrer sur la variation de la hauteur du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire forcé avec un seuil mince. Cela peut impliquer l'analyse des différentes conditions de débit et de géométrie du canal pour comprendre comment la hauteur du ressaut change en fonction de ces paramètres.

Le quatrième chapitre de cette partie de notre étude sera consacré à l'étude expérimentale, nous allons exposer une description détaillée du modèle expérimental, et faire la description des essais des différents appareillages des mesures utilisées.

Le cinquième chapitre Dans un étude visant à comprendre la variation des hauteurs de ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire avec un seuil mince, plusieurs expériences peuvent être menées en laboratoire.

L'étude de la variation des hauteurs conjuguées du Ressaut Hydraulique Forcé type A par seuil mince dans un Canal Rectangulaire Composée. L'expérimentation a été menée sous cinq hauteurs initiale sh_1 : 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 et 4cm. Pour une gamme pratique de nombres de Froude incident a été ainsi obtenue: $3 < F_1 < 13$.

Chapitre IV

**Description du model
expérimental**

4.1. Introduction :

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

4.2. Description du canal :

Les expériences ont été conduites dans un canal à surface libre représenté sur la (fig.4.1) et la (photo.4.2), Il s'agit d'un canal de 12 m de longueur, ayant une hauteur de 0,6m, et des parois latérales en verre. Il est constitué d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure par une conduite circulaire en PVC d'un diamètre de 115 mm. L'ensemble fonctionne en circuit fermé. L'écoulement est assuré par une pompe (photo.4.3) qui alimente un convergent en charge (permettant de générer un écoulement à grande vitesse) (photo.4.4), débouchant dans le canal de mesure. On dispose ici d'un canal horizontal de section rectangulaire composée, de longueur 5 m et de hauteur $h_1 = 2$ cm à la largeur de lit mineur $b = 20$ cm de lit majeur $B = 60$ cm.

Il est relié à sa partie aval à un second canal de section droite rectangulaire dont le fond présente une pente nulle. Un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle est inséré avec contraction latérale dans le circuit d'écoulement (photo.4.5), permettant la mesure du débit.

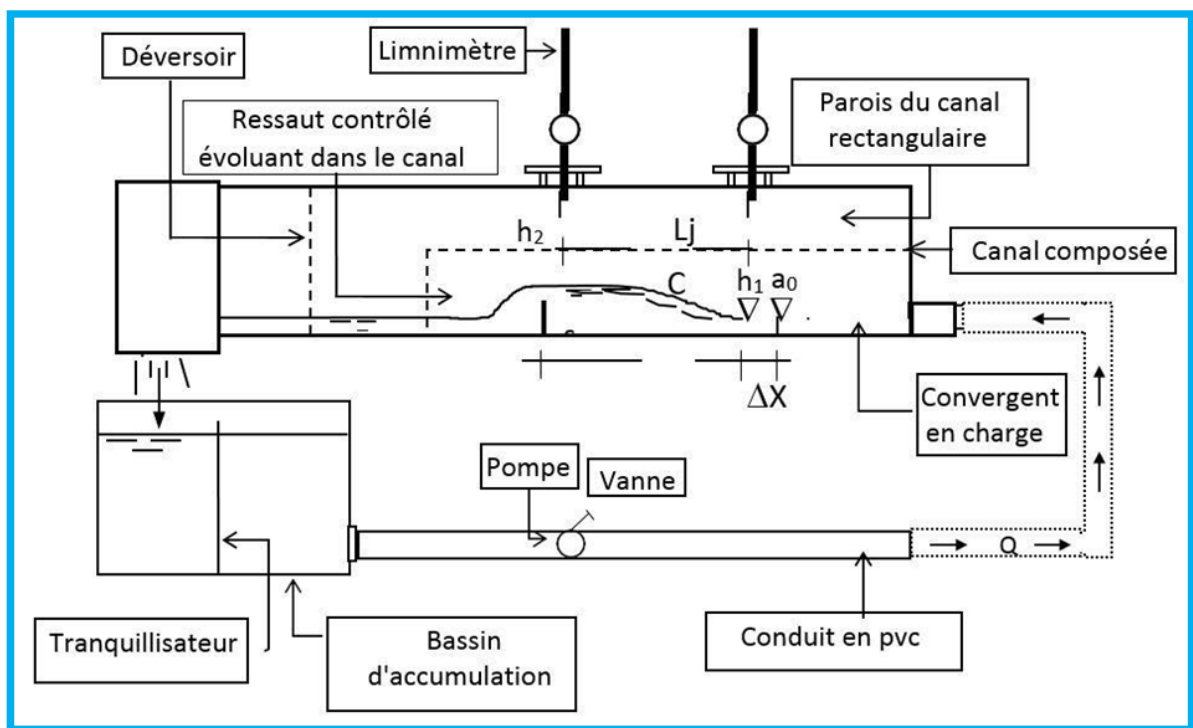


Fig.4.1 : Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composé



Photo.4.1 : Photographie du model expérimentale du canal



Photo.4.2 : Pompe centrifuge axial



Photo.4.3 Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit



Photo.4.4 : Photographie d'une boîte en charge

4.3. Les seuils à paroi mince :

Les seuils utilisés dans notre dispositif expérimental, sont façonnées de fer en forme rectangulaire. Dans le but d'obtenir un nombre important de points de mesures, nous avons préparé 18 seuils minces de différentes hauteurs (photo.4.5) :

$s = (2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20)\text{cm}$



Photo 4.5 : Photographie des seuils minces testés



Photo.4.6 : Photographie de support du seuil.



Photo.4.7 Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit

4.4. Procédure de mesure des débits :

En ce qui concerne les mesures des débits Q , nous avons utilisé le débit mètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de Hachemi Rachedi . (2006).

En effet, lors du passage du débit Q à travers les deux parois du débitmètre, la hauteur h de v de la lame d'eau qui traverse ce débitmètre est lue sur l'appareil limnométrique placé au-dessus du déversoir. par conséquent, le débit spécifique est obtenu en entrant la hauteur h dans l'équation (4.1) du déversoir.

$$Q = 0,3794B\sqrt{2g\beta} \left(1 + 0,16496.\beta^{2,0716}\right)^{3/2} h_{dev}^{3/2} \quad (4.1)$$

ou :

Q : Le débit spécifique en (m³/s).

$\beta = b/B$: paramètre géométrique. $\beta = b/B=0.4$

b : Largeur de l'échancrure (m) . $b=0,24$ cm.

B : la largeur du canal (m). $B=0,6$ m.

H de v : hauteur de la lame déversant en (m).

La condition d'application est justifiée : $\beta < 0.45$

4.5. Limnimètre:

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à l'ouverture due à la section de sortie du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été évaluées par un limnimètre. L'instrument est formé d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnimétrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau (fig.4.2).

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

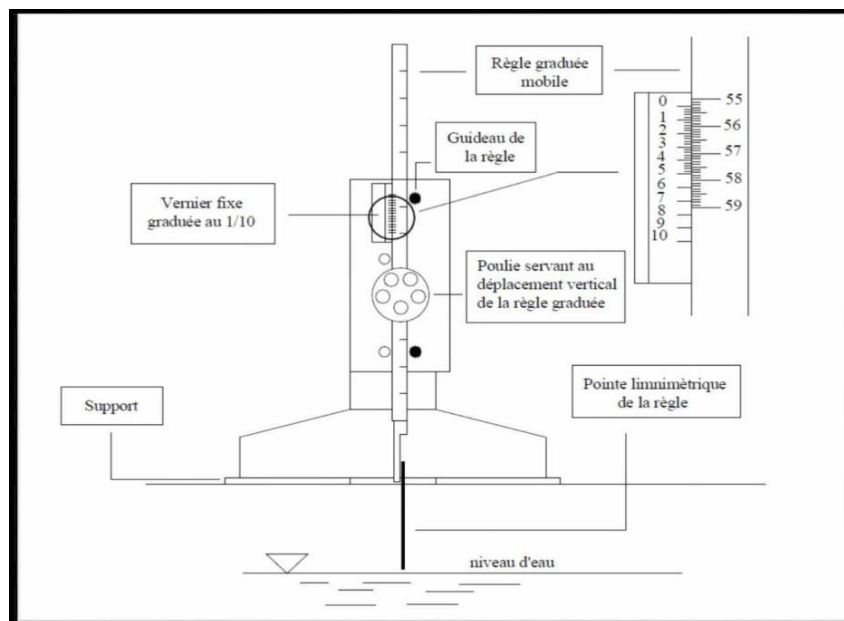


Fig.4.2 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.

4.6. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons montré les différents instruments qui nous a permis de réaliser l'expérimentation et présenté la procédure d'utilisation de chaque appareil de mesure. La mesure de débit a été effectuée à l'aide d'un déversoir rectangulaire sans hauteur de lame avec contraction latérale Hachemi Rachdi. (2006).

Chapitre V

Etude Expérimentale

5.1. INTRODUCTION

L'étude de la variation des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique forcé type A par seuil mince dans un canal rectangulaire composée. L'expérimentation a été menée sous cinq hauteurs initiales h_1 : 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 et 4 cm. Pour une gamme pratique de nombres de Froude incident a été ainsi obtenue : $3 < F_1 < 13$

5.2 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

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 initiale du ressaut hydraulique h_1 ($Y = h_2 / h_1$)

Les représentations graphiques des points expérimentaux ci-dessous (figure 5.1 à 5.2) 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 : 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 et 4 cm.

Pour le lit mineur

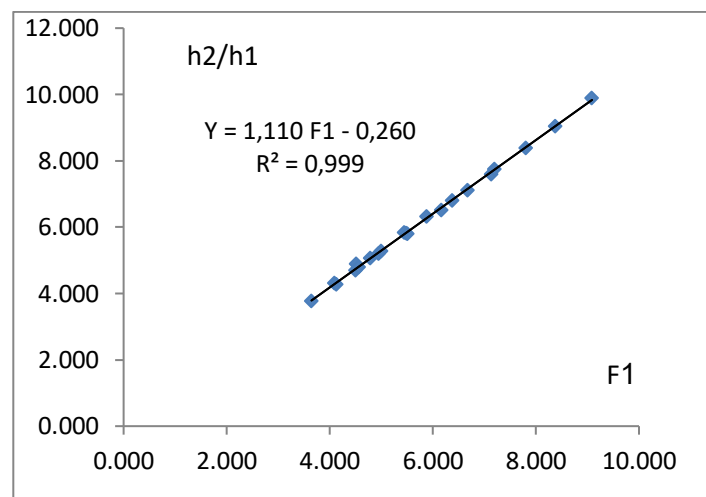


Fig.5.1: Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour le lit mineur.

(□) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement

Cette figure montre que le rapport Y des hauteurs conjuguées augmente progressivement avec l'augmentation du nombre de Froude F_1 .

L'ajustement des valeurs expérimentales, a montré que la loi de variation de Y en fonction de F_1 est de type linéaire, telle que : $Y = f(F)$.

$$Y = 1,110F_1 - 0,260 \quad R^2 = 0,999 \quad (5.1)$$

$$3.64 < F_1 < 9.85$$

Pour le lit majeur

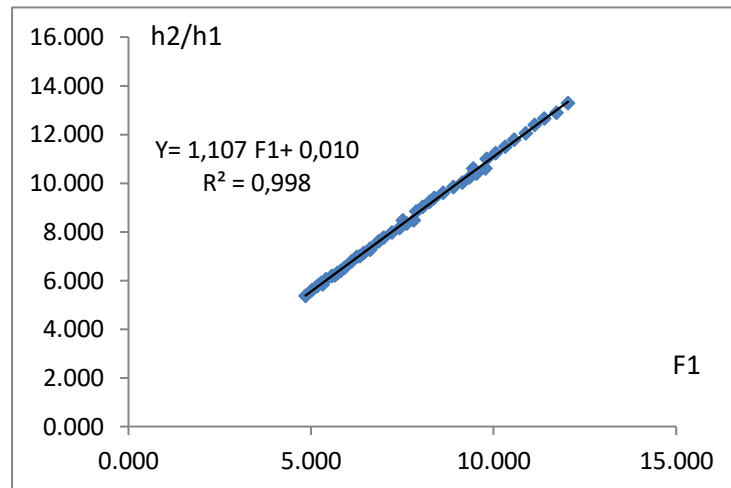


Fig.5.2 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour le lit majeur. ($\square$) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement

Cette figure montre que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident, engendre celle de la hauteur conjuguée pour le lit majeur. Par ailleurs, l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir également à une relation linéaire d'équation :

$$Y = 1,107 F_1 + 0,010 ; \quad R^2 = 0,998 \quad (5.2)$$

$$4,85 < F_1 < 12,04$$

Comparaison

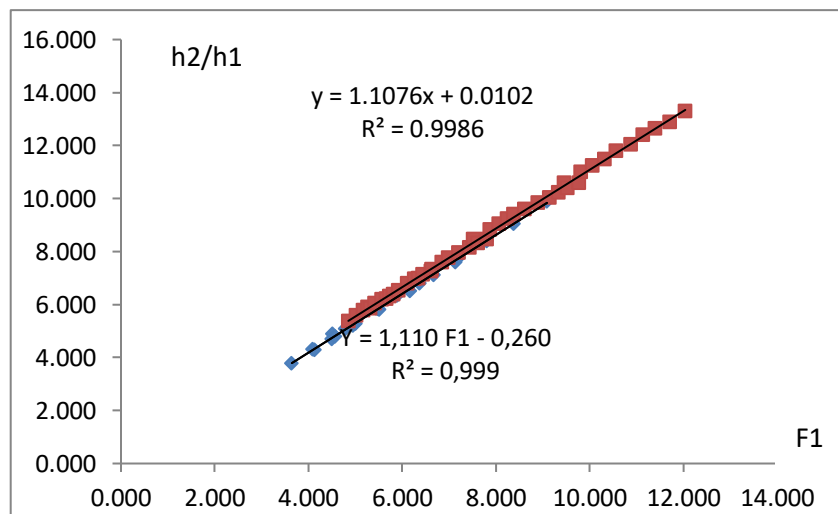


Fig.5.3 : montre clairement un décalage entre les valeurs de Y du ressaut forcé par seuil mince, pour les mêmes nombres de Froude F_1 .

L'étude comparative entre le lit mineur et majeur représenté par la figure (5.3) montre clairement un décalage entre les valeurs de Y du ressaut forcé par seuil mince, pour les mêmes nombres de Froude F_1 , pour les deux lits du canal.

En effet, le rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut forcé par seuil dans le lit mineur est nettement inférieur à celui du ressaut forcé par seuil dans le lit majeur du canal.

Les valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F_1)$ pour les deux cas, sont regroupées dans le tableau (Tableau.5.1) :

Tableau.5.1. Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
Y_A	F_1	Y_A	F_1	Y_A	F_1
3.775	3.645	5.375	4.850	8.467	7.806
4.325	4.095	5.600	5.021	8.840	7.874
4.286	4.134	5.775	5.169	9.040	8.057
4.900	4.515	5.900	5.268	9.240	8.242
4.700	4.499	5.857	5.314	9.400	8.381
4.800	4.562	6.050	5.418	9.600	8.615
5.080	4.792	6.200	5.570	9.840	8.898
5.200	4.947	6.229	5.661	10.040	9.137
5.286	5.003	6.325	5.723	10.240	9.329
5.833	5.477	6.400	5.808	10.600	9.450
5.850	5.444	6.543	5.926	10.400	9.523
5.800	5.504	6.800	6.104	10.600	9.767
6.333	5.886	6.971	6.255	11.000	9.816
6.520	6.164	7.000	6.340	11.250	10.062
6.800	6.376	7.143	6.436	11.500	10.311
7.120	6.675	7.257	6.620	11.800	10.561
7.600	7.134	7.333	6.625	12.050	10.877
7.760	7.200	7.600	6.842	12.400	11.132
8.400	7.806	7.767	6.987	12.650	11.389
9.050	8.381	7.967	7.207	12.900	11.713
9.900	9.089	8.167	7.430	13.300	12.040
		8.480	7.512		
		8.333	7.617		

5.3. Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

Pour le lit mineur

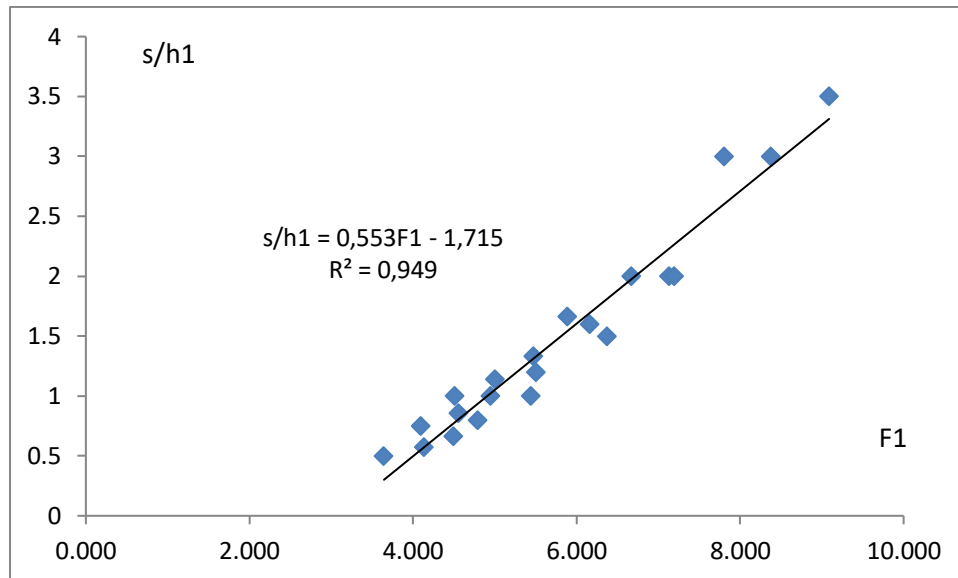


Fig.5.4 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour les deux lits du canal composé. (+) points de mesures expérimentales en lit mineur ; Pour $h_0/h_2 > 1$.

La figure ci-dessus montre que l'ajustement des points de mesure expérimentale dans le lit mineur donne une courbe unique de type linéaire.

$$s/h_1 = 0,553F_1 - 1,715 \quad R^2 = 0,949 \quad (5.3)$$

Pour le lit majeur

La représentation graphique des points expérimentaux dans la figure 5.5, montre la variation du rapport du seuil relatif $S=s/h_1$ du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les cinq ouvertures dans le lit mineur et majeur.

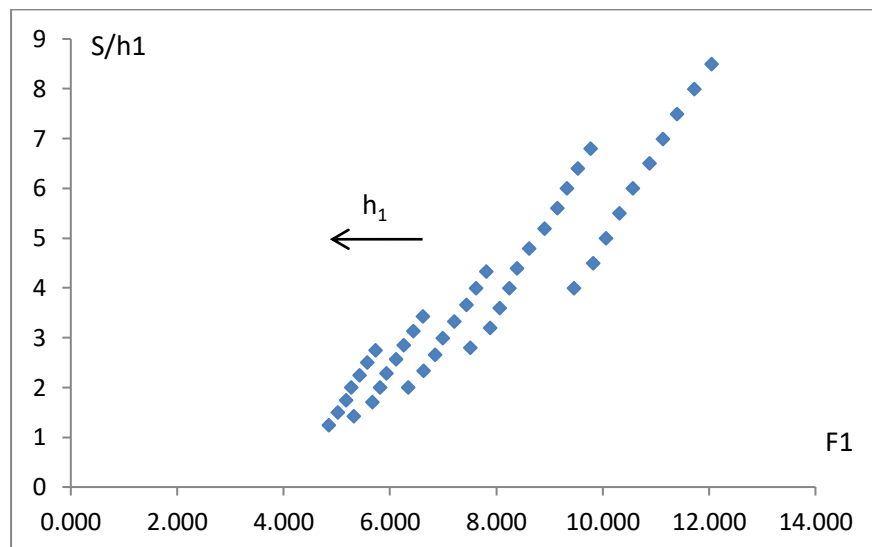


Fig.5.5. Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour le lit majeur du canal composé. (□) points de mesures expérimentales en lit majeur.

En constate de cette figure que l'augmentation du seuil relatif S entraîne celle du nombre de Froude F_1 et que l'influence de la hauteur amont h_1 est perceptible dans la section composée.

Les fig.5.5 (a, b, c, d, e) montrent la variation de la hauteur relative du seuil

$S = s/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 pour les cinq ouvertures, tels que :

$h_1/B = 0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066$.

Les figures ci-dessous montrent les ajustements des points de mesure expérimentale pour les différentes ouvertures h_1 en lit majeur.

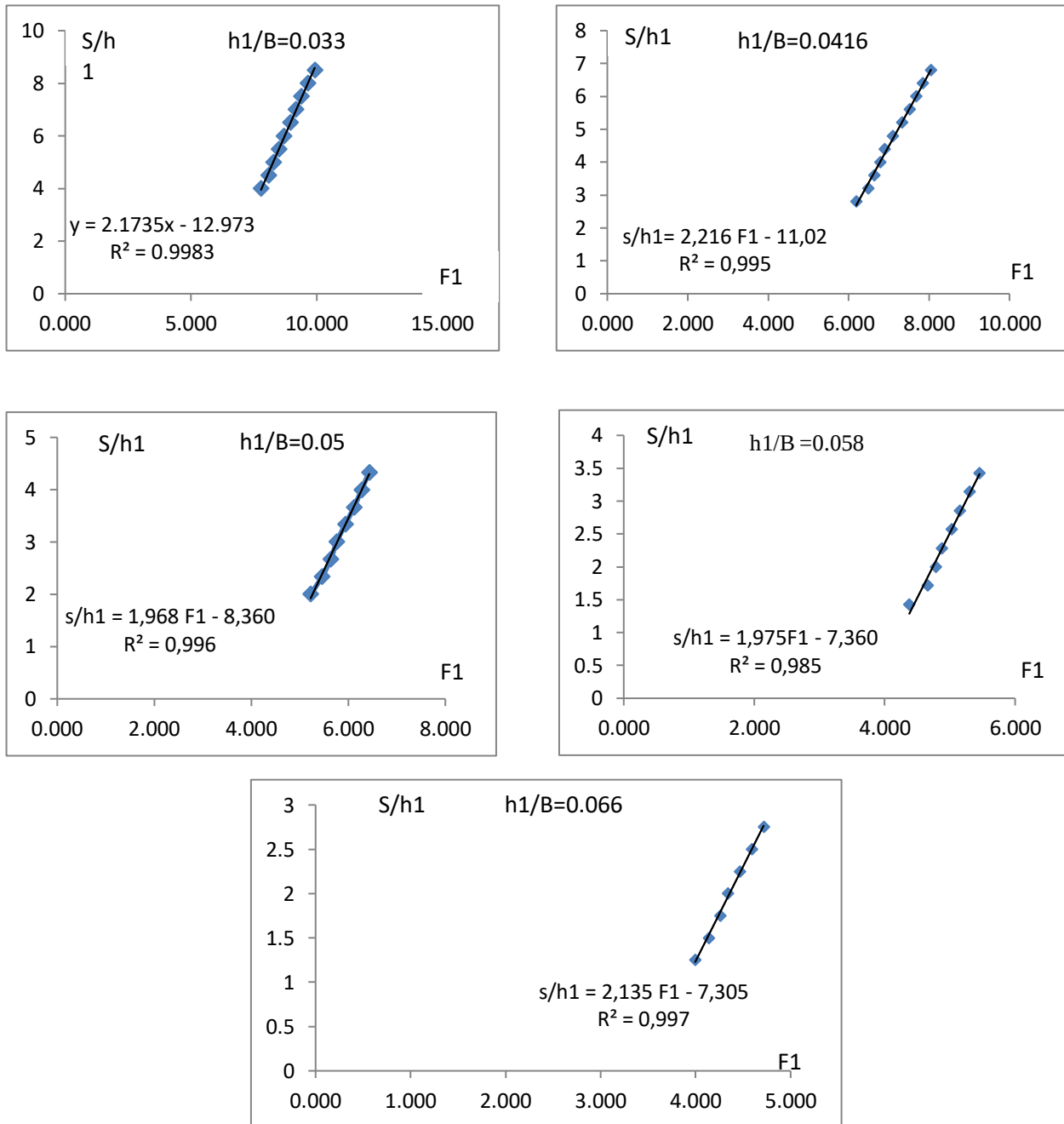


Fig.5.6. (a, b, c, d, e). Variation du rapport $S = s/h_1$ de la hauteur relative du seuil du ressaut forcé en fonction de nombre de Froude respectivement pour $h_1/B = (0.06 ; 0.058 ; 0.05 ; 0.0416 ; 0.033)$. (o) points expérimentaux. (—) courbe d'ajustement.

Les Fig.5.6 (a, b, c, d, e), montrent que l'ajustement des mesures expérimentales de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1 suit une loi de type linéaire de la forme $s/h_1 = a (F_1) + b$.

Les données ayant servi au traçage des (fig.5.5) et (fig.5.6) (a, b, c, d, e) sont groupées au tableau 5.2.

Tableau.5.2. Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $s/h_1 = f(F_1)$
pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1
3.645	0.5	4.850	1.25	7.617	4
4.095	0.75	5.021	1.5	7.806	4.333333
4.134	0.571429	5.169	1.75	7.874	3.2
4.515	1	5.268	2	8.057	3.6
4.499	0.666667	5.314	1.428571	8.242	4
4.562	0.857143	5.418	2.25	8.381	4.4
4.792	0.8	5.570	2.5	8.615	4.8
4.947	1	5.661	1.714286	8.898	5.2
5.003	1.142857	5.723	2.75	9.137	5.6
5.477	1.333333	5.808	2	9.329	6
5.444	1	5.926	2.285714	9.450	4
5.504	1.2	6.104	2.571429	9.523	6.4
5.886	1.666667	6.255	2.857143	9.767	6.8
6.164	1.6	6.340	2	9.816	4.5
6.376	1.5	6.436	3.142857	10.062	5
6.675	2	6.620	3.428571	10.311	5.5
7.134	2	6.625	2.333333	10.561	6
7.200	2	6.842	2.666667	10.877	6.5
7.806	3	6.987	3	11.132	7
8.381	3	7.207	3.333333	11.389	7.5
9.089	3.5	7.430	3.666667	11.713	8
		7.512	2.8	12.040	8.5

Le (Tableau.5.2) regroupe les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport $S = s/h_1$ des hauteurs relatives du seuil au nombre de Froude F_1 , pour différentes hauteurs h_1 des ouvertures.

Tableau.5.3. Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant s/h_1 au nombre de Froude F_1 pour différentes hauteurs h_1 des ouvertures

h_1/B	a	b	Équations des droites	Coefficients de corrélation R^2
0,033	2.17 3	- 12,97	$S = 2.173 F_1 - 12,97$	0,998
0,041	2.21 6	- 11,02	$S = 2.216 F_1 - 11,02$	0,995
0,050	1.96 8	-8,36	$S = 1.968 F_1 - 8,36$	0,996
0,058	1,97 5	- 7,360	$S = 1.975 F_1 - 7.360$	0,985
0,066	2.13 5	- 7,305	$S = 2.135 F_1 - 7,305$	0,997

Le (Tableau.5.3) montre que les valeurs des paramètres 'a' sont presque égales, et leur moyenne arithmétique est $a = 2.093$, tandis que l'ajustement statistique des couples de valeurs (b , h_1/B) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type logarithmique d'équation :

$$b = 8.842 \ln(h_1/B) + 17.41 \quad R^2 = 0,950$$

Comme la montre la figure ci-dessous

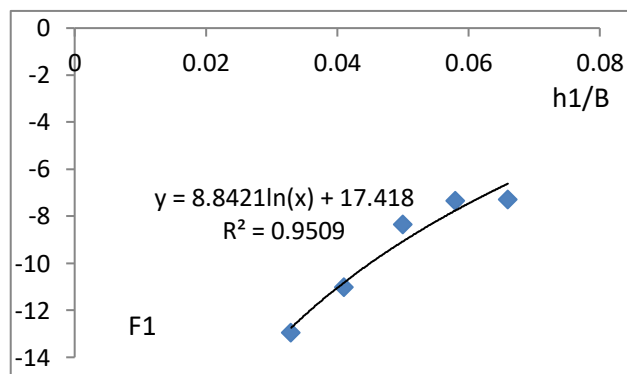


Fig.5.7 : Variation du paramètre 'b' en fonction de h_1/B .

n effet, en remplaçant les coefficients a et b par leurs expressions dans la relation $s/h_1 = aF_1 + b$, l'équation liant le rapport des hauteurs relatif du seuil s/h_1 au nombre de Froude F_1 et à la hauteur relative amont y_1 devient :

$$S/h = 2.093 F_1 + (8.842 h_1/B + 17.41) \quad (5.4)$$

$$0,033 < y_1 < 0,066$$

La figure (5.8) indique que la relation $S = f(F_1, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces derniers tournent en majorités autour de la première bissectrice, ce qui fiabilise la relation globale obtenue.

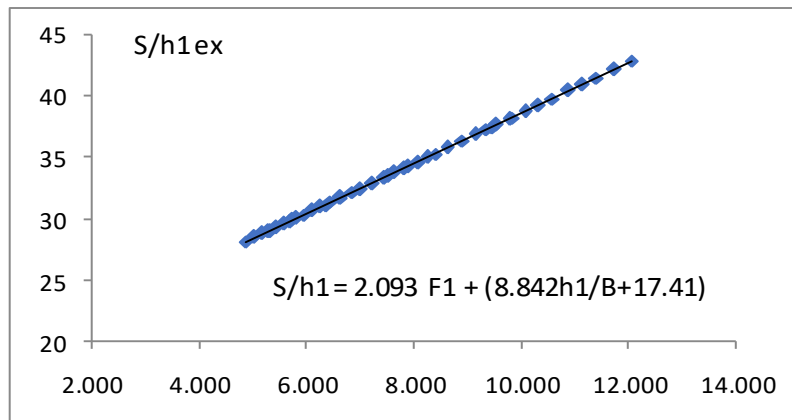


Fig.5.8: Variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction de la relation $f(F_1, h_1/B)$. (o) Points expérimentaux. (□) Première bissectrice d'équation : $s/h_1 = f(F_1, h_1/B)$.

Parallèlement à ce que nous avons fait dans le ressaut contrôlé par seuil, on peut déduire une relation empirique liant la hauteur relative du seuil S et le rapport des hauteurs conjuguées Y_A du ressaut forcé par seuil dans chaque section du canal composé.

La figure ci-dessous résume la variation de Y_A en fonction de S dans les deux sections du canal rectangulaire de forme composé.

5.4 Conclusion

La deuxième partie de notre étude a concerné l'étude expérimentale du ressaut hydraulique Forcé type A par seuil mince dans un Canal Rectangulaire Composée

à pente nulle (canal prismatique). L'analyse des résultats expérimentaux nous a permis de trouver des approches expérimentales globales très acceptables.

Commençons par l'analyse statistique de la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident qui a montré que l'ajustement suit une loi de type linéaire, et que la hauteur relative est moindre dans le lit mineur, et ceci pour les trois ressauts étudiés. La comparaison montre que le rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut forcé est nettement inférieur à celui du ressaut contrôlé. Ainsi l'influence de la marche positive est perceptible pour les deux lits du canal composé, et ceci pour toute la gamme des nombres de Froude étudiés.

CONCLUSION GENERALE

Notre mémoire de mastère a été la présente étude s'est concentrée sur l'analyse de la variation des hauteurs conjuguées du Ressaut Hydraulique Forcé type A par seuil mince dans un Canal Rectangulaire Composé. À travers une série d'expériences en laboratoire et d'analyses théoriques, nous avons exploré les aspects fondamentaux de ce phénomène complexe et en avons tiré plusieurs conclusions significatives.

➤ **La première partie a été divisé en trois chapitres :**

A travers le premier chapitre a exploré en détail le phénomène de l'écoulement brusquement varié, également connu sous le nom de ressaut hydraulique, dans les écoulements à surface libre. Nous avons commencé par jeter les bases théoriques nécessaires, en examinant les principes fondamentaux des écoulements à surface libre et en introduisant les concepts d'écoulement uniforme et critique. Ensuite, nous avons plongé dans les mécanismes complexes qui sous-tendent la formation des ressauts hydrauliques, en examinant les facteurs qui influencent leur apparition et les conditions nécessaires à leur formation.

➤ **Dans le deuxième chapitre:**

Le deuxième chapitre de notre étude bibliographique, a été consacré aux principaux travaux entrepris dans le domaine de ressaut hydraulique forcé par seuil mince dans un canal de section rectangulaire. Nous avons abordé dans ce volet, les travaux de *Rand (1957)* concernant la classification du ressaut forcé. ensuite Bretz 1988 a conduit une étude expérimentale sur l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique, ou une classification des différents types d'écoulements du ressaut forcé par seuil sont présentées.

En dernier lieu HAGER et LI (1992) on constaté que la variation de la hauteur relative du S et de la position relative du seuil, permet le passage d'un type de ressaut forcé à un autre type.

➤ **Le dernier chapitre:**

De la partie bibliographique a mis l'accent sur L'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal composé droit à aboutit à une équation fonctionnelle de forme $\phi(F_1, Y, \beta, \tau)$.

Une nouvelle approche est proposée en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du développement

théorique mené par Achour(2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans nos développements, les valeurs du rapport des longueurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapprochées de la réalité.

Nous avons étudié également les travaux de Riguet et al 2020, l'étude s'est intéressée à la variation de Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour cinq ouvertures différentes dans les deux lits du canal composé.

En remarque en premier lieu que l'augmentation du nombre de Froude F_1 entraîne celle du rapport Y des hauteurs conjuguées pour les deux sections du canal.

➤ **La deuxième partie de notre travail:**

A concerné notre propre contribution à l'étude de la variation des hauteurs conjuguées du Ressaut Hydraulique Forcé type A par seuil mince dans un Canal Rectangulaire Composée

Nous avons consacré pour le quatrième chapitre à l'étude du modèle expérimental, qui a servi de base dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal à section rectangulaire composée. dans chapitre nous avons abordé les appareils de mesure utilisés dans ce travail de laboratoire nous les avons illustrés par des photographies, dans le but de prendre toutes les mesures nécessaires qui concernent les caractéristiques du ressaut hydraulique. En ce qui concerne les mesures des débits, nous avons utilisé le débitmètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de Rachedi. Hachemi(2006)vu son efficacité et nous avons abouti à des résultats acceptables.

➤ Le cinquième chapitre de notre mémoire de master :

De master a concerné l'étude expérimentale du ressaut hydraulique forcé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire en lit composé pente nulle(canal prismatique). L'analyse des résultats exprimé en taux nous a permis de trouver des approches expérimenté a les globales très acceptables.

Des courbes, représentant le rapport des hauteurs conjuguées YF en fonction de nombre de Froude, sont tracées.

L'étude a montré que le rapport YF des hauteurs conjuguées dépend du nombre de Froude F_1 et de la hauteur relative S du seuil. le rapport YF des hauteurs conjuguées, varient linéairement en fonction du nombre de Froude.

On en déduit que lit mineur dissipe mieux l'énergie par rapport au lit majeur dans ce type du ressaut évolué dans le canal composé.

En espère bien qu'on a contribué à l'expérimentation de ce type du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée et on recommandera de continuer les travaux dans ce type du canal en but d'élaborer d'autres approches expérimentales servent au dimensionnement du bassin d'amortisseur.

ANNEXE

ANNEXE

Tableau 01 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(F)$ pour $h_0/h_{2A} > 1$

b	B	β	$\beta=0.24/0.6$	h_0	S/h1	h1	S	h2 A	hq A	h2 A/h1	Q	F1	S/h1 EX
0.2	0.2	1	0.4	0.2	0.5	0.04	0.02	0.151	0.124	3.775	0.018	3.645	26.80817
0.2	0.2	1	0.4	0.2	0.75	0.04	0.03	0.173	0.134	4.325	0.021	4.095	27.74949
0.2	0.2	1	0.4	0.2	0.571429	0.035	0.02	0.15	0.118	4.286	0.017	4.134	27.61081
0.2	0.2	1	0.4	0.2	1	0.04	0.04	0.196	0.143	4.900	0.023	4.515	28.62734
0.2	0.2	1	0.4	0.2	0.666667	0.03	0.02	0.141	0.107	4.700	0.015	4.499	28.15222
0.2	0.2	1	0.4	0.2	0.857143	0.035	0.03	0.168	0.126	4.800	0.019	4.562	28.50558
0.2	0.2	1	0.4	0.2	0.8	0.025	0.02	0.127	0.093	5.080	0.012	4.792	28.54485
0.2	0.2	1	0.4	0.2	1	0.03	0.03	0.156	0.114	5.200	0.016	4.947	29.09117
0.2	0.2	1	0.4	0.2	1.142857	0.035	0.04	0.185	0.134	5.286	0.021	5.003	29.42922
0.2	0.2	1	0.4	0.2	1.333333	0.03	0.04	0.175	0.122	5.833	0.018	5.477	30.20006
0.2	0.2	1	0.4	0.2	1	0.02	0.02	0.117	0.081	5.850	0.010	5.444	29.68755
0.2	0.2	1	0.4	0.2	1.2	0.025	0.03	0.145	0.102	5.800	0.014	5.504	30.03543
0.2	0.2	1	0.4	0.2	1.666667	0.03	0.05	0.19	0.128	6.333	0.019	5.886	31.05606
0.2	0.2	1	0.4	0.2	1.6	0.025	0.04	0.163	0.11	6.520	0.015	6.164	31.41698
0.2	0.2	1	0.4	0.2	1.5	0.02	0.03	0.136	0.09	6.800	0.011	6.376	31.63826
0.2	0.2	1	0.4	0.2	2	0.025	0.05	0.178	0.116	7.120	0.017	6.675	32.48685
0.2	0.2	1	0.4	0.2	2	0.02	0.04	0.152	0.097	7.600	0.013	7.134	33.22495
0.2	0.2	1	0.4	0.2	2	0.025	0.05	0.194	0.122	7.760	0.018	7.200	33.58475
0.2	0.2	1	0.4	0.2	3	0.02	0.06	0.168	0.103	8.400	0.014	7.806	34.63149
0.2	0.2	1	0.4	0.2	3	0.02	0.06	0.181	0.108	9.050	0.015	8.381	35.83542
0.2	0.2	1	0.4	0.2	3.5	0.02	0.07	0.198	0.114	9.900	0.016	9.089	37.3173

Tableau 02 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(F)$ pour $h_0/h_{2A} < 1$.

b	B	β	$\beta=0.24/0.6$	h_0	S/h1	h1	S	h2 A	hq A	h2 A/h1	Q	F1	S/h1 EX
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	1.25	0.04	0.05	0.215	0.15	5.375	0.024	4.850	28.15063
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	1.5	0.04	0.06	0.224	0.1535	5.600	0.025	5.021	28.50799
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	1.75	0.04	0.07	0.231	0.1565	5.775	0.026	5.169	28.81756
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	2	0.04	0.08	0.236	0.1585	5.900	0.026	5.268	29.02559
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	1.428571	0.035	0.05	0.205	0.1395	5.857	0.022	5.314	29.04895
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	2.25	0.04	0.09	0.242	0.1615	6.050	0.027	5.418	29.34012
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	2.5	0.04	0.1	0.248	0.1645	6.200	0.028	5.570	29.65757
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	1.714286	0.035	0.06	0.218	0.1455	6.229	0.023	5.661	29.77423
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	2.75	0.04	0.11	0.253	0.1675	6.325	0.029	5.723	29.97794
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	2	0.035	0.07	0.224	0.148	6.400	0.024	5.808	30.08091
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	2.285714	0.035	0.08	0.229	0.15	6.543	0.024	5.926	30.32813
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	2.571429	0.035	0.09	0.238	0.153	6.800	0.025	6.104	30.70206
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	2.857143	0.035	0.1	0.244	0.1555	6.971	0.026	6.255	31.01648
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	2	0.03	0.06	0.21	0.1345	7.000	0.021	6.340	31.12209
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	3.142857	0.035	0.11	0.25	0.1585	7.143	0.026	6.436	31.39713
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	3.428571	0.035	0.12	0.254	0.1615	7.257	0.027	6.620	31.7814
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	2.333333	0.03	0.07	0.22	0.1385	7.333	0.022	6.625	31.71844
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	2.666667	0.03	0.08	0.228	0.1415	7.600	0.022	6.842	32.1714
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	3	0.03	0.09	0.233	0.1435	7.767	0.023	6.987	32.47606
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	3.333333	0.03	0.1	0.239	0.1465	7.967	0.023	7.207	32.93704
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	3.666667	0.03	0.11	0.245	0.1495	8.167	0.024	7.430	33.40277
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	2.8	0.025	0.07	0.212	0.1255	8.480	0.019	7.512	33.50103
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	4	0.03	0.12	0.25	0.152	8.333	0.025	7.617	33.79446
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	4.333333	0.03	0.13	0.254	0.1545	8.467	0.025	7.806	34.18939
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	3.2	0.025	0.08	0.221	0.1295	8.840	0.019	7.874	34.25866

0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	3.6	0.025	0.09	0.226	0.1315	9.040	0.020	8.057	34.64192
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	4	0.025	0.1	0.231	0.1335	9.240	0.020	8.242	35.02809
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	4.4	0.025	0.11	0.235	0.135	9.400	0.021	8.381	35.31963
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	4.8	0.025	0.12	0.24	0.1375	9.600	0.021	8.615	35.80914
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	5.2	0.025	0.13	0.246	0.1405	9.840	0.022	8.898	36.40244
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	5.6	0.025	0.14	0.251	0.143	10.040	0.023	9.137	36.90173
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	6	0.025	0.15	0.256	0.145	10.240	0.023	9.329	37.30432
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	4	0.02	0.08	0.212	0.117	10.600	0.017	9.450	37.48367
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	6.4	0.025	0.16	0.26	0.147	10.400	0.024	9.523	37.70969
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	6.8	0.025	0.17	0.265	0.1495	10.600	0.024	9.767	38.2203
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	4.5	0.02	0.09	0.22	0.12	11.000	0.017	9.816	38.24925
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	5	0.02	0.1	0.225	0.122	11.250	0.018	10.062	38.765
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	5.5	0.02	0.11	0.23	0.124	11.500	0.018	10.311	39.28499
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	6	0.02	0.12	0.236	0.126	11.800	0.019	10.561	39.80919
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	6.5	0.02	0.13	0.241	0.1285	12.050	0.019	10.877	40.47032
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	7	0.02	0.14	0.248	0.1305	12.400	0.020	11.132	41.00387
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	7.5	0.02	0.15	0.253	0.1325	12.650	0.020	11.389	41.54153
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	8	0.02	0.16	0.258	0.135	12.900	0.021	11.713	42.21933
0.2	0.6	0.333	0.4	0.2	8.5	0.02	0.17	0.266	0.1375	13.300	0.021	12.040	42.90343

Référence et bibliographie

REFERENCE ET BIBLIOGRAPHIE

ACHOUR B. (2000) Ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. JHR 2000 ; 38(4): 307-311.

ACKERS P. (1991) Hydraulic design of straight compound channels.
SR281, HR Wallingford, Wallingford, U K, 1991.

RIGAET F . Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée (2021) Univ :MK Biskra

BOUSMAR D, RIVIÈRE N, PROUST S, PAQUIER A, MOREL R, ZECH Y. (2005) Upstream discharge distribution in compound-channel flumes. J H Eng 2005, ASCE; 131(5): 408-412.

BOUSMAR D, WILKIN N, JACQUEMART, J H, ZECH Y. (2004) Overbank flow in symmetrically narrowing flood plains. J H Eng 2004; 130(4): 305-312.

MORVAN H, PENDER G, WRIGHT N G, ERVINE D A. (2002) Three- Dimensional hydrodynamics of meandering compound channels. JHE 2002; 128(7): 674-682.

SELLIN R H J. (1964) A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. La Houille Blanche 2002; 7: 793-802

FERNANDES, J.N., LEAL, J.B., CARDOSO, A.H. (2010). Discussion of “Apparent friction coefficient in straight compound channels”, by Pedro J.M. Moreta and Juan Pedro Martin-Vide, Journal of Hydraulic Research (in press).

PELTIER, Y. (2011), Physical modelling of overbank flows in the vicinity of a groyne set on the floodplain. PhD-thesis of the University of Lyon, manuscript in preparation.

PROUST, S. (2005), Ecoulements non-uniformes en lits composés : effets de variations de largeur du lit majeur, PhD-Thesis, INSA de Lyon, n°2005-ISAL-0083, 362 p, Lyon, France.

PROUST, S., BOUSMAR, D., RIVIÈRE, N., PAQUIER, A. AND ZECH, Y. (2010), Energy losses in compound open channels. Advances in Water Resources,

Ghomri, A., Debabeche, M., Riguet, F., l'étude semi théorique du Ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en "U" à fond rugueux, Revues des sciences fondamentales et appliquées, centre universitaire d'Oued Souf, N° 01, pp.40-57, 2009.

PROUST, S., BOUSMAR, D., RIVIÈRE, N., PAQUIER, A. AND ZECH, Y. (2009),

Nonuniform flow in compound channel: A 1-D method for assessing water level and discharge distribution. Water Resources Research, vol. 45, n° W12411, 1-16.

SHIONO, K., AND KNIGHT, D. W. (1991), Turbulent open channel flows with variable depth across the channel, Journal of Fluid Mechanics, 222, 617-646.

STOCCHINO, A. AND BROCCINI, M. (2010), Horizontal mixing of quasi-uniform straight compound channel flows, Journal of Fluid Mechanics, 643, 425-435.