



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université d'El-Oued

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil



MEMOIRE

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

Option: *Conception et Diagnostic des systèmes d'AEP et d'assainissement*

l'intitulé du thème :

**Etude de la deuxième hauteur relative
conjugué expérimentale du ressaut
hydraulique dans un canal rectangulaire de
section composée**

✓ **Présenté par :**

- BOUSBIA SALAH Souhil
- ROKH Med Larouci

Dirigé par :

RIGUET Ferhat

Promotion : Juin 2018

Dédicaces

SOUHIL : A *ma mère et mon père* A tous mes frères et sœurs A tous les membres de ma famille A tous mes amis et camarades, A tous Mes professeurs et enseignants qui me passaient dans ma carrière pédagogique, Je dédie mon travail.

MED LAROUCI : A *ma mère* et A tous mes frères et sœurs A tous les membres de ma famille A tous mes amis et camarades, A tous Mes professeurs et enseignants qui me passaient dans ma carrière pédagogique, Je dédie mon travail.

REMERCIEMENT

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

*En premier lieu nous tenons à remercier monsieur **RIGUET Ferhat** mon notre 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 l'étude expérimentale de la deuxième hauteur relative du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée , notre travail se subdivise en deux parties essentielles, la première concernant une étude bibliographique et la seconde traite une expérimentation de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée.

Mots clés : Ressaut hydraulique, Canal rectangulaire de section composé, écoulement brusquement varié.

ABSTRACT

Our work concerns the experimental study of the second relative height of the hydraulic jump in a rectangular channel of composite section, 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 hydraulic jump evolving in a rectangular channel of composed section.

Keywords : Hydraulic jump, Rectangular channel of compound section, flow suddenly varied.

المخلص

يتضمن عملنا الدراسة التجريبية الارتفاع النسبي الثاني للقفزة الهيدروليكية في قناة مستطيلة من القسم المركب، وينقسم عملنا إلى قسمين أساسيين، الأول يتعلق بالدراسة النظرية والثاني يتعلق بتجربة بعض خصائص القفزة الهيدروليكية المتطورة في قناة مستطيلة من قسم مركب.

الكلمات المفتاحية: القفزة الهيدروليكية، قناة مستطيلة من قسم مركب. تدفق قوي ومفاجئ

SOMMAIRE

Première Partie : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION GENERALE	01
INTRODUCTION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	02
<u>Chapitre I : Ressaut hydraulique en canal rectangulaire</u>	
1.1 introduction	03
1.2 Ressaut hydraulique classique	04
1.2.1 Forme du ressaut classique	04
1.2.2 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	05
1.2.3 Longueurs caractéristiques du ressaut	06
1.2.3.1 Longueur du rouleau	06
1.2.3.2 Longueur du ressaut	07
1.2.4 Rendement du ressaut	08
1.3 Conclusion	10
<u>Chapitre II : Ressaut hydraulique contrôle par seuil mince dans un canal rectangulaire</u>	
2.1 Introduction	11
2.2 Ressaut contrôlé par seuil continu a paroi mince	12
2.2.1 Approche de Forster et Skrinde	12
2.2.2 Essais actuels pour $X \simeq Lr$	13
2.2.3 Essais actuels pour $X \cong Lr$	17
2.3 Conclusion	21
<u>Chapitre III : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée</u>	
3.1 Introduction	22
3.2 Rapport des hauteurs conjuguées	22
3.3 Rendement du ressaut	26
3.4 Configuration expérimentale	27
3.4.1 Les appareils de mesures	27
3.4.2 Conditions d'écoulement	29
3.5 Résultats expérimentaux et discussion	30
3.5.1 Niveau d'eau	30
3.5.2 Profils latéraux de la vitesse d'écoulement et de contrainte de Reynolds	31
3.5.3 Profils verticaux de la vitesse d'écoulement et de contrainte de Reynolds	34
3.6 Conclusion	38
CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	39

Deuxième Partie : ETUDE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION DE LA PARTIE EXPERIMENTALE	41
<u>Chapitre IV : Description du model expérimental</u>	
4.1 Introduction	42
4.1.1 Description du canal	42
4.2 Limnimètre	46
4.3 Le seuil a paroi mince	47
4.4 Les ouvertures	48
4.5 Conclusion	49

Chapitre V : Etude expérimental

5.1 Introduction	50
5.1.1 Détermination expérimental de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en lit composé	50
5.1.2 Description des essais	51
5.2 Rapport du hauteur conjuguée	52
5.3 Rendement du ressaut	55
5.4 Conclusion	61
CONCLUSION DE LA PARTIE EXPERIMENTALE	62
CONCLUSION GENERALE	63

Liste des figures

LISTE DE FIGURE

Première Partie : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre I : Ressaut hydraulique en canal rectangulaire	
Figure 1.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). a) pré-ressaut, b) ressaut de transition, c) ressaut stable et d) ressaut agité.	05
Figure 1.2 : Ressaut hydraulique classique.	05
Figure 1.3 : Aspect du ressaut classique. a) Rouleau développé. b) rouleau non développé.	06
Figure 1.4 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique	08
Figure 1.5 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude. (—) Courbe tracée selon la relation (21). (---) Courbe tracée selon la relation (22).	09
Chapitre II : Ressaut hydraulique contrôle par seuil mince dans un canal rectangulaire	
Figure 2.1 : Ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince	12
Figure 2.2 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative X/h_2 du seuil (<i>Forster et Skinde, 1950</i>).	13
Photo 2.3 : Dispositif expérimental ayant servi à l'étude du ressaut contrôlé par un seuil dans un canal rectangulaire.	14
Figure 2.4 : Schéma simplifié du dispositif expérimental.	14
Figure 2.5 : Variation expérimentale de C_o en fonction de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince.	17
Figure 2.6 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de X/h_1 .	17
Figure 2.7 : Contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour $X \cong L_j$	18
Photo 2.8 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire $F_1 = 7,74$, $h_1 = 2,5$ cm, $s = 14$ cm et $X = 184$ cm.	18
Figure 2.9 : Variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince ($X \cong L_j$) (- - -) courbe tracée selon la relation (6).	19
Figure 2.10 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident ($X \cong L_j$). (- - -) courbe tracée selon la relation (7).	19
Figure 2.11 : Variation expérimentale de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude incident F_1 lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ($X \cong L_j$).	20
Figure 2.12 : Variation expérimentale de la position relative X/h_1 du seuil à paroi mince en fonction de $(F_1 - 1)$ lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ($X \cong L_j$). (- - -) courbe tracée selon la relation (8).	20
Chapitre III : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée	
Figure 3.1 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit	22
Figure 3.2 : Variation de Y , calculé par (1), en fonction de F_1 . (- - -) : $\beta = 1$	25
Figure 3.3 : Variation Y en fonction de F_1 . (0) : équation 2, (+) : équation 1	26
Figure 3.4 : Variation de η en fonction de F_1 . (- - -) : $\beta = 1$. Y est calculé par l'équation (3).	27

Figure 3.5 :Variation η en fonction de F_1 . (0) : équation 2, (+) : équation 1	27
Figure 3.6 : Canal de canal composé à LMFA (le schéma n'est pas à l'échelle)	28
Figure 3.7 :Niveau d'eau Z mesuré à partir du bas du canal principal. Débit $Q = 17,3$ L/s les conditions d'écoulement données dans la légende sont résumées dans le tableau (3.2).	31
Figure 3.8 : Vitesse moyennes u et Reynolds de contrainte τ_{xy} vs distance latérale. Profil horizontal à l'élévation $Z = 0.6 h_f$. Station aval $x = 4,5$ m	33
Figure 3.9 : Position des pics de la contrainte de Reynolds τ_{xy} pour le débit $Q = 24,7$ L/s, à deux altitudes différentes: $Z = 0.6 h_f$ et $0.4 h_f$	33
Figure 3.10 : Vitesse envergure v et contrainte de Reynolds τ_{xy} à l'élévation $0.6h_f$ pour le débit $Q = 36,3$ L/s et station aval $x = 4,5$ m	34
Figure 3.11 : Profils verticaux de la vitesse d'écoulement en continu u à deux positions latérales dans le canal principal: a) $y = 810$ mm et b) $y = 1025$ mm Station aval $x = 4,5$ m	35
Figure 3.12 : Profils verticaux de la contrainte de Reynolds τ_{xy} à deux positions latérales dans le canal principal: a) $y = 810$ mm et b) $y = 1025$ mm .Station aval $x = 4,5$ m	36
Figure 3.13 : Profils verticaux de la contrainte de Reynolds τ_{xy} à deux positions latérales dans le canal principal: a) $y = 810$ mm et b) $y = 1025$ mm .Station aval $x = 4,5$ m	37
<u>Deuxième Partie : ETUDE EXPERIMENTALE</u>	
<u>Chapitre IV : Description du model expérimental</u>	
Figure 4.1 : Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composé	43
Photo 4.2 : Photographie du model expérimentale du canal	43
Photo 4.3 : Pompe centrifuge axial	44
Photo 4.4 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit	44
Photo 4.5 : Section de contrôle	45
Photo 4.6 : Photographie de convergent	45
Photo 4.7 : Photographie d'une boîte en charge	45
Figure 4.8 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique	46
Photo 4.9 : Photographie des seuils minces testés	47
Photo 4.10 : La vanne	48
Photo 4.11 : Les ouvertures	48
<u>Chapitre V : Etude expérimental</u>	
Figure 5.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince	50
Figure 5.2 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 2$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement	52
Figure 5.3 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 2.5$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement	52
Figure 5.4 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 3$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement	53
Figure 5.5 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 3.5$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement	53
Figure 5.6 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 4$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement	54

Figure 5.7 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction l'approche globale $1.3689 - 0.39356$ (\square) points expérimentaux , (—) la première bissectrice	55
Figure 5.8 : Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1= 2$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement	56
Figure 5.9 : Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1= 2.5$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement	56
Figure 5.10 : Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1= 3$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement	57
Figure 5.11 : Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1= 3.5$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement	57
Figure 5.12 : Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1= 4$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement	58
Figure 5.13 : Variation de coefficient a_i en fonction de rapport de hauteur initiale relative (h_1/B) (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement	59
Figure 5.14 : Variation de coefficient b_i en fonction de rapport de hauteur initiale relative (h_1/B) (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement	59
Figure 5.15 : variation du rendement $\eta_{relation}$ en fonction du rendement $\eta_{expérimental}$; (\square) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement	60

Liste des tableaux

LISTE DE TABLEAU

<u>Première Partie</u> : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
<u>Chapitre II</u> : Ressaut hydraulique contrôle par seuil mince dans un canal rectangulaire	
Tableau 2.1 : Valeurs expérimentales C_o pour quelques positions relatives X/h_2 du seuil paroi mince	16
<u>Chapitre III</u> : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée	
Tableau 3.1 : symboles et nation	23
Tableau 3.2 :condition d'écoulement	30
<u>Deuxième Partie</u> : ETUDE EXPERIMENTALE	
<u>Chapitre V</u> : Etude expérimental	
Tableau 5.1 : les résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du F_1 pour chaque ouverture h_1	52
Tableau 5.2 : les résultats expérimentaux de rendement η en fonction du F_1 pour chaque ouverture h_1 et les mesures de (h_1/B)	58

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le ressaut hydraulique est obtenu, suite à la transition de l'écoulement d'un régime torrentiel à un régime fluvial. Ce phénomène peut se produire dans un bassin de dissipation à l'aval d'un ouvrage hydraulique. C'est le moyen le moins onéreux et le plus pratique pour dissiper l'énergie emmagasinée dans cet ouvrage, afin d'éviter d'importantes modifications du lit de la rivière situé à l'aval.

Ces dernières années, le ressaut hydraulique a fait l'objet de nombreuses recherches fondamentales et appliquées. Les recherches expérimentales ont d'abord confirmé que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale.

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,...etc.), peut conduire à différentes configurations de ressaut hydraulique.

Le but de notre travail est étude de la deuxième hauteur relative conjuguée expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée

Pour notre cas il s'agit de ressaut hydraulique évoluant dans un canal de rectangulaire de section composée, muni d'une paroi mince.

Par ailleurs, le ressaut hydraulique contrôlé par marche n'a connu que très peu d'études, ces derniers concernent surtout le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive en canal rectangulaire. Les études les plus connues dans ces domaines sont certainement celles de Forster et Skrinde (1950), de Hager et Sinniger (1985) et de Hager et Bretz (1987), qui ont concerné le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive dans un canal de section droite rectangulaire.

Ce travail est composé de deux parties principales qui se résument comme suit:

- *Première partie : étude bibliographique.*
- *Deuxième partie : étude expérimentale. au sein de Laboratoire d'Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS) BISKRA*

Ce travail est composé de cinq chapitres:

Chapitre I : Ressaut hydraulique classique en canal rectangulaire

Chapitre II: Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince 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

INTRODUCTION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

La première partie de notre étude bibliographique 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 trois chapitres cités dans la partie bibliographique suivante:

- **Le premier chapitre** a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire.
- **Le deuxième chapitre** traite le ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince dans un canal rectangulaire a été expérimentalement testé. Lorsque le seuil est placé à une distance X environ égale à la longueur L_r du ressaut.
- **Le dernier chapitre** traite le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée.

Chapitre I:

Ressaut hydraulique classique en canal
rectangulaire

1.1 INTRODUCTION

Le ressaut hydraulique est défini comme le passage de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial. Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur L_r appelée longueur du rouleau. Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible. C'est le profil de référence qui a servi de base à l'étude du phénomène tant du point de vue théorique qu'expérimental.

Les caractéristiques du ressaut sont essentiellement :

⇒ les longueurs L_r^* et L_j^* qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut.

⇒ les hauteurs initiale h_1 et finale h_2^* , appelées également hauteurs conjuguées.

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ses sections initiale et finale à la charge totale dans sa section initiale.

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un nombre de Froude $F_1 > 1$ étroitement lié au débit volume, à la hauteur initiale h_1 ainsi qu'à la forme géométrique du canal.

On s'accorde à dire que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation liant le rapport $Y^* = h_2^*/h_1$ des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 .

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse, continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative. Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau à l'aval, de contrôler sa position lors de changements des paramètres de l'écoulement tels que les débits et contribuer enfin à une meilleure compacité du bassin.

Dans ce chapitre nous examinerons le ressaut hydraulique classique, où nous citerons essentiellement les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

1.2 Ressaut hydraulique classique

Les travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique sont nombreux et le présent chapitre se propose de passer en revue les principaux d'entre eux.

1.2.1 Forme du ressaut classique

Selon la classification proposée par Bradley et Peterka (1957), le ressaut classique peut se présenter sous quatre formes distinctes. Cette classification se base essentiellement sur la valeur du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, en excluant les formes obtenues pour $F_1 < 1,7$.

Ces dernières sont décrites par plusieurs auteurs dont Anderson (1978) et ne répondent pas aux exigences d'un bassin de dissipation d'énergie ; les ressauts correspondants sont dits ondulés présentant tantôt une surface libre régulièrement perturbée et lisse ($1 < F_1 < 1,4$), tantôt une surface libre irrégulièrement ondulée ($1,4 < F_1 < 1,7$).

Selon la classification de Bradley et Peterka (1957) on distingue :

1. LE PRE-RESSAUT obtenu pour la gamme $1,7 < F_1 < 2,5$ figure (1.1).

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

2. LE RESSAUT DE TRANSITION obtenu pour la gamme $2,5 < F_1 < 4,5$ figure (1.2). Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

3. LE RESSAUT STABLE obtenu pour la gamme $4,5 < F_1 < 9$ figure (1.3). C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans les bassins de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

4. LE RESSAUT AGITE OU CLAPOTEUX obtenu pour $F_1 > 9$ figure (1.4). Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très élevée. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.

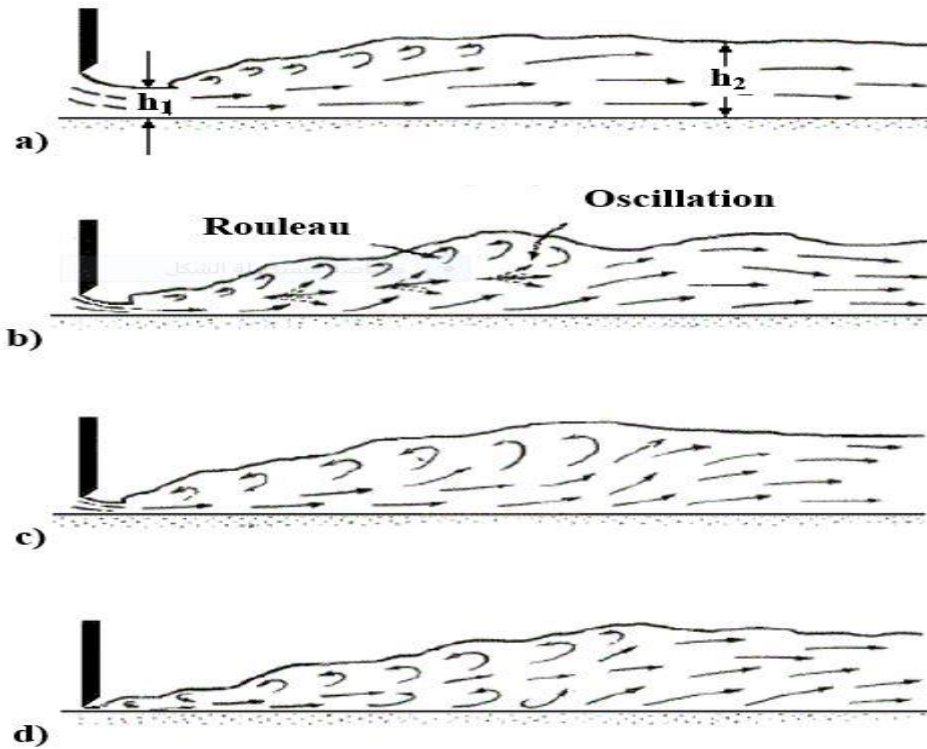


Figure 1.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957).
 a) pré-ressaut, b) ressaut de transition, c) ressaut stable et d) ressaut agité.

1.2.2 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure(1.2) montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiale et finale 1 et 2.

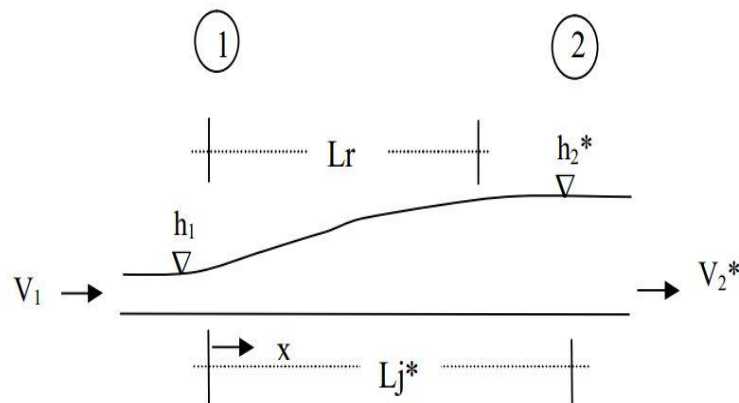


Figure 1.2 : Ressaut hydraulique classique.

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

$$V_1 = Q/A_1 \tag{1}$$

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

$$A_1 = b.h_1 \tag{2}$$

b est la largeur du canal rectangulaire.

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

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

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

$$\varpi.b.h_1^2/2 + \rho.Q.V_1 = \varpi.b.h_2^{*2}/2 + \rho.Q.V_2^* \quad (3)$$

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

En tenant compte des relations (1) et (2) et sachant que le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut est tel que :

$$F_1^2 = Q^2 / (g.b^2.h_1^3) \quad (4)$$

La relation (3) conduit à écrire :

$$Y^* = \frac{h_2^*}{h_1} = 0.5 \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (5)$$

La relation (5) est connue sous le nom d'équation de Bélanger et permet d'évaluer le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 . Hager et Sinniger (1985) proposent une relation approchée applicable pour les nombres de Froude

$$F_1 > 2 : \quad Y^* = \frac{h_2^*}{h_1} = \sqrt{2}.F_1 - \frac{1}{2} \quad (6)$$

1.2.3 Longueurs caractéristiques du ressaut

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

1.2.3.1 Longueur du rouleau

En 1990 Hager et al (1990) définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisant ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé. La figure (3) montre ces deux types de ressaut et les longueurs L_r qui leur correspondent.

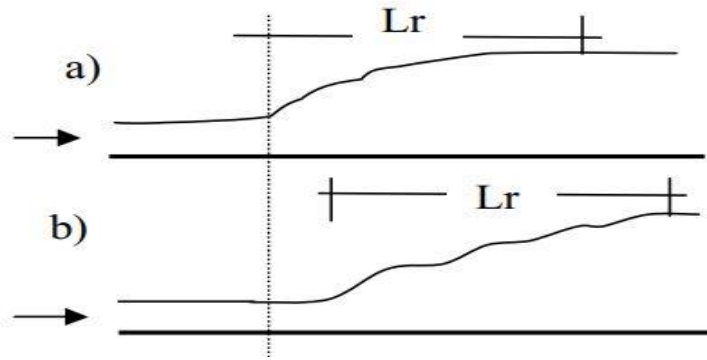


Figure 1.3 : Aspect du ressaut classique. a) Rouleau développé. b) rouleau non développé.

Le rouleau non développé est caractérisé par une longueur plus courte que celle du rouleau développé et sa surface à l'aval se présente sous l'aspect de vagues. Au fond de la masse liquide en mouvement, on peut distinguer une zone de rouleau dite de séparation formant un tourbillon de fond. En raison de la présence de cette zone, le jet entrant dans la section initiale du ressaut est dévié vers la surface libre.

Le rouleau développé présente une surface relativement lisse et est caractérisé par une quasi-stabilité. Le jet entrant dans la section initiale du ressaut adhère sur une certaine distance au fond du canal puis diverge en s'orientant vers l'aval.

Les essais effectués par Hager et al. (1990) montrent que, pour le cas du ressaut classique, le rapport $\lambda_r^* = L_r/h_1$ dépend du nombre de Froude F_1 et du rapport d'aspect $w = h_1/b$. Les auteurs proposent les relations suivantes :

$$\lambda_r^* = -12 + 160 \operatorname{Tgh}(F_1/20) \text{ pour } w = h_1/b < 0,1 \quad (7)$$

$$\lambda_r^* = -12 + 100 \operatorname{Tgh}(F_1/12,5) \text{ pour } 0,1 < w < 0,7 \quad (8)$$

« Tgh » désigne la tangente hyperbolique.

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

$$\lambda_r^* = L_r^*/h_1 = 8.(F_1 - 1,5) \text{ , } 2,5 < F_1 < 8 \quad (9)$$

1.2.3.2 Longueur du ressaut

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

1. La surface libre est pratiquement horizontale
2. La surface de turbulence du rouleau est faible

3. Les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.
4. L'écoulement graduellement varié apparaît à l'extrémité aval du rouleau.

Toutes les définitions ont pour but d'indiquer la limite aval du ressaut au-delà de laquelle la protection ou le rendement du bassin amortisseur n'est pas nécessaire.

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

$$L_j^*/h_1 = 220.Tgh [(F_1-1)/22] \quad (10)$$

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

$$L_j^*/h_2^* = 6 \quad (11)$$

1.2.4 Rendement du ressaut

La figure (1.4) montre la ligne de charge totale le long de la longueur L_j sur laquelle s'étend le ressaut classique.

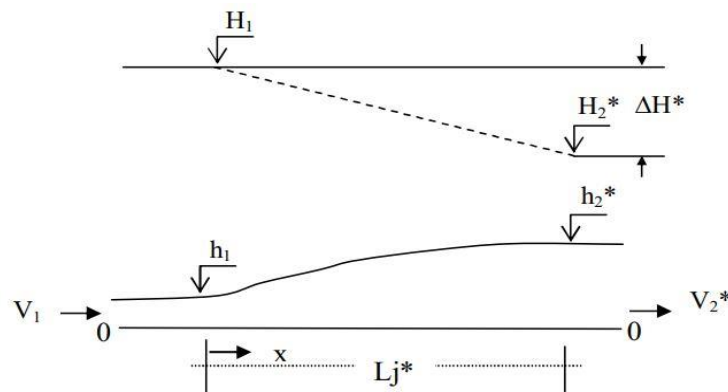


Figure 1.4 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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

$$H_1 = h_1 + \alpha_1.V_1^2/(2.g) \quad (12)$$

Tandis que la charge totale dans la section finale est :

$$H_2^* = h_2^* + \alpha_2.V_2^{*2}/(2.g) \quad (13)$$

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

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

$$\Delta H^* = H_1 - H_2^* \quad (14)$$

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

$$Q = V_1.A_1 = V_2^*.A_2^* \quad (15)$$

Où $A_1 = b.h_1$ et $A_2^* = b.h_2^*$. En tenant compte des relations (12), (13) et (14), (15) s'écrit :

$$\Delta H^* = (h_1 - h_2^*) + (h_1^{-2} - h_2^{*-2}).(q^2/(2.g)) \quad (16)$$

$q = Q/b$ est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'équation de la quantité de mouvement définie par (1.3) :

$$q^2/(2.g) = (h_1.h_2^{*2} + h_1^2.h_2^*)/4 \quad (17)$$

Ainsi, l'équation (1.16) s'écrit sous sa forme définitive :

$$\Delta H^* = (h_2^* - h_1)^3/(4.h_2^*.h_1) \quad (18)$$

La relation (18) exprime la perte de charge due au ressaut classique en fonction des hauteurs conjuguées de celui-ci.

On exprime souvent la capacité de dissipation du ressaut par le rapport $\eta^* = \Delta H^*/H_1$, qui représente en fait son rendement. En tenant compte de la relation (4), les charges totales initiale et finale du ressaut peuvent s'écrire respectivement :

$$H_1 = h_1[1 + F_1^2/2] \quad (19)$$

$$H_2^* = h_1[Y^* + F_1^2/(2.Y^{*2})] \quad (20)$$

Où Y^* est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par l'équation (5) de Bélanger. Ainsi, le rendement η^* s'écrit :

$$\begin{aligned} \eta^* &= \Delta H^*/H_1 = (H_1 - H_2^*)/H_1 \\ \eta^* &= 1 - [Y^* + F_1^2/(2.Y^{*2})]/(1 + F_1^2/2) \end{aligned} \quad (21)$$

Bien que la relation (21) permette le calcul explicite du rendement η^* , Hager et Sinniger (1986) proposent une expression approchée, applicable pour $F_1 > 2$:

$$\eta^* = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1^2}\right)^2 \quad (22)$$

Les relations (21) et (22) sont représentées graphiquement dans le système d'axes de coordonnées cartésiennes de la figure (1.5).

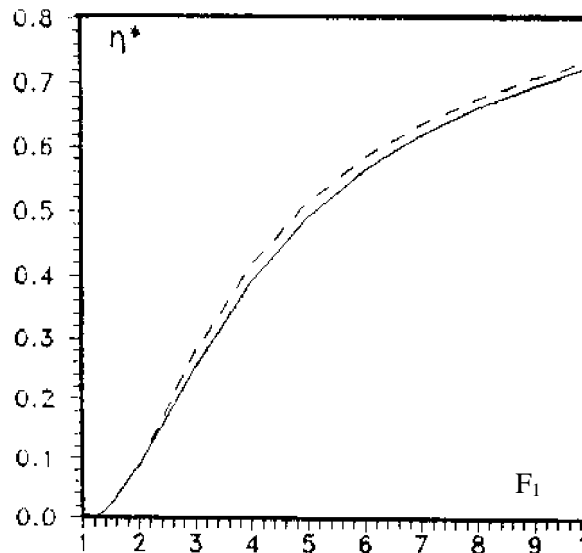


Figure 1.5 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude. (—) Courbe tracée selon la relation (21). (---) Courbe tracée selon la relation (22).

La figure (1.5) montre d'une part que le rendement η^* du ressaut classique est supérieur à 50% pour $F_1 \geq 5,1$ et que les rendements calculés en application de la relation approchée (21) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (22) d'autre part ; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

1.3 CONCLUSION

Ce chapitre a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire. Nous avons examiné les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut.

Chapitre II:

Ressaut hydraulique contrôle par seuil
mince dans un canal rectangulaire

2.1 INTRODUCTION

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

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

Peut s'écrire sous la forme $s / h_1 = f(F_1, X / h_2, h_3 / h_1)$. La position X du seuil ne peut-être analytiquement déterminée et la fonction f doit être définie par la voie expérimentale.

Pour le cas d'un seuil continu à paroi mince de hauteur géométrique s supérieure à la hauteur minimale d'apparition du ressaut, *Forster* et *Skrinde* (1950) ont établi des courbes expérimentales montrant la variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 . Le seuil testé est dénoyé et la profondeur h_3 n'a aucune influence sur l'écoulement amont. La relation fonctionnelle ci-dessus indiquée se réduit alors à $s / h_1 = f(F_1, X / h_2)$.

Le ressaut est tel que son rouleau de surface, de longueur L_r , coïncide avec la position X du seuil. Trois valeurs seulement de la position relative X/h_2 ont été considérées (3, 5 et 10).

Notre étude s'intéresse au ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal de section droite rectangulaire. Deux configurations du ressaut sont considérées. La première configuration répond aux conditions expérimentales de *Forster* et *Skrinde* (1950) ($X \cong L_r$). Nos essais ont eu pour but de définir la fonction f pour un grand nombre de valeurs de X/h_2 et ont permis ainsi d'aboutir à des résultats significatifs.

La deuxième configuration correspond à un ressaut contrôlé dont la longueur L_j coïncide avec la position X du seuil. L'analyse des mesures expérimentales a également permis de corréler les divers paramètres intervenant au phénomène. Une approche théorique est enfin

proposée à l'étude du ressaut contrôlé dont l'écoulement incident est généré par la mise en place d'un déversoir.

2.2 Ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince

2.2.1 Approche de Forster et Skrinde

La figure (2.1) montre un ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince dans un canal rectangulaire. Le seuil de hauteur s est dénoyé et fonctionne alors comme un déversoir. La profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval du seuil n'a aucune influence sur le comportement du ressaut et répond à l'inégalité :

$$h_3 < h_2 - \frac{3}{4}s \quad (1)$$

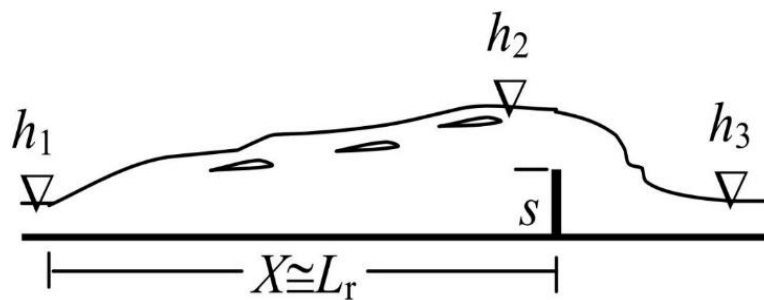


Figure 2.1 : Ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince

La figure (2.2) montre la variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les valeurs 3, 5 et 10 de la position relative X/h_2 du seuil.

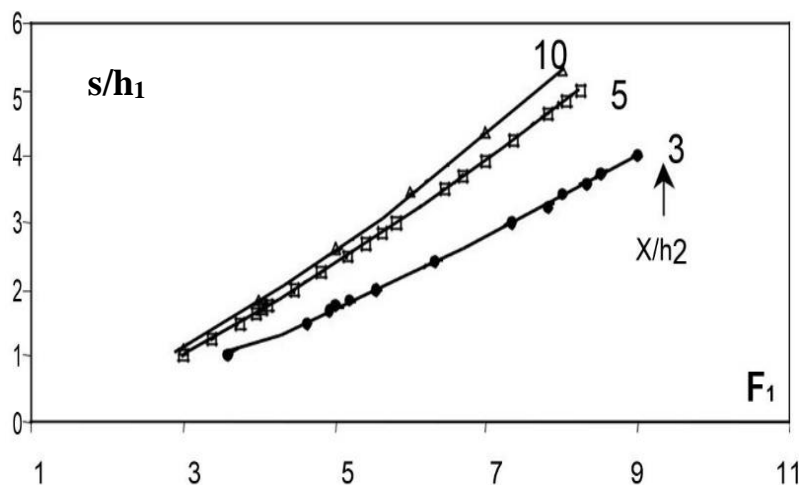


Figure 2.2 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative X/h_2 du seuil (Forster et Skinde, 1950).

La figure (2.2) montre que tout point du diagramme est représenté par la paire de coordonnées $(F_1, s/h_1)$. Lorsque les valeurs de ces coordonnées sont définies, le diagramme permet de déterminer le paramètre X indiquant l'emplacement du seuil. Si le point défini par $(F_1, s/h_1)$ se situe :

- Entre deux courbes du diagramme, la valeur de la position relative X/h_2 doit être déterminée par interpolation.
- Au-dessus de l'une des courbes du diagramme, le seuil de hauteur s est trop haut et le ressaut peut se déplacer vers l'amont sous l'influence du seuil.
- Au-dessous de l'une des courbes du diagramme, le seuil est trop bas et le ressaut peut se déplacer vers l'aval en laissant place à un écoulement torrentiel sur le radier du bassin amortisseur.

Ainsi, le diagramme représenté sur la figure (2.2) est à la base du dimensionnement du bassin amortisseur à ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince. La méthode est cependant graphique, nécessitant en règle générale des interpolations, et seules trois courbes sont proposées.

Nos essais, que nous exposerons dans ce qui suit, ont eu pour principal objectif de compléter les résultats de *Forster* et *Skrinde* (1950) et de définir de manière explicite la relation fonctionnelle $f(F_1, S, X/h_2) = 0$

2.2.2 Essais actuels pour $X \simeq L_r$

L'expérimentation a été menée dans un canal rectangulaire de largeur $b=0,30\text{m}$ et d'une longueur de 10 m, alimenté en circuit fermé par une pompe débitant 35 l/s. Les parois du canal sont en verre tandis que son fond est métallique. Des limnimètres à vernier sont disposés le long du canal par le biais de traverses supportées de part et d'autre par les parois du banc d'essais photo (2.3) et figure (2.4).



Photo 2.3: Dispositif expérimental ayant servi à l'étude du ressaut contrôlé

par un seuil dans un canal rectangulaire.

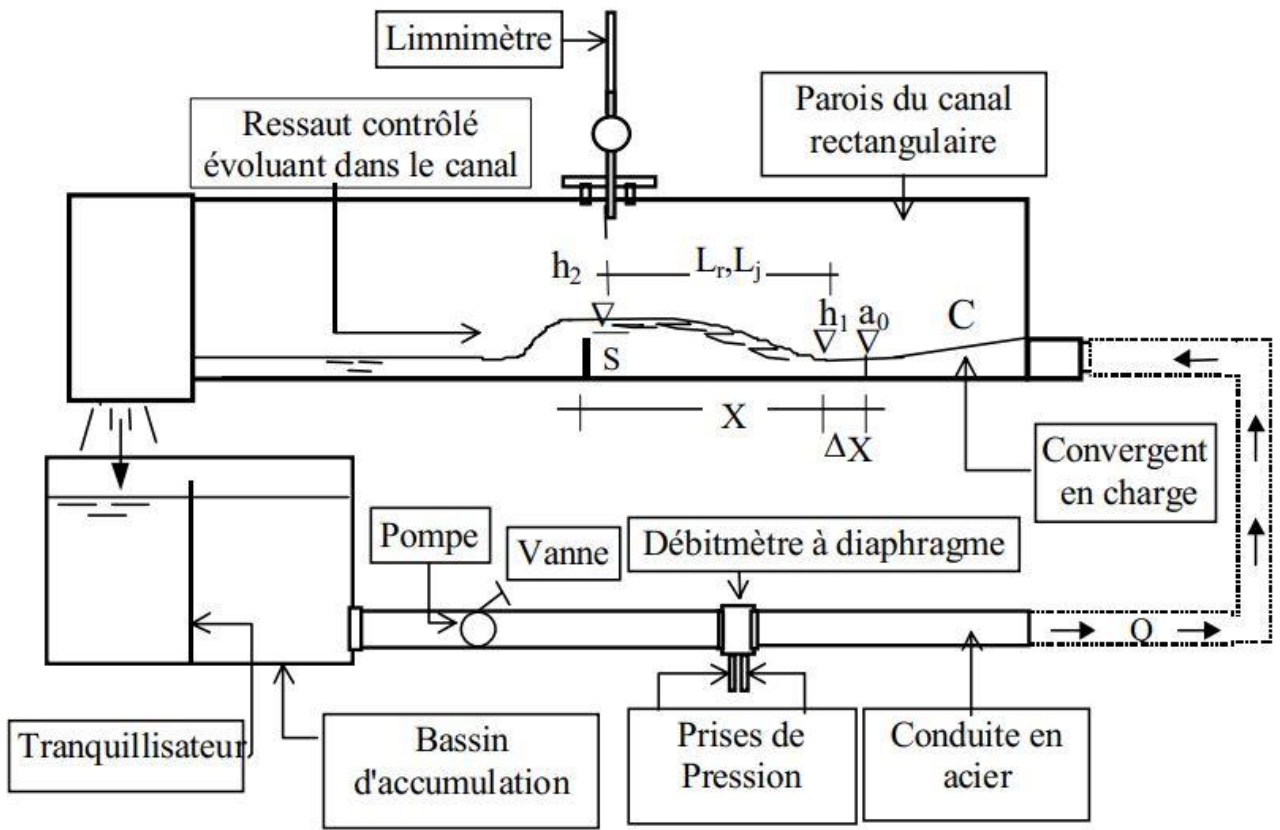


Figure 2.4 : Schéma simplifié du dispositif expérimental.

L'écoulement incident est généré par un convergent en charge "C" d'un mètre de longueur et de même largeur que le canal de mesure. Ses ouvertures initiale et finale sont respectivement de 2 cm et 15 cm et il est connecté à une boîte sous pression étanche de même largeur. L'ensemble boîte-convergent est directement alimenté par la pompe par le biais d'une tuyauterie flexible.

La boîte sous pression ainsi que le convergent sont munis de guideaux soigneusement disposés afin d'assurer au mieux la stabilité et l'uniformité de l'écoulement incident. Une paroi verticale étanche est disposée au-dessus de la boîte et sur toute sa largeur afin d'éviter toute submersion lorsque le ressaut est noyé et le canal de mesure inondé. L'ensemble du dispositif constitué du convergent et de la boîte sous pression peut se déplacer horizontalement afin de régler la position X du seuil à la valeur désirée.

Cette opération peut également être réalisée par le déplacement horizontal du seuil, mais elle est cependant beaucoup plus contraignante du fait que le seuil est soigneusement fixé et son étanchéité assurée.

La hauteur géométrique s du seuil ainsi que sa position X sont choisies de telle sorte que le rapport X/h_2 prenne des valeurs comprises entre 3 et 10 ; les essais sont exécutés avec un pas de variation $\Delta (X/h_2) \cong 0,5$.

L'ouverture a_0 du convergent peut être réglée à volonté ainsi que la hauteur géométrique s du seuil ; ceci permet d'obtenir une très large gamme de valeurs de la hauteur relative s/h_1 .

Le pied du ressaut est réglé à une distance $\Delta X \cong 5$ cm et la hauteur initiale h_1 peut être raisonnablement assimilée à l'ouverture a_0 du convergent. La mesure limnimétrique de h_1 est très délicate en raison du caractère fortement torrentiel de l'écoulement incident.

Les résultats que nous allons présenter concernent la gamme pratique du nombre de Froude F_1 tel que $3 \leq F_1 \leq 9$. Les valeurs de la hauteur relative s/h_1 du seuil qui correspondent à cette gamme de F_1 sont telles que $1 \leq s/h_1 \leq 6$.

En raison du fait que le pas de variation de X/h_2 choisi lors de nos essais est faible, les courbes expérimentales de $s/h_1 = f(F_1)$ qui en résultent sont très rapprochées et ne seront pas toutes représentées.

L'analyse des mesures expérimentales obtenues a surtout montré que la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil est liée au nombre de Froude $F = \sqrt{q^2/gh_1^3}$ par une relation de type puissance; q est le débit unitaire et g est l'accélération de la pesanteur:

$$S = C_0(F_1 - 1)^\beta \quad (2)$$

Le principal résultat que nous pouvons retenir est que l'exposant β figurant dans la relation (2) prend une valeur quasi constante d'environ 5/4 pour toute la gamme $3 \leq X/h_2 \leq 10$; seul le paramètre C_0 varie et sa variation peut être liée à celle de la position relative X/h_2 du seuil. Nous tenterons alors de définir la fonction $C_0 = \psi(X/h_2)$ à partir des résultats expérimentaux.

Le tableau 2.1 regroupe les valeurs expérimentales de C_0 qui correspondent aux diverses positions relatives X/h_2 choisies.

Tableau 2.1 : Valeurs expérimentales C_0 pour quelques positions relatives X/h_2 du seuil à paroi mince

X/h₂	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
C₀	0,300	0,330	0,360	0,390	0,421	0,425	0,429	0,433	0,444
X/h₂	7,5	8	8,5	9	9,5	10			
C₀	0,447	0,450	0,453	0,456	0,459	0,463			

Les valeurs expérimentales de C_0 ci-dessus indiquées sont traduites graphiquement sur la figure (2.5). Celle-ci montre que la courbe de variation $C_0 = \psi (X/h_2)$ peut être assimilée à deux tronçons de droites D_1 et D_2 sur l'ensemble de l'intervalle $3 \leq X/h_2 \leq 10$. Un ajustement linéaire basé sur la méthode des moindres carrés a permis d'écrire que :

$$C_0 = 0.0604 (X / h_2) + 0.1186 , 3 \leq X/ h_2 \leq 5 , R^2 = 1 \quad (3)$$

$$C_0 = 0.0086 (X / h_2) + 0.379 , 5 \leq X/ h_2 \leq 10 , R^2 = 0.973 \quad (4)$$

Les valeurs expérimentales de la hauteur relative S du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 sont représentées graphiquement sur la figure (3.6). Celle-ci montre que les courbes se rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que X/h_2 augmente. Il apparaît ainsi que dans la gamme relativement large $5 \leq X/ h_2 \leq 7$, voire même $5 \leq X/ h_2 \leq 10$, la variation que subit la hauteur relative S pour le même nombre de Froude F_1 n'est pas significative.

En outre, l'allure des courbes expérimentales obtenues semble indiquer que pour F_1 tendant vers l'unité la hauteur relative S tend vers zéro. L'égalité $F_1 = 1$ traduit la condition de criticité ($q^2/gh^3 = 1$) et implique un rapport des hauteurs conjuguées du ressaut $Y = h_2/h_1 = 1$ ($h_2 = h_1 =$ profondeur critique). Cette dernière égalité ne peut être satisfaite que si la hauteur géométrique s du seuil, et par conséquent la hauteur relative S , est nulle.

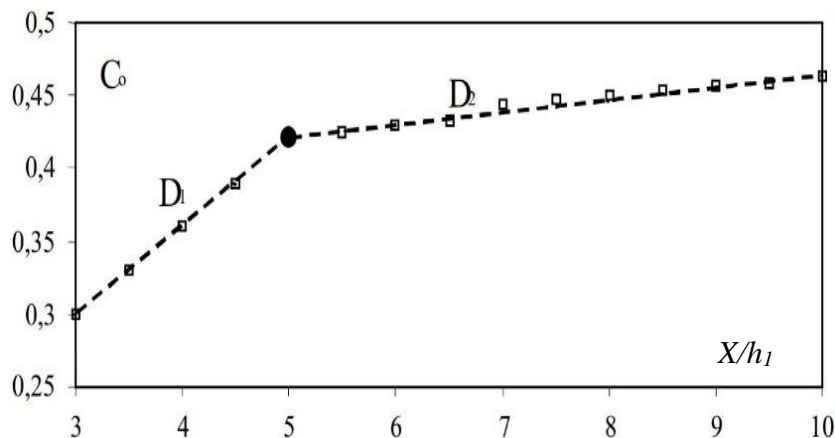


Figure 2.5 : Variation expérimentale de C_0 en fonction de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince.

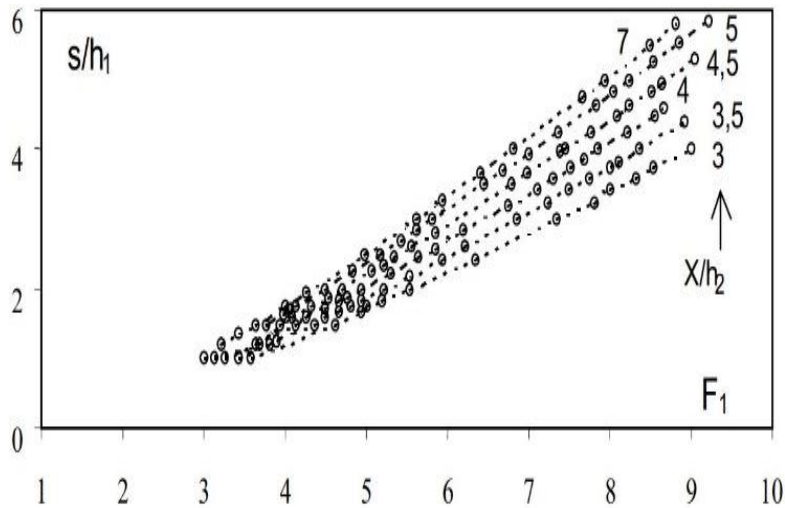


Figure 2.6 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de X/h_1 .

2.2.3 Essais actuels pour $X \cong L_j$

Cette partie de notre étude s'intéresse au ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince placé à une distance X environ égale à la longueur L_j du ressaut (figure 2.7 et photo 2.8).

Les essais ont été effectués sous une large gamme de valeurs du nombre de Froude incident F_1 tel que $1,5 \leq F_1 \leq 25$, mais nous nous limiterons à la gamme pratique $3 \leq F_1 \leq 9$. Au-delà de la valeur 9 du nombre de Froude F_1 , le ressaut est considéré comme étant fort et le rapport Y des hauteurs conjuguées ne satisfait pas l'équation de Belanger. Les valeurs mesurées de Y sont en effet inférieures à celles calculées et ceci peut être dû au changement des caractéristiques du ressaut et au frottement. Aux valeurs élevées de F_1 , la répartition de la pression n'est plus hydrostatique notamment à l'aval du ressaut et la distribution de la vitesse n'est plus uniforme comme le suppose le développement théorique qui a servi de base à l'établissement de l'équation de Belanger, applicable au ressaut classique.

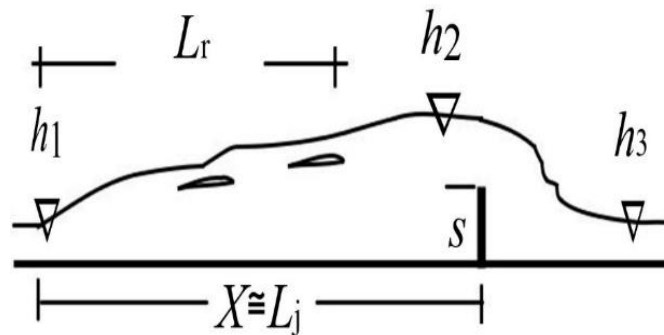


Figure 2.7 : Contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour $X \cong L_j$

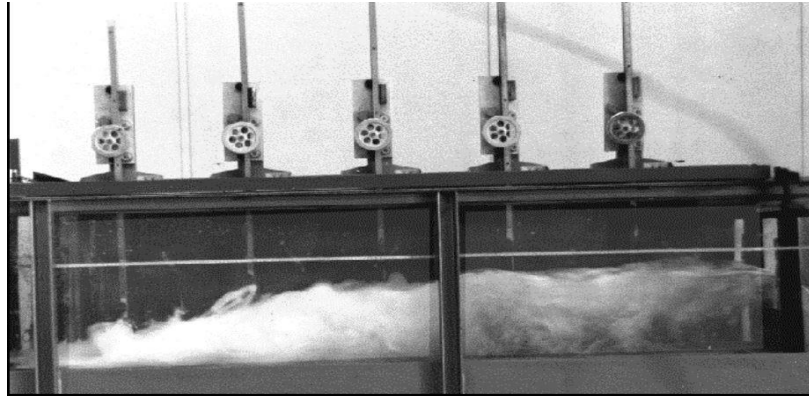


Photo 2.8 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire

$$F_1 = 7,74, h_1 = 2,5 \text{ cm}, s = 14 \text{ cm et } X = 184 \text{ cm.}$$

Dans la gamme de valeurs $3 \leq F_1 \leq 9$, les essais n'ont montré aucun effet de frottement et le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées peut donc être évalué par application de la relation:

$$Y = (1/2)[(1 + 8F_1^2)^{1/2} - 1] \quad (5)$$

Dans un premier temps, notre étude s'est intéressée à la détermination de la hauteur relative s/h_1 du seuil nécessaire à la formation du ressaut tel qu'il est représenté sur la figure 2.9 et pour la gamme pratique ci-dessus indiquée de F_1 . Les mesures expérimentales sont représentées graphiquement sur les figures 2.9 et 2.10 montrant respectivement la variation de $\xi(Y, s/h_1) = 0$ et $\zeta(F_1, s/h_1) = 0$

Ainsi, des courbes uniques sont obtenues et un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés a permis de corrélérer avec une excellente approximation les paramètres $Y, s/h_1$ et F_1 :

$$Y = 2.37 (s/h_1)^{0.8} + 1, R^2 = 0.996 \quad (6)$$

$$s/h_1 = 0.562(F_1 - 1)^{1.225}, R^2 = 0.993 \quad (7)$$

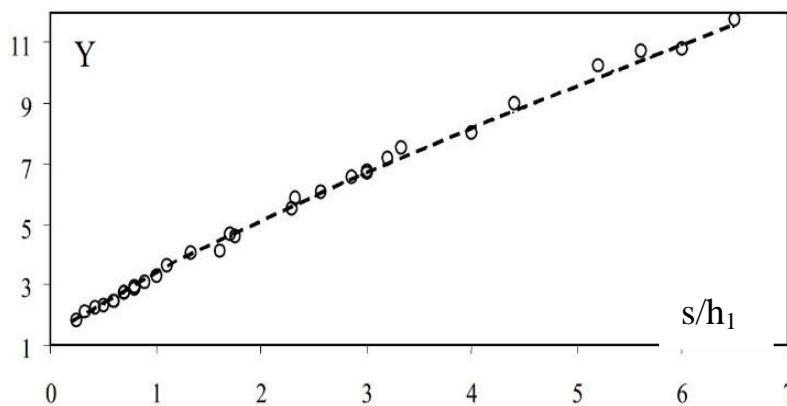


Figure 2.9 : Variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince ($X \cong L_j$)

(- - -) courbe tracée selon la relation (6).

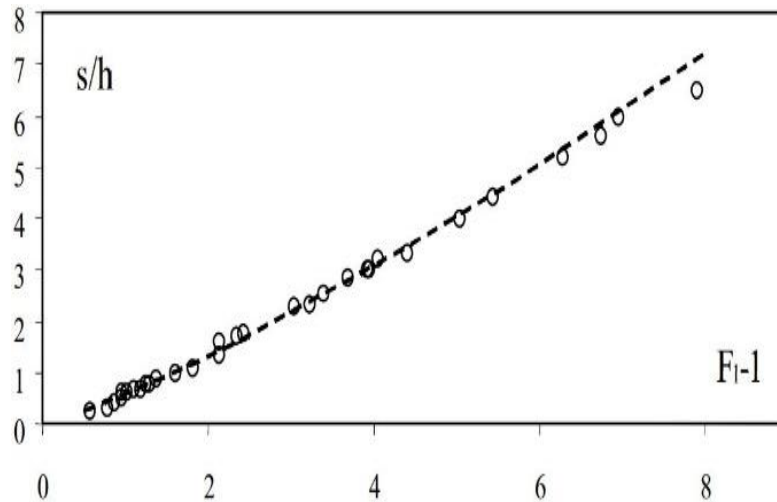


Figure 2.10 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident ($X \cong L_j$).

(- - -) courbe tracée selon la relation (7).

Notre étude s'est enfin intéressée à l'évaluation de la position X du seuil nécessaire à la formation complète du ressaut. Lorsque le seuil est placé à une distance $X = L_j$, le ressaut peut être considéré comme un ressaut classique caractérisé par un rapport X/h_2 environ égal à 6 (Peterka,1983). Cette tendance semble être confirmée par nos mesures expérimentales représentées graphiquement sur la figure (2.11), notamment pour les valeurs élevées du nombre de Froude incident F_1 .

La figure (2.11) n'indique aucune influence significative du nombre de Froude incident F_1 ($F_1 > 3$) sur la position relative X/h_2 du seuil. A ces valeurs élevées de F_1 , la surface libre de l'écoulement à l'aval du ressaut subit des perturbations plus ou moins importantes rendant imprécise la mesure limnimétrique de la profondeur h_2 ($\Delta h_2 = \pm 1,5$ cm). Les mesures expérimentales obtenues se traduisent alors par un nuage de points réparti toutefois autour de la valeur moyenne $X/h_2 = 6$. L'analyse des mesures expérimentales nous a permis de corrélérer de manière plus significative la position relative X/h_1 du seuil au nombre de Froude incident F_1 . La figure (2.12) montre la variation expérimentale de la fonction $\varphi(F_1, X/h_1) = 0$, en rappelant que F_1 est lié à la hauteur relative $S = s/h_1$ par la relation (7). Un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés a permis d'écrire

$$X / h_1 = 10 (F_1 - 1) , R^2 = 0.995 \quad (8)$$

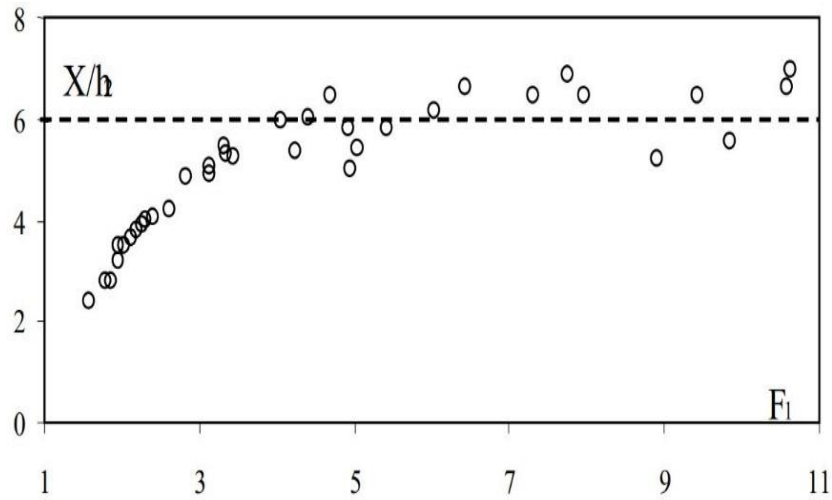


Figure 2.11 : Variation expérimentale de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude incident F_1 lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ($X \cong Lj$).

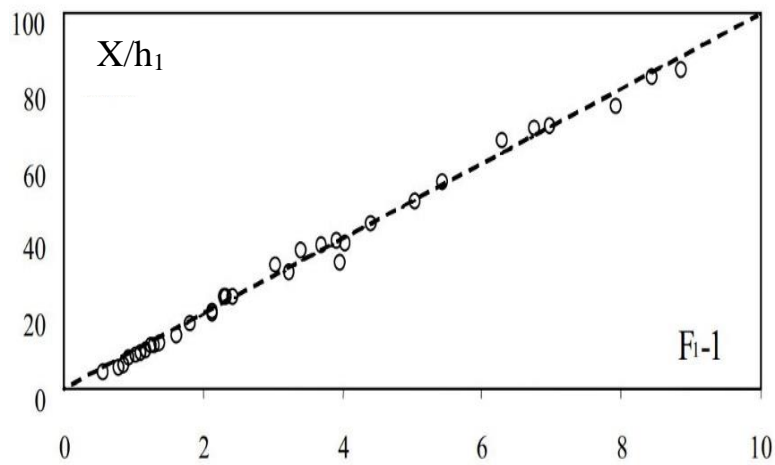


Figure 2.12 : Variation expérimentale de la position relative X/h_1 du seuil à paroi mince en fonction de $(F_1 - 1)$ lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ($X \cong Lj$).
(- - -) courbe tracée selon la relation (8).

2.3 CONCLUSION

Le ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince dans un canal rectangulaire a été expérimentalement testé. Lorsque le seuil est placé à une distance X environ égale à la longueur L_r du ressaut, l'analyse des mesures expérimentales a montré que la hauteur relative S du seuil est telle que $S = C_o \cdot (F_1 - 1)^{5/4}$. Le paramètre C_o est linéairement dépendant de la position relative X/h_2 du seuil.

Pour le cas d'un seuil dénoyé placé à une distance X environ égale à la longueur L_j , du ressaut, l'étude a pu définir les fonctions $\xi(Y, S) = 0$ et $\zeta(F_1, S) = 0$, ainsi que la position relative X/h_1 du seuil nécessaire à la formation complète du ressaut.

Chapitre III:

Ressaut hydraulique dans un canal
rectangulaire de forme composée

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 (Bousmar et al. 2005). Ces deux phénomènes, se manifestant de différentes façons, sont des sources de dissipation d'énergie supplémentaire de l'écoulement. Il peut être donc intéressant de voir la grandeur de ces dissipations dans le cas où il se produit un ressaut hydraulique dans le lit composé. Il est plus intéressant d'autant.

plus que le ressaut hydraulique est utilisé justement pour la dissipation d'énergie. Cette dissipation supplémentaire est donc la bienvenue. En s'inspirant du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, une approche théorique est proposée dans ce présent travail pour déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en lit composé. Le rendement du ressaut est lui aussi quantifié. Toutes les équations sont présentées en termes adimensionnels afin de leur donner un caractère de validité général.

APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR (2000)

3.2 Rapporte des hauteurs conjuguées

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

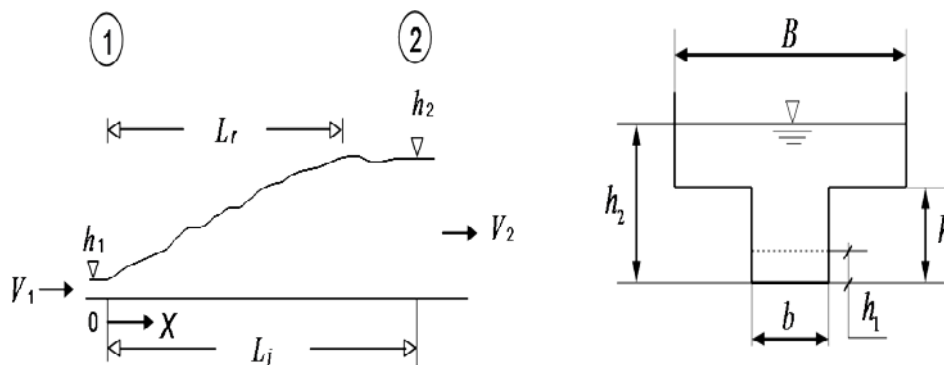


Figure 3.1 :Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit

Tableau 3.1: 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 de charge dues 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 (Bousmar 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 :

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

En s'inspirant de l'article de Achour (2000), par analogie à la relation de Borda-Carnot et à la vue de la forme de la relation 1, il paraît admissible de rajouter une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement aurait comme expression:

$$f_x = -k\varpi(h_2 - h)^x h_1^y (B-b)^z \quad (2)$$

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

$$K = \varphi(L_j \text{ ou } L_T, h_2, h_1, h).$$

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

$$\rho Q^2 (1/A_2 - 1/A_1) = f_1 - f_2 + f_x \quad (3)$$

Analysons l'équation pour la fonction $f_x = (1/2) \varpi (h_2 - h) h_1 (B - b)$:

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 section A_1 et A_2 sont données respectivement par : $A_1 = bh_1$ et $A_2 = B(h_2 - h) + bh$. Prenons comme hypothèse aussi que la distribution des pressions est hydrostatique dans les section 1 et 2 du ressaut, ce qui donne les expressions des forces :

$$f_1 = \varpi (h_1/2) bh_1 \text{ et } f_2 = \varpi (h_2 - h/2) bh + \varpi [(h_2 - h)/2] B (h_2 - h).$$

En tenant compte de toutes ces hypothèses et informations ainsi que de l'équation de continuité, $V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q$, l'équation 3 s'écrit en définitive, après réarrangement, comme suit :

$$2F_1^2 \left(\frac{\beta}{Y - (1 - \beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} - \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (4)$$

Où :
$$F_1 = Q / \sqrt{b^2 h_1^3 g} \quad (5)$$

En négligeant la force de résistance f_x , l'équation résultante aurait comme expression:

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

Les relations 3 et 4 sont des équations fonctionnelles de forme $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

Notons que les équations 4 et 6 peuvent s'écrire 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 devient 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

$$F_{1\min} = \left[\frac{1}{2\sqrt{2}} \right] \sqrt{\left(\frac{2}{\tau+1} \right)^2 - 1} \quad \text{correspondant à } h_2 = h.$$

On s'aperçoit de ces figures, que 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 .

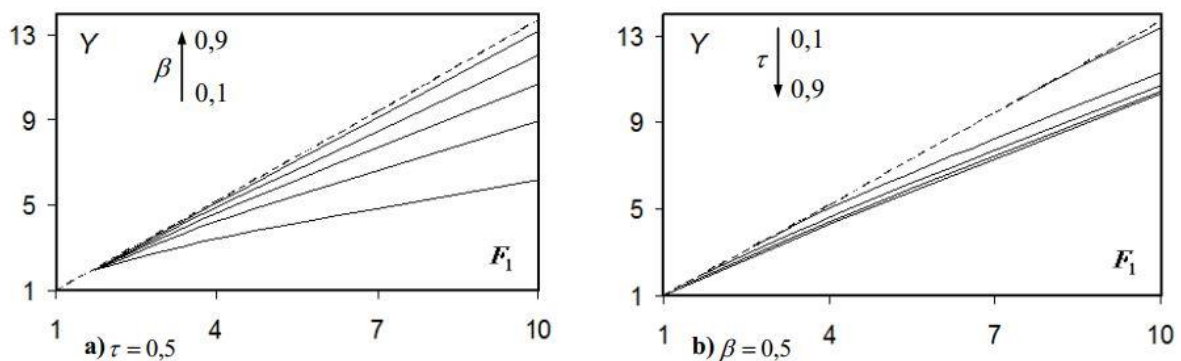


Figure 3.2 : Variation de Y , calculé par (1), en fonction de F_1 . (- - -) : $\beta = 1$

Sur la figure (3.2) nous avons représenté la variation de Y en fonction de F_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. On voit clairement que les 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.

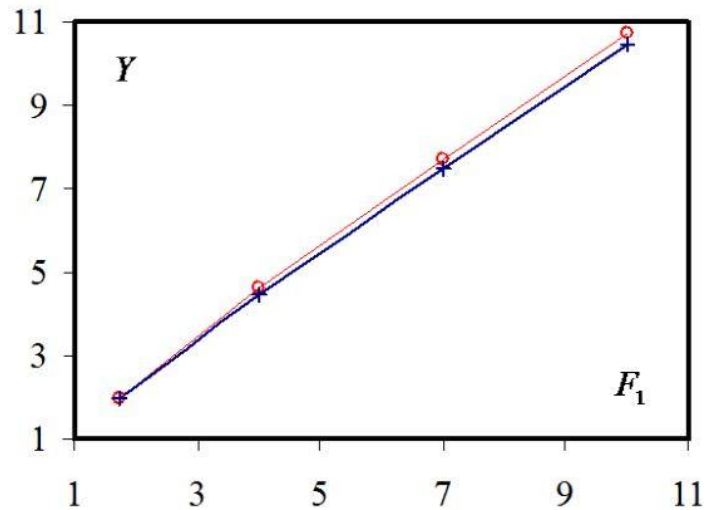


Figure 3.3 :Variation Y en fonction de F₁. (0) : équation 2, (+) : équation 1

3.3 Rendement du ressaut

En considérant les mêmes hypothèses que pour le rapport des hauteurs conjuguées, le rendement, $\eta = \Delta H / H_1$, peut s'exprimer par :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (7)$$

L'équation (7) permet le calcul, d'une manière explicite, le rendement du ressaut se produisant en lit composé droit, connaissant F₁, Y ainsi que β et τ . En considérant les valeurs de Y calculées avec la relation (6), nous avons représenté sur la figure (3.4) la variation de η en fonction de F₁. 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 F₁. pour un τ connu, en fixant F₁, η diminue avec l'augmentation de β . pour un β et un F₁ fixés, on peut aisément voir que le η augmente avec l'accroissement de τ .

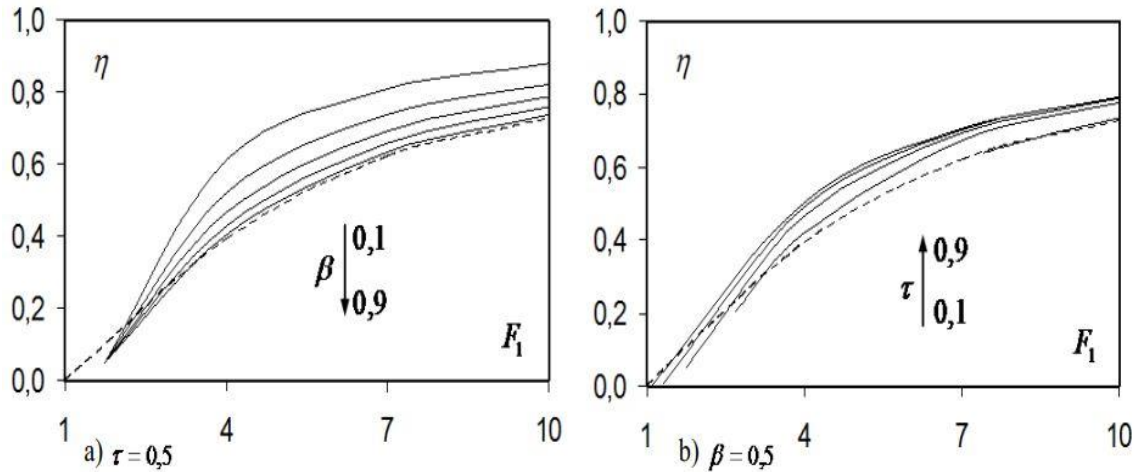


Figure 3.4 : Variation de η en fonction de F_1 . (- - -) : $\beta = 1$. η est calculé par l'équation (3).

Sur la figure (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.

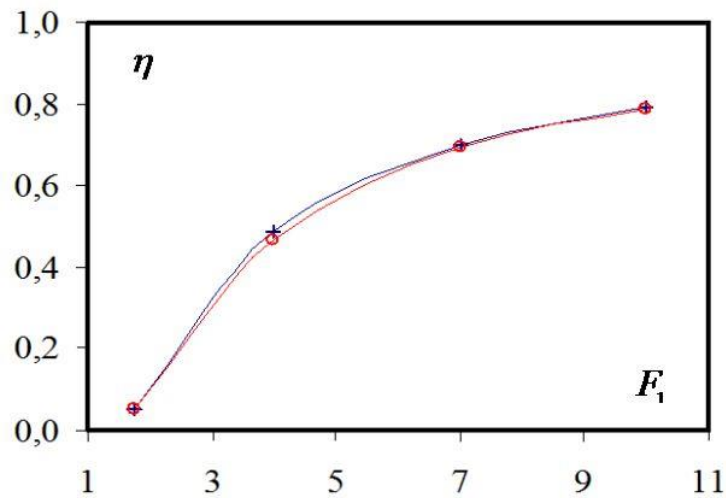


Figure 3.5 : Variation η en fonction de F_1 . (0) : équation 2, (+) : équation 1

3.4 configuration expérimentale

3.4.1 Les appareils de mesure

Des expériences ont été réalisées dans le canal composé du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA), Lyon, France. La géométrie du canal est présentée à la figure (3.6). La longueur utile L est de 8 m, la largeur totale B est de 1,2 m et la largeur de la plaine d'inondation B_f est de 0,8 m. La section transversale est asymétrique, avec une berge

verticale à l'interface entre le chenal principal et la plaine d'inondation. La banque pleine profondeur h_b est égale à 5,15 cm. Le fond est en PVC et sa pente S_0 est égale à 1,8 mm/m. Le réservoir d'entrée amont est séparé en deux réservoirs (comme le montre la figure 3.6), l'un pour la plaine d'inondation et l'autre pour le canal principal. Chaque réservoir est alimenté par une pompe indépendante et la décharge dans chaque canal est contrôlée par un débitmètre indépendant et un régulateur de décharge (régulateur PID). À la limite en aval, deux hayons indépendants, un pour chaque sous-section, sont utilisés pour un meilleur contrôle de la surface de l'eau.

Photo de l'amont

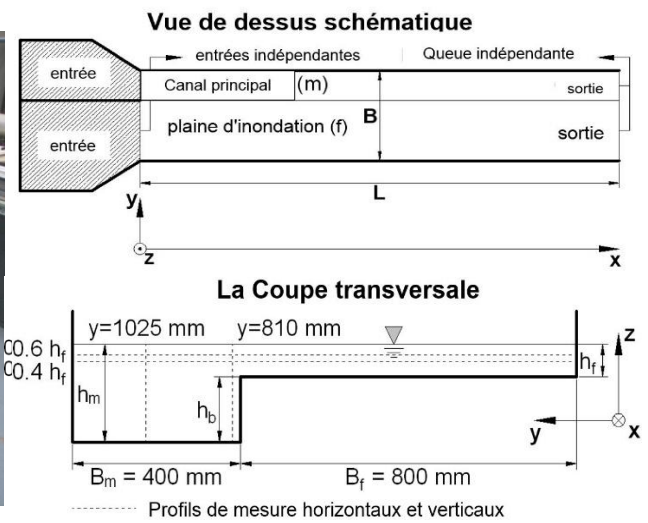


Figure 3.6 : Canal de canal composé à LMFA (le schéma n'est pas à l'échelle)

Les niveaux d'eau ont été mesurés avec une sonde à ultrasons (précision : $\pm 0,3$ mm). La vitesse a été mesurée avec une sonde de recherche latéral Vectrino + Micro-ADV 2D / 3D (Nortek). Le temps d'acquisition est de 90 s pour chaque mesure, avec une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz. Le volume d'échantillonnage est de 7 mm - long et 6 mm Diamètre du cylindre. Pour améliorer la qualité du signal, des sphères de verre creuses (10 μ m) ou des particules d'ensemencement en polyamide (20 μ m) ont été ajoutées dans l'eau.

Les appareils de mesure ont été fixés à un déplacement automatique (voir photo sur la figure 3.6).

La pente longitudinale des voies ferrées est égale à la pente du fond du canal. Les coupes transversales à $x = 2,5$ m, $x = 4,5$ m et $x = 6,5$ m ont été étudiées. Le maillage utilisé pour les mesures des niveaux d'eau consistait en 23 points sur chaque section transversale. Pour les mesures ADV, quatre profils ont été étudiés (voir Figure 3.6), deux d'entre eux étaient

horizontaux et situés à l'élévation $Z = 0.4h_f$ et $0.6h_f$ du fond de la plaine d'inondation. Les deux autres profils étaient verticaux et se situaient à $y = 810$ mm et $y = 1025$ mm

3.4.2 Conditions d'écoulement

Les 15 cas d'écoulement étudiés dans ce document sont présentés dans le tableau (3.2).

Trois flux de référence sont pris en considération.

Leurs rejets totaux sont $Q = 17,3$ L/s, $24,7$ L/s et $36,3$ L/s, correspondant à des profondeurs d'écoulement relatives $h^* = h_f / h_m = 0,2, 0,3$ et $0,4$, respectivement. Ces flux de référence sont analysés en détail dans Peltier (2011). Bien que ces écoulements ne présentent pas de variation significative de la profondeur d'écoulement et des décharges de sous-section dans le sens de l'écoulement, ils ne peuvent pas être rigoureusement considérés comme un «écoulement uniforme» sur toute la longueur du canal. Une légère évolution de la vitesse moyennée en profondeur et de la contrainte de cisaillement limite est observée en même temps que le développement de la vitesse 3D et du champ turbulent (notamment dans les 3 premiers mètres du flux).

Par conséquent, chacun de ces écoulements quasi-uniformes est considéré comme un flux de référence, à partir duquel la distribution de l'écoulement en amont à travers le canal sera modifiée pour générer un échange de masse. Comme indiqué précédemment, deux cas sont distingués: un excès et un déficit dans la décharge de la plaine inondable. La suralimentation et la sous-alimentation de la plaine inondable réduisent et augmentent, respectivement, la différence de vitesse entre les deux canaux à l'entrée (station aval $x = 0$ m), par rapport aux conditions d'écoulement de référence. Quatre types de déséquilibre dans le flux amont de la plaine sont étudiés: une variation relative de -19% , $+19\%$, $+38\%$ et $+53\%$ dans la décharge de la plaine d'inondation par rapport à Q_f dans des conditions de débit de référence Q .

Tableau 3.2 :condition d'écoulement

Variation en amont écoulement de la plaine d'inondation ⁽¹⁾ (%)	Décharge totale Q (L/s)	Décharge de plaine d'inondation Q _f (L/s)	Décharge du canal principal Q _m (L/s)	Profondeur relative h* ⁽²⁾
-19	17.3	1.93	15.36	0.2
0 (référence d'écoulement)		2.38	14.91	
+19		2.83	14.46	
+38		3.28	14.00	
+53		3.64	13.65	
-19	24.7	5.08	19.61	0.3
0 (référence d'écoulement)		6.27	18.42	
+19		7.46	17.23	
+38		8.65	16.04	
+53		9.59	15.10	
-19	36.3	11.42	24.87	0.4
0 (référence d'écoulement)		14.1	22.2	
+19		16.78	19.52	
+38		19.46	16.84	
+53		21.57	14.73	

⁽¹⁾ Pourcentage de variation du débit de la plaine inondable en amont par rapport aux conditions d'écoulement de référence.

⁽²⁾ Pour le référence d'écoulement uniquement, valeur approximative pour les cas d'écoulement avec déséquilibre en amont.

3.5 Résultats expérimentaux et discussion

3.5.1 Niveau d'eau

La distribution latérale du niveau d'eau Z est présentée à la figure (3.7) pour la plus petite décharge $Q = 17,3 \text{ L / s}$. La question abordée dans cette partie est la suivante: étant donné un rejet total Q et une station x, quelle est la variation du niveau d'eau lorsque la distribution latérale de la vitesse d'écoulement varie à la limite amont?

Comme le montre la figure (3.7), le niveau d'eau dans la section augmente du cas d'écoulement "-19%" au cas d'écoulement "+ 53%" pour un débit total fixe $Q = 17,3 \text{ L/s}$ et à

une station x donnée. Ceci est particulièrement marqué dans la partie amont du canal à $x = 2,5$ m. Un comportement similaire a été observé pour les autres rejets (23,7 L/s et 36,3 L/s). En outre, compte tenu d'une station x , la différence absolue de niveau d'eau entre les deux cas extrêmes ("-19%" et "+53%") augmente avec la décharge totale Q .

Dans chaque section, réduire la différence de vitesse entre le chenal principal et la plaine d'inondation entraîne une augmentation de la profondeur de l'eau pour un débit total fixe.

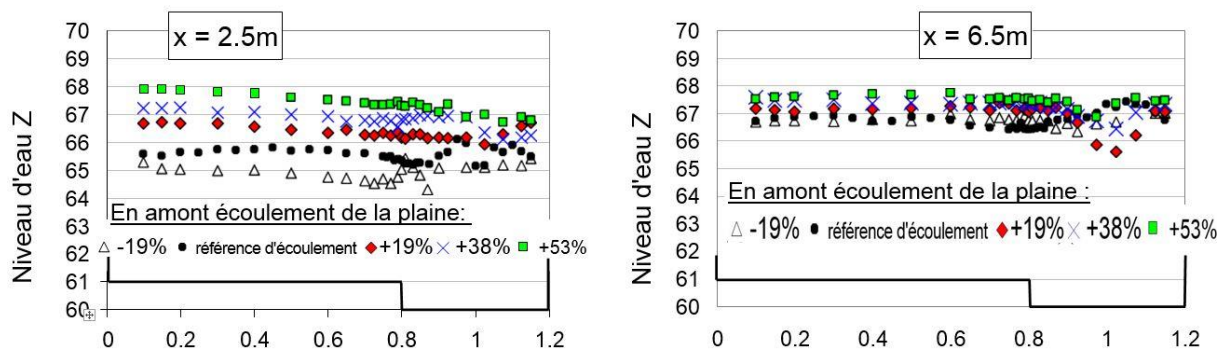


Figure 3.7 : Niveau d'eau Z mesuré à partir du bas du canal principal. Débit $Q = 17,3$ L/s les conditions d'écoulement données dans la légende sont résumées dans le tableau (3.2).

3.5.2 Profils latéraux de la vitesse d'écoulement et du contrainte de Reynolds

La variation latérale de la vitesse moyenne du courant u et de la contrainte de Reynolds $\tau_{xy} = -\rho u'v'$ est présenté en figure (3.8) pour les 15 cas d'écoulement présentés dans le tableau (3.2).

Les mesures ont été effectuées à la station aval $x = 4,5$ m, le long d'un profil horizontal pris à 60% ($Z = 0.6 h_f$) de la profondeur d'écoulement de la plaine inondable (voir figure 3.6).

Compte tenu d'un déséquilibre en amont, les profils latéraux de la vitesse du courant montrent que le débit est de plus en plus déstabilisé par rapport au flux de référence, lorsque le débit total passe de 17,3 L/s à 36,3 L/s. Près de l'interface entre le canal principal et la plaine d'inondation, le gradient latéral local de la vitesse du courant du/dy est toujours positif pour le débit $Q = 17,3$ L/s et 24,7 L/s. Pour le débit total plus élevé, du/dy est positif ou négatif lorsque la plaine inondable est suralimentée (cas d'écoulement +19%, +38%, +53%). Pour les trois cas d'écoulement précédents, des valeurs négatives de contrainte de cisaillement sont observées du/dy est également négatif, indiquant un lien fort entre le champ de vitesse moyen local et la turbulence.

En augmentant la suralimentation de la plaine d'inondation (de + 19% à + 53%), l'étalement latéral de la couche de cisaillement diminue du côté de la plaine d'inondation pour tous les rejets totaux. Néanmoins, les valeurs maximales de τ_{xy} sont observées à proximité de l'interface pour tous les cas de flux.

Pour aller plus loin dans l'étude de la position et de la valeur de la contrainte de cisaillement maximum, un zoom de la couche de cisaillement est présenté sur la figure (3.7), pour décharge $Q = 24,7 \text{ L/s}$ à deux altitudes différentes: $Z = 0.6 h_f$ et $Z = 0.4 h_f$ (voir la figure 3.6). Le pic de contrainte de cisaillement diminue et se déplace de plus en plus vers le canal principal, en augmentant la suralimentation de la plaine d'inondation de + 19% à + 53%. Cela indique un lien fort entre la distribution de la vitesse en amont et le développement de la turbulence à 4,5 m en aval.

En comparant les deux élévations $0.6 h_f$ et $0.4 h_f$, la forme et la magnitude sont similaires. Cela suggère que le lien entre le transfert de masse et la turbulence est présent dans la majeure partie de la profondeur d'écoulement ($Z \geq 0,4h_f$). Contrairement à la plaine inondable, l'étalement latéral de la couche de cisaillement dans le canal principal est plutôt constant, indiquant que le flux primaire dans le canal principal "bloque" l'étalement latéral de la couche de mélange.

L'analyse de la vitesse dans le sens de l'axe Y permet une étude plus poussée du transfert de masse provenant de l'amont. La figure (3.8) présente à la fois la variation latérale de la vitesse axiale v et un zoom sur la couche de cisaillement pour la décharge la plus élevée. La distribution latérale de la composante V indique que le transfert de masse se produit encore à la station $x = 4,5 \text{ m}$. L'effet du déséquilibre en amont est plus prononcé dans la plaine inondable. En comparant la distribution latérale de la vitesse axiale avec les contraintes de Reynolds, on peut conclure que la grandeur de la première influence la forme de cette dernière. De la figure (3.8) à la figure (3.10), on peut conclure que: a) pour une décharge totale donnée, une augmentation du transfert de masse induit une diminution de la contrainte de cisaillement turbulente; et b) en augmentant la décharge totale Q (c'est-à-dire la profondeur relative moyenne), l'effet du transfert de masse sur la couche de cisaillement turbulente est de plus en plus significatif. Pour la plus petite décharge, le transfert de masse latéral n'est pas assez fort pour décaler le pic de contrainte de cisaillement et pour modifier la forme classique de la couche de cisaillement.

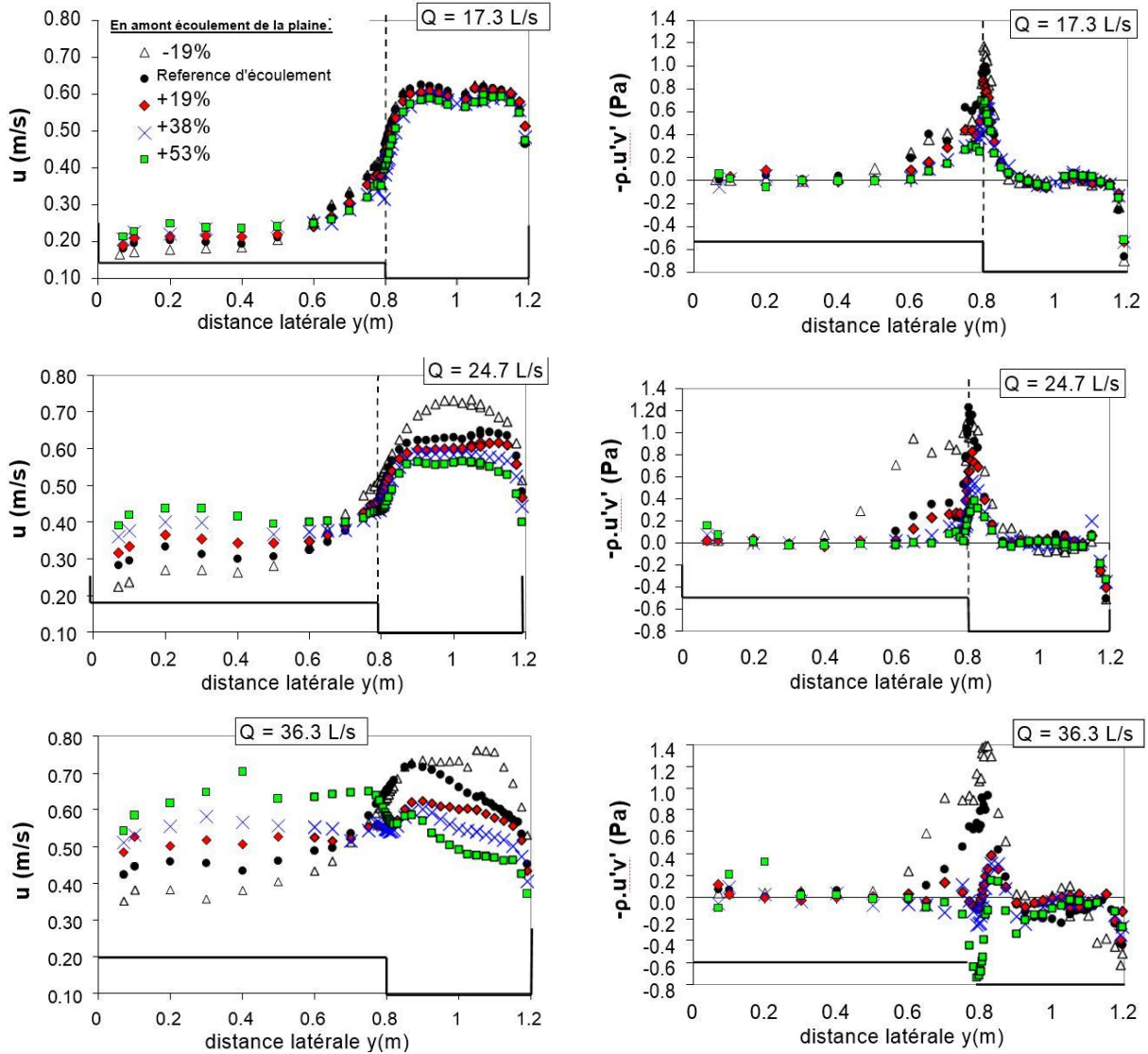


Figure 3.8 : Vitesse moyennes u et Reynolds de contrainte τ_{xy} vs distance latérale.

Profil horizontal à l'élévation $Z = 0.6 h_f$. Station aval $x = 4,5$ m

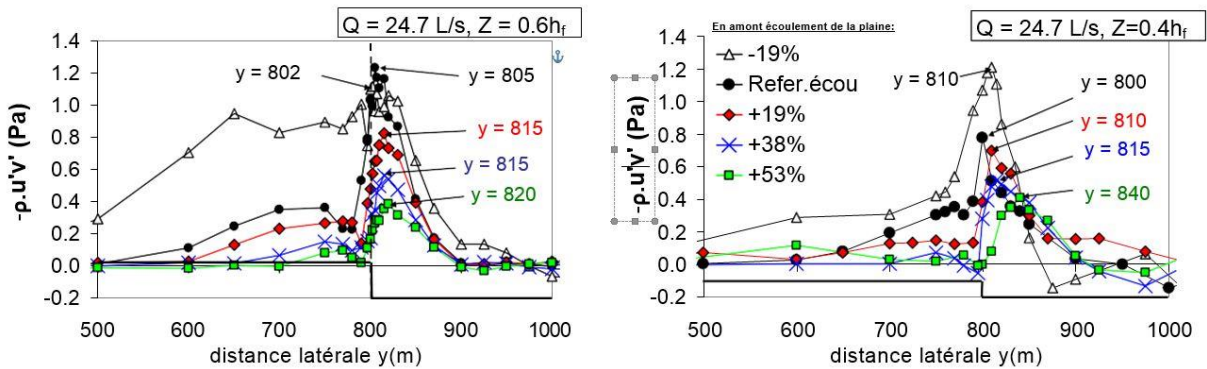


Figure 3.9 : Position des pics de la contrainte de Reynolds τ_{xy} pour le débit

$Q = 24,7$ L/s, à deux altitudes différentes: $Z = 0.6 h_f$ et $0.4 h_f$

Si l'on considère la sous-alimentation de la plaine d'inondation (-19%), on observe le phénomène inverse: le déficit du débit de la plaine inondable en amont améliore l'échange de turbulence. L'étalement latéral de la couche de cisaillement sur la plaine d'inondation et l'amplitude de la contrainte de cisaillement sont plus élevés par rapport aux cas de flux de référence. Aucune tendance claire n'a été trouvée dans le déplacement du pic de contrainte de cisaillement.

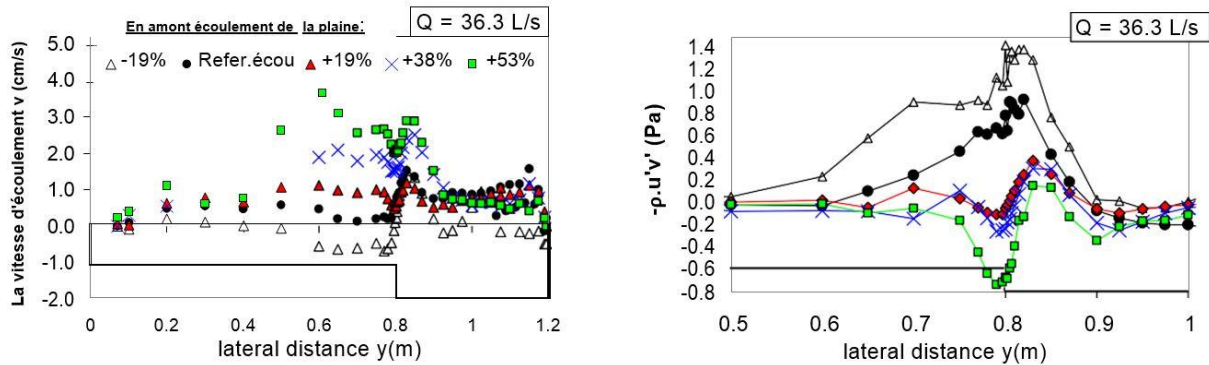


Figure 3.10 : Vitesse envargure v et contrainte de Reynolds τ_{xy} à l'élévation $0.6h_f$ pour le débit $Q = 36,3$ L/s et station aval $x = 4,5$ m

3.5.3 Profils verticaux de la vitesse d'écoulement et des contraintes de Reynolds

Des profils verticaux des deux vitesses de flux u et Reynolds τ_{xy} et τ_{yx} ont été effectués pour chaque condition d'écoulement à deux positions latérales dans le canal principal (voir Figure 3.6): 1 cm loin de l'interface avec la plaine d'inondation ($y = 810$ mm) et près du centre du canal principal ($y = 1025$ mm).

La figure (3.11) présente les vitesses d'écoulement u (z). En cas de décharge totale, la vitesse diminue lorsque le débit de la plaine inondable en amont augmente aux deux positions latérales. Près de l'interface (figure 3.11.a), le profil de vitesse a une «forme en S» pour la décharge supérieure $Q = 36,3$ L/s pour le débit de référence et les écoulements non uniformes. Juste au-dessus du niveau de la banque, un minimum local de la vitesse est observé. Une "forme en S" similaire a été obtenue pour le débit moyen, $Q = 24,7$ L/s (non représenté ici).

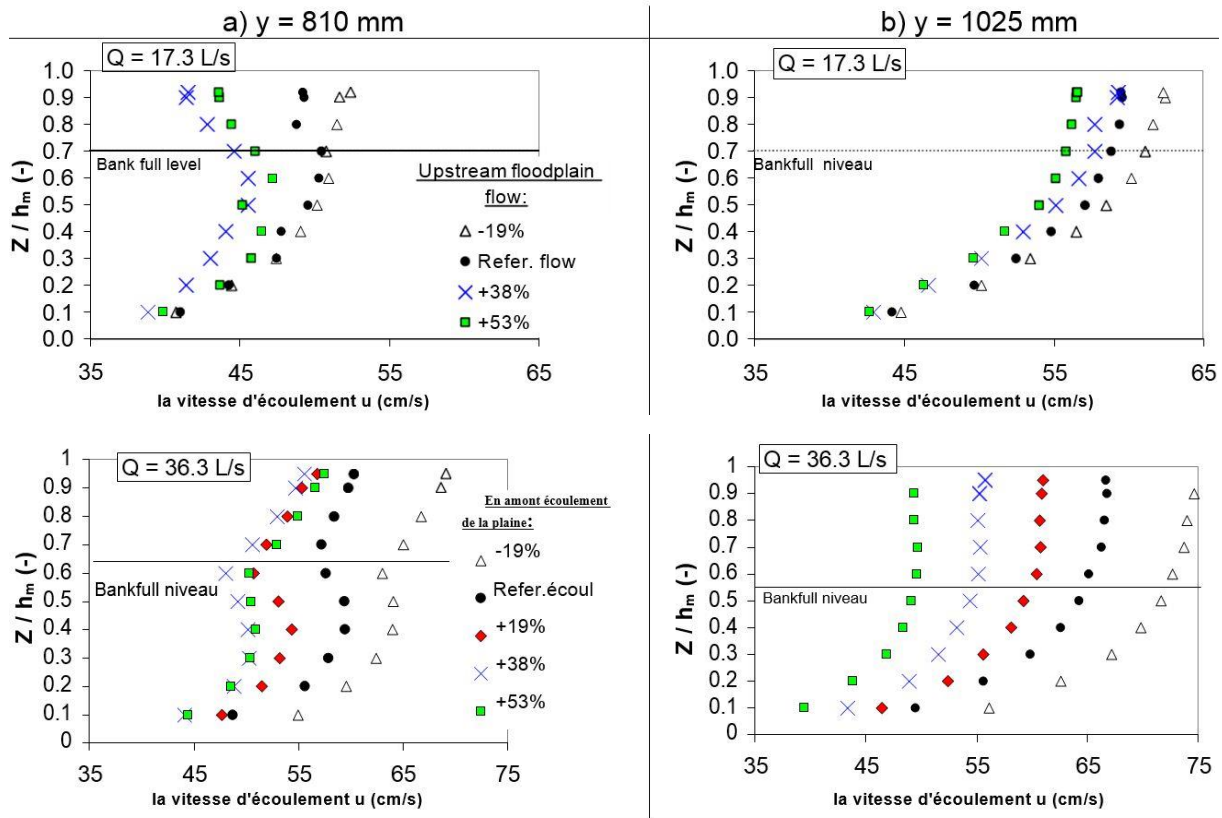


Figure 3.11 : Profils verticaux de la vitesse d'écoulement en continu u à deux positions latérales dans le canal principal: a) $y = 810$ mm et b) $y = 1025$ mm Station aval $x = 4,5$ m

Pour le débit faible, la profondeur de l'eau est trop petite pour obtenir une «forme en S» complète au-dessus du niveau de la berge. Près du centre du canal principal (figure 3.11.b), la forme est plus proche d'un profil du débit total et le cas d'écoulement, car le flux de la plaine d'inondation a moins d'influence à cet endroit. En comparant les cas d'écoulement, nous observons des profils de vitesse à la fois décélérés et accélérés pour la suralimentation et la sous-alimentation de la plaine inondable, respectivement.

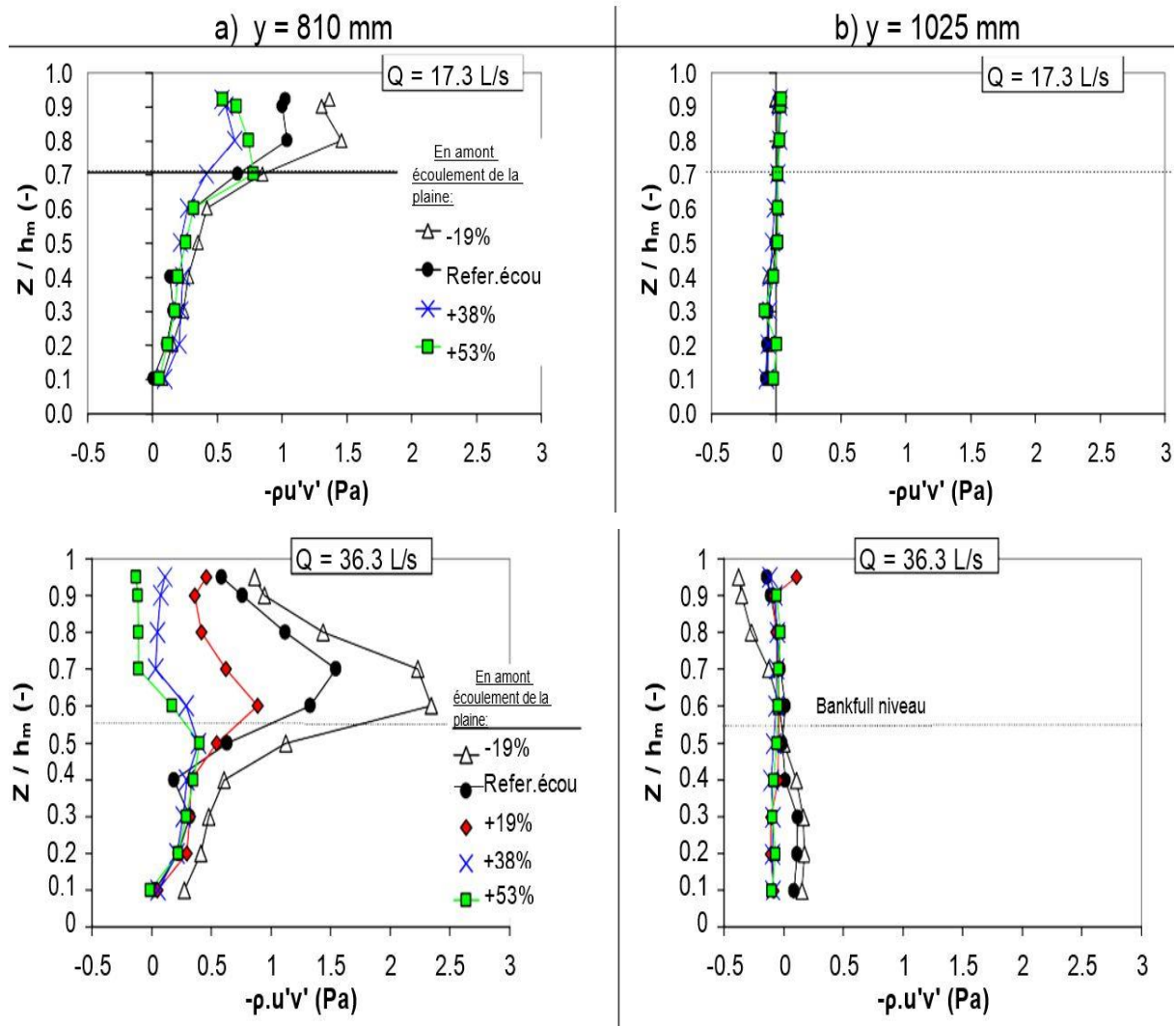


Figure 3.12 : Profils verticaux de la contrainte de Reynolds τ_{xy} à deux positions latérales dans le canal principal: a) $y = 810$ mm et b) $y = 1025$ mm .Station aval $x = 4,5$ m

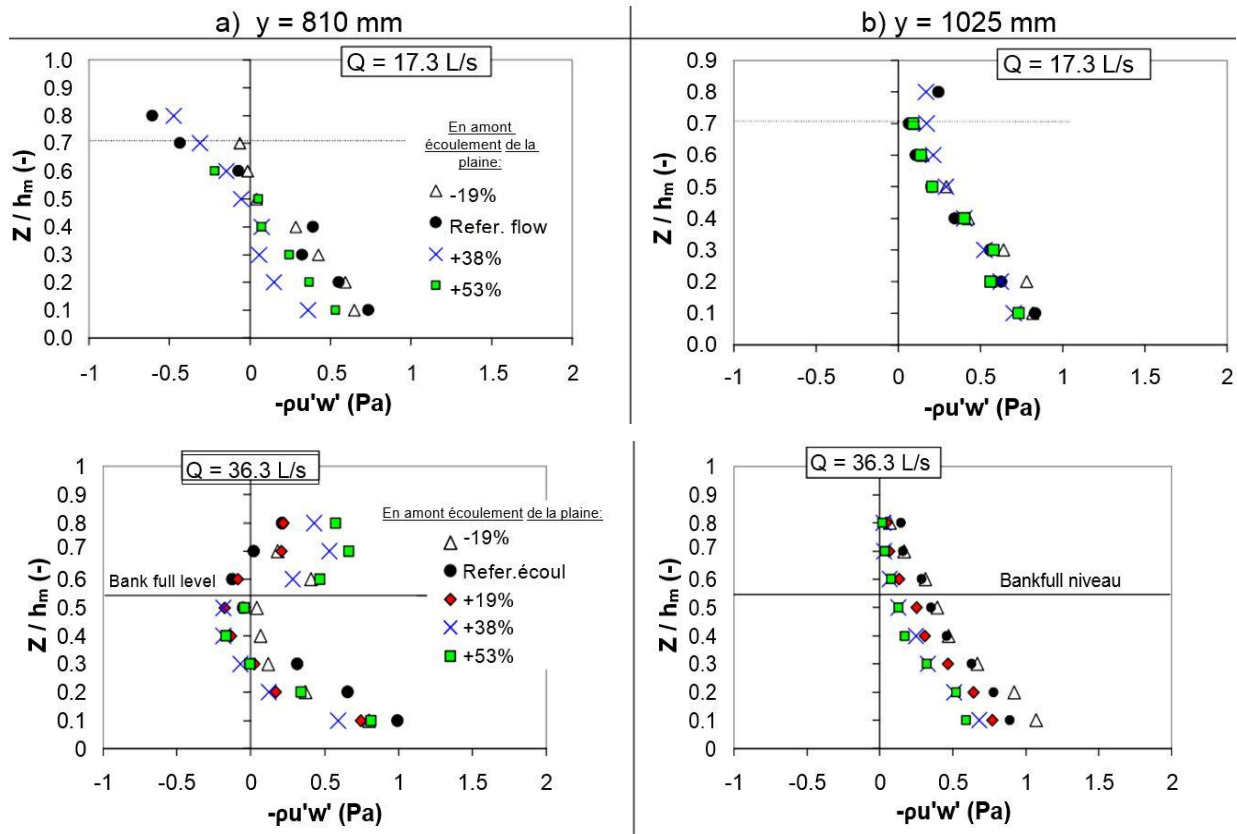


Figure 3.13 : Profils verticaux de la contrainte de Reynolds τ_{xy} à deux positions latérales dans le canal principal: a) $y = 810$ mm et b) $y = 1025$ mm .Station aval $x = 4,5$ m

La figure (3.12) présente la contrainte de cisaillement $\tau_{xy}(z)$. De même que pour les profils transversaux, les valeurs de la contrainte de Reynolds près de l'interface diminuent lors de la remontée du flux de la plaine inondable en amont. Ceci est particulièrement marqué au-dessus du niveau d'abondance où les écarts entre les cas d'écoulement sont plus élevés, soulignant l'interaction plus grande entre le transfert de masse et la turbulence dans cette région. Les résultats confirment ce qui a été observé dans les profils horizontaux, c'est-à-dire que le transfert de masse peut augmenter ou diminuer la turbulence en fonction de la direction de l'échange latéral.

Pour tous les cas d'écoulement, la valeur maximale de la contrainte de Reynolds τ_{xy} est principalement située juste au-dessus du niveau complet de la banque. Pour les deux décharges totales supérieures, une "forme en D" du profil a été observée. Au centre du canal principal, des contraintes de cisaillement négligeables ont été mesurées comme le montre la (figure 3.12.b).

Les contraintes de Reynolds $\tau_{xy} = -\rho u'w'$ présenté à la figure (3.13) peut être comparé avec le flux la vitesse u sur la figure (3.13). Près de l'interface, les valeurs négatives de τ_{xy} sont associées aux valeurs négatives du gradient du u / dz pour tous les cas de flux. Pour les deux décharges supérieures, un profil en "C" a été obtenu en relation étroite avec le profil en "S" de la figure (3.13). Au centre du canal principal (figure 3.13.b), des profils linéaires typiques sont obtenus

3.6 CONCLUSION

L'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal composé droit à aboutit a une équation fonctionnelle de forme $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

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 hauteurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapprochées de la réalité.

Afin de trouver l'expression définitive de cette force de résistance, étroitement liée au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures, sur modèle réduit au laboratoire, sont indispensables.

CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

A travers cette partie bibliographique, nous avons essayé de présenter les travaux les plus importants, au regard de notre mémoire, relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans les canaux prismatiques, à parois lisses.

Ce premier chapitre a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire. Nous avons examiné les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut.

En ce qui concerne le second chapitre on a traité le ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince dans un canal rectangulaire a été expérimentalement testé. Lorsque le seuil est placé à une distance X environ égale à la longueur L_r du ressaut, l'analyse des mesures expérimentales a montré que la hauteur relative S du seuil est telle que :

$S = C_o \cdot (F_1 - 1)^{5/4}$. Le paramètre C_o est linéairement dépendant de la position relative X/h_2 du seuil.

Pour le cas d'un seuil dénoyé placé à une distance X environ égale à la longueur L_j du ressaut, l'étude a pu définir les fonctions $\xi(Y, S) = 0$ et $\zeta(F_1, S) = 0$, ainsi que la position relative X/h_1 du seuil nécessaire à la formation complète du ressaut.

Une nouvelle approche théorique du ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse a été proposée pour le cas d'un écoulement incident généré par la mise en place d'un déversoir. Le développement théorique a montré, à travers une relation cependant implicite, que le nombre de Froude F_1 était lié à la hauteur géométrique du déversoir et du seuil. Une étude détaillée de la fonction obtenue a permis de conclure que celle-ci était involutive et une excellente relation approchée a été proposée.

Pour le dernier chapitre 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 $\phi (F_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

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 hauteurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapprochées de la réalité.

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*) pendant notre stage à la durée (*Mars 2018*).

Notre étude, concernera notre propre contribution à la contribution d'étude de l'approche expérimentale de la hauteur relative du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée,

Cette étude a pour objectif d'analyser et de déterminer les caractéristiques essentielles intervenant dans le ressaut hydraulique évoluant dans le canal rectangulaire de section composée. Ces caractéristiques sont formulées sous forme de rapport adimensionnel, permettant ainsi une meilleure utilisation dans le domaine pratique. Ces dernières sont étroitement liées au dimensionnement du bassin d'amortissement.

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

Le **cinquième chapitre** aura pour but d'examiner expérimentalement le ressaut hydraulique évoluant dans un rectangulaire de section composée et de trouver également des relations adimensionnelles régissant ce type du ressaut.

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire en lit composé à pente nulle. 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 : $2 < F_1 < 11$.

Chapitre IV:

Description du model experimental

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.

4.1.1 DESCRIPTION DU CANAL

Les expériences ont été conduites dans un canal à surface libre représenté sur la figure (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 (4.6), 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 a 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.

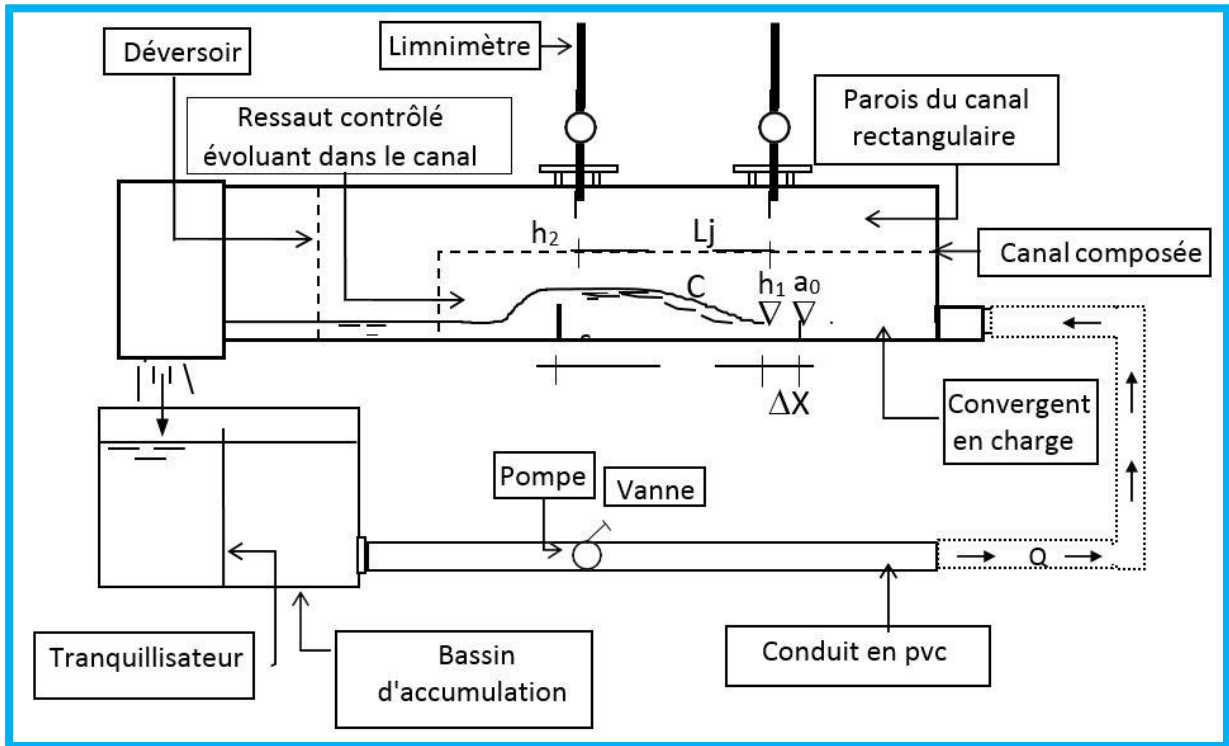


Figure 4.1 : Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composé



Photo 4.2 : Photographie du modèle expérimental du canal



Photo 4.3 : Pompe centrifuge axial



Photo 4.4 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit

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



Photo 4.5 : Section de contrôle



Photo 4.6 : Photographie de convergent



Photo 4.7 : Photographie d'une boîte en charge

4.2 Limmimètre:

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 figure (4.8).

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.

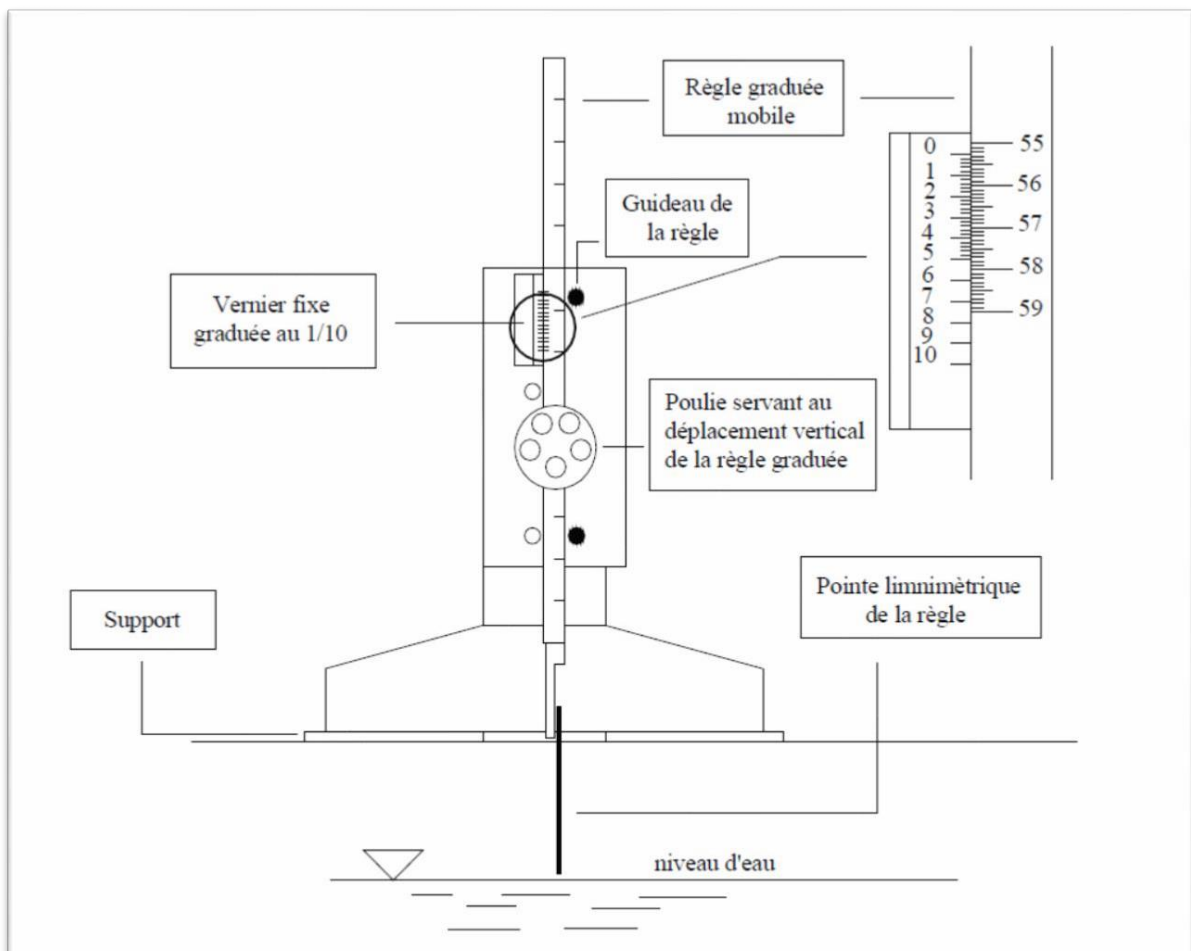


Figure 4.8 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique

4.3 Le seuil 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 (4.9) :

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

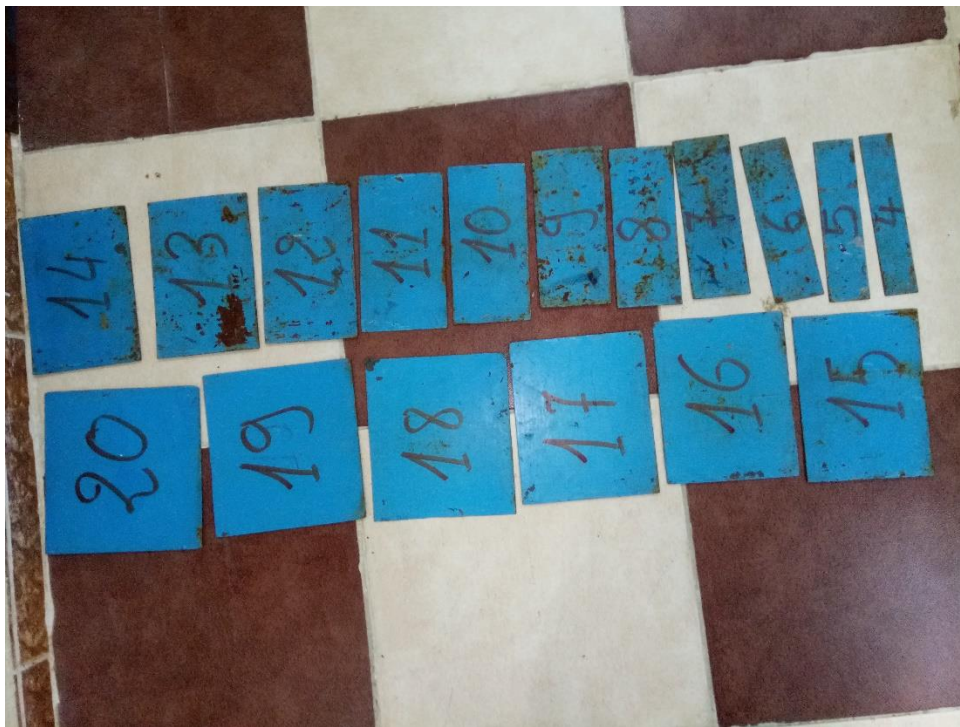


Photo 4.9 : Photographie des seuils minces testés



Photo 4.10 : La vanne

4.4 Les ouvertures:

Les ouvertures utilisées dans notre dispositif expérimental, sont façonnées de fer en forme rectangulaire.

L'objectif de l'utilisation des ouvertures est de contrôler le débit d'entrer nous avons préparé 05 ouvertures de différentes hauteurs photo (4.11) : $s = 2 \text{ cm}$; 2.5 cm ; 3 cm ; 3.5 cm ; 4 cm .



Photo 4.11 : Les ouvertures

4.5 CONCLUSION

Nous avons consacré ce chapitre à l'étude du modèle expérimental, qui a servi de base dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal à section rectangulaire composée, muni d'un seuil. Dans ce 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.

Chapitre V:

Etude expérimentale

5.1 INTRODUCTION

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire en lit composé à pente nulle. 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 : $2 < F_1 < 11$

5.1.1 Détermination expérimentale de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en lit composé

Les caractéristiques adimensionnelles essentielles, intervenant au phénomène du ressaut dans un canal rectangulaire en lit composé 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 figure (5.1) montre clairement les différents paramètres qui constituent le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince.

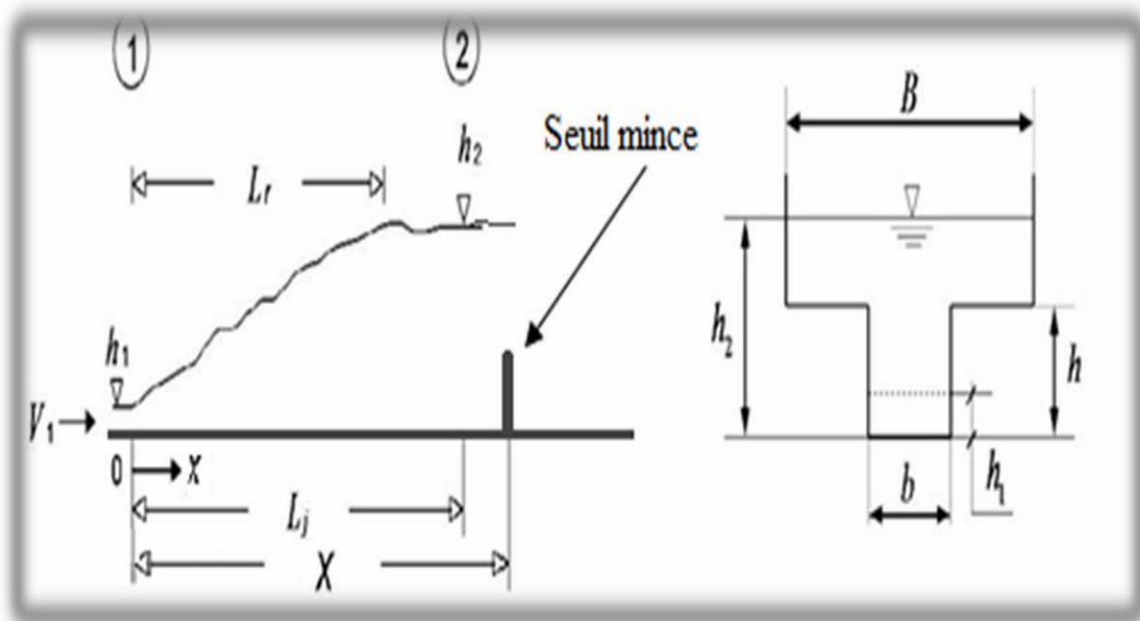


Figure 5.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince

5.1.2 Description des essais

Un échantillon constitué de plus de 92 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 de l'écoulement incident, le rapport $Y = h_2 / h_1$ du seuil

Le nombre de Froude F_1 est tel que :

$$F_r^2 = \frac{Q^2}{b^2 h_1^3 g} \quad (1)$$

Ainsi lorsque nous obtenons une configuration du ressaut contrôlé (figure 2.1), 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 . Rachedi L.2006):

$$Q = 0.3794B\sqrt{2g}\beta(1 + 0.16496\beta^{2.0716})^{3/2}h_q^{3/2} \quad (2)$$

Avec :

Q : le débit en (m^2/s).

$\beta = b / B$: Rapport de l'élargissement.

B : le lit majeur (m).

g : l'accélération de la pesanteur (m^2/s).

$\tau = h_1 / h$: Rapport des hauteurs.

h_q : La hauteur de la lame déversant en (m).

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

4. Mesure de la hauteur finale h_2 du ressaut.

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

Les représentations graphiques des points expérimentaux ci-dessous (figure 5.2 à 5.7) 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.

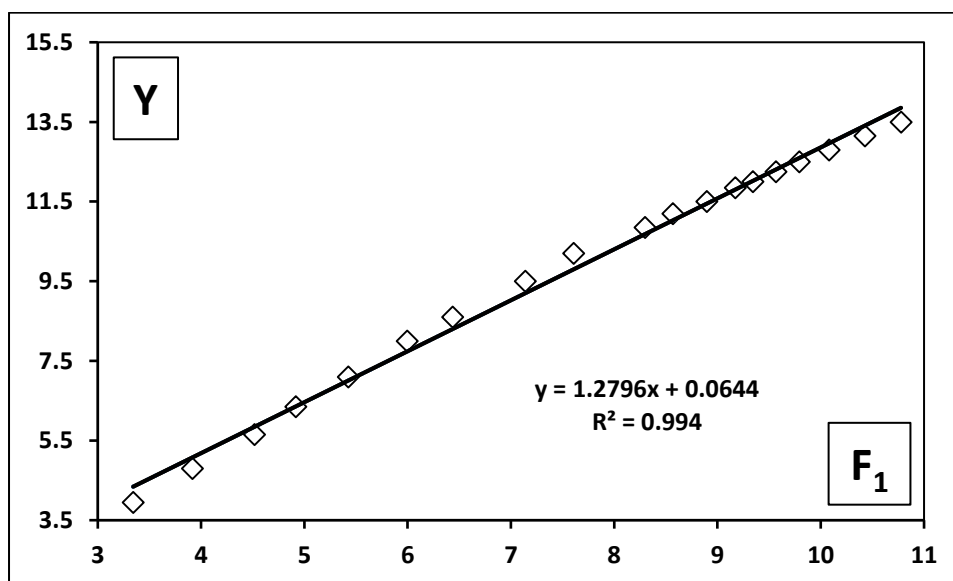


Figure 5.2 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 2$ cm (\square) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement

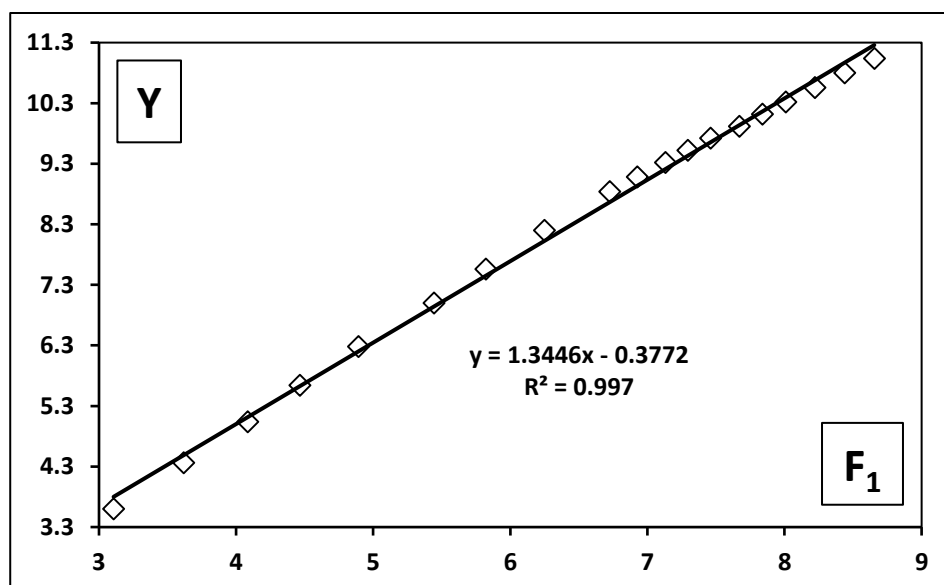


Figure 5.3 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 2.5$ cm (\square) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement

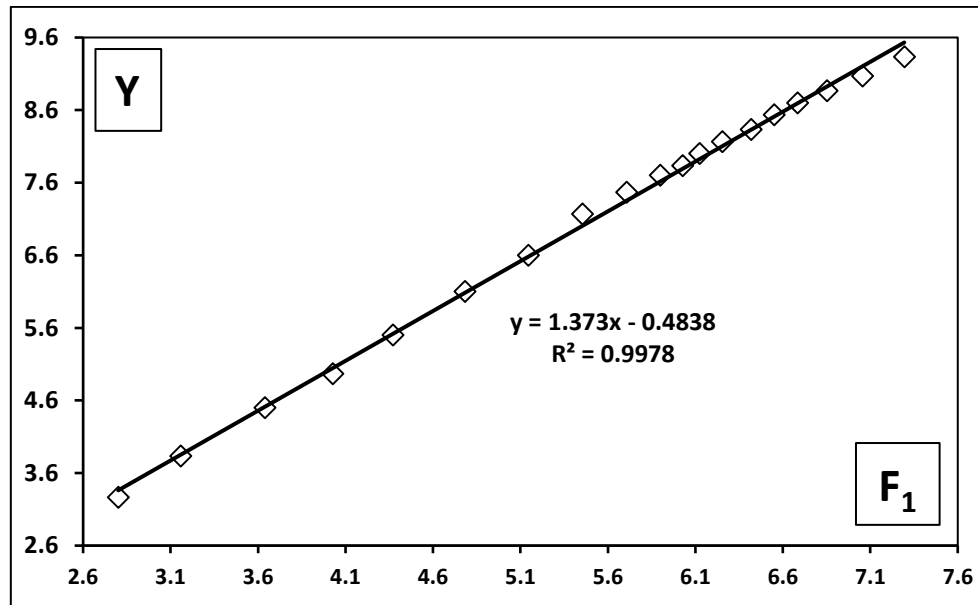


Figure 5.4 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 3$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement

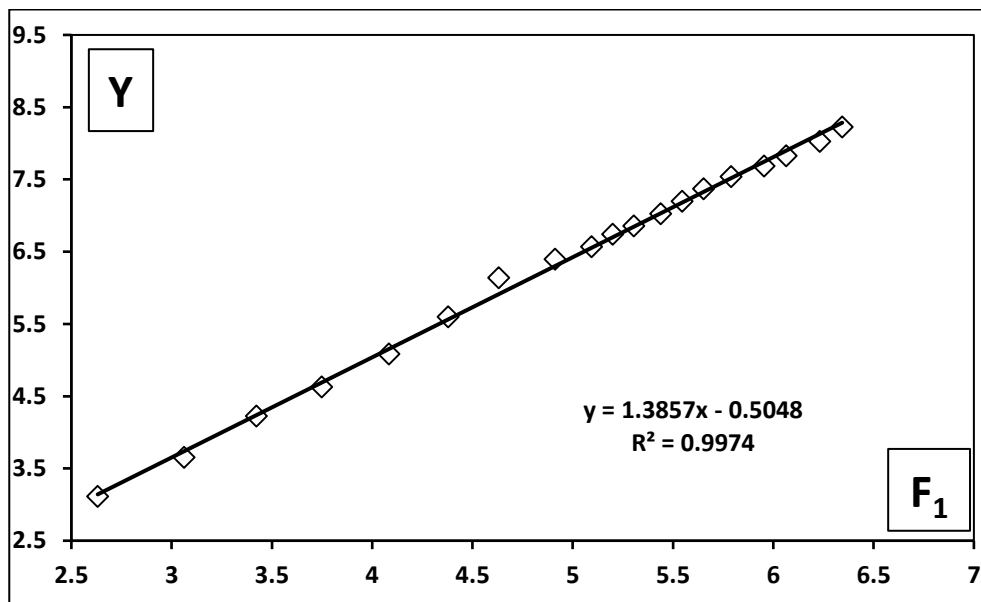


Figure 5.5 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 3.5$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement

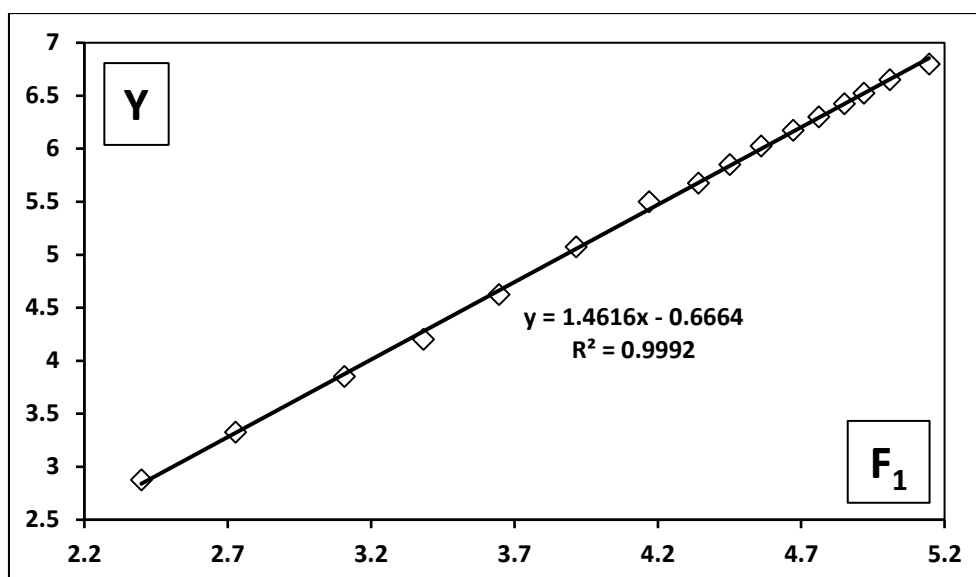


Figure 5.6 : Variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 4$ cm (□) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement

Les mesures expérimentales nous permettent de tracer les courbes ci-dessus (figure 5.2 à 5.6), 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 résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5.1 : les résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du F_1 pour chaque ouverture h_1

a	b	Equation d'ajustement	R^2
1.2796	0.0644	$Y = 1.2796 F_1 + 0.0644$	0,994
1.3446	- 0.3772	$Y = 1.3446 F_1 - 0.3772$	0,997
1.3730	- 0.4838	$Y = 1.3730 F_1 - 0.4838$	0,9978
1.3857	- 0.5048	$Y = 1.3857 F_1 - 0.5048$	0,9974
1.4616	- 0.6664	$Y = 1.4616 F_1 - 0.6664$	0,9992

D'après le tableau (5.1) ; les valeurs moyennes des A et B, $A = \sum a_i/n$, $B = \sum b_i/n$

$$A = 1.3689 \quad / \quad B = - 0.39356$$

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 :

$$Y_{relation} = 1.3689(F_1) - 0.39356 \quad (3)$$

Pour : $2 < F_1 < 11$

La représentation graphique (5.7) montre clairement que toutes les mesures expérimentales tournent autour de la première bissectrice qui fiabilisent la relation expérimentale globale obtenue (3).

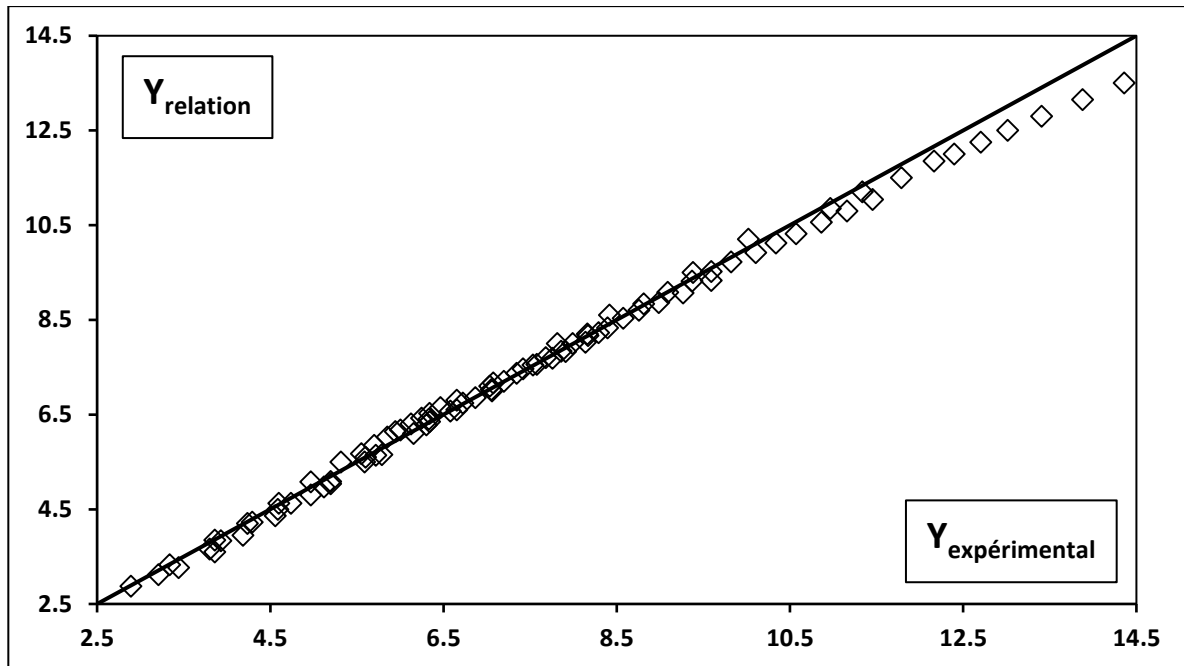


Figure 5.7 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction l'approche globale $1.3689 - 0.39356$ (\square) points expérimentaux , (—) la première bissectrice

5.3 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 :

$$\eta = \Delta h / h_1$$

$$\text{avec : } \Delta h = h_1 - h_2$$

$$\eta = \Delta h^* / h_1 = (h_1 - h_2^*) / h_1$$

Bien que la relation (4) permette le calcul explicite du rendement η , Hager et Sinniger (1986) proposent une expression approchée, applicable pour $F_1 > 2$:

$$\eta = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right)^2 \quad (4)$$

h_1 et h_2 désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut. Les représentations graphiques des points expérimentaux ci-dessous (figure 5.8 à 5.13) illustrent clairement la variation de rendement du ressaut η en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les cinq ouvertures h_1 : 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 et 4 cm.

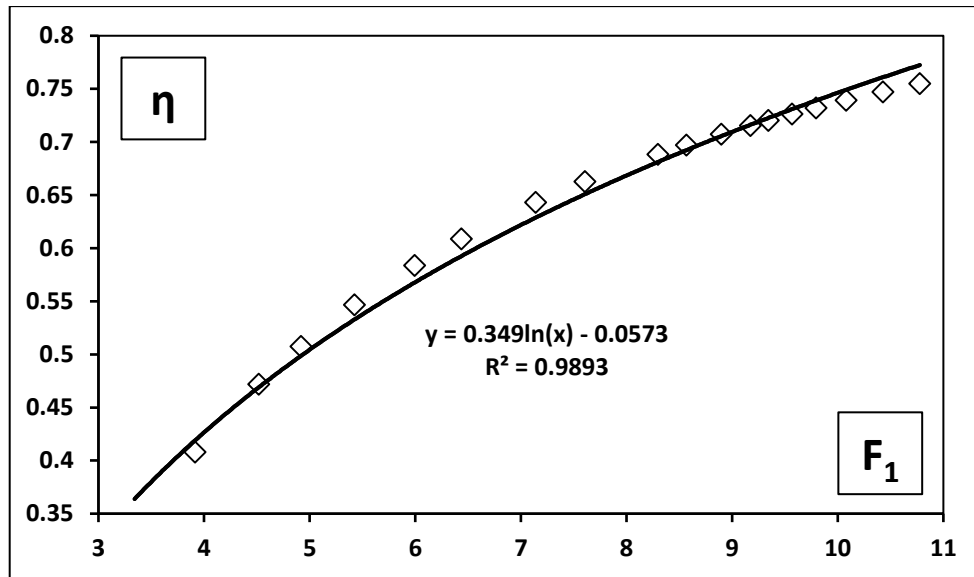


Figure 5.8 : Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 2$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement

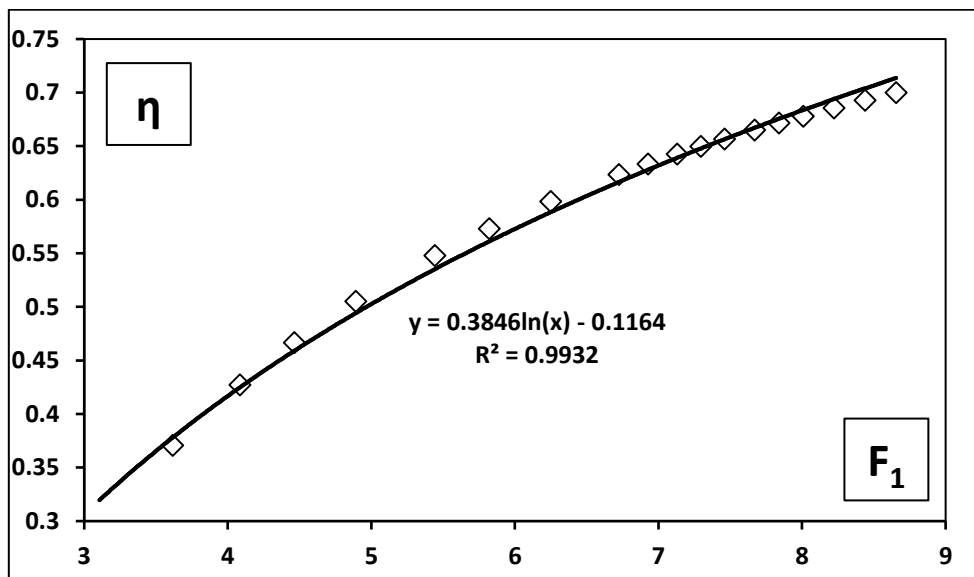


Figure 5.9 : Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 2.5$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement

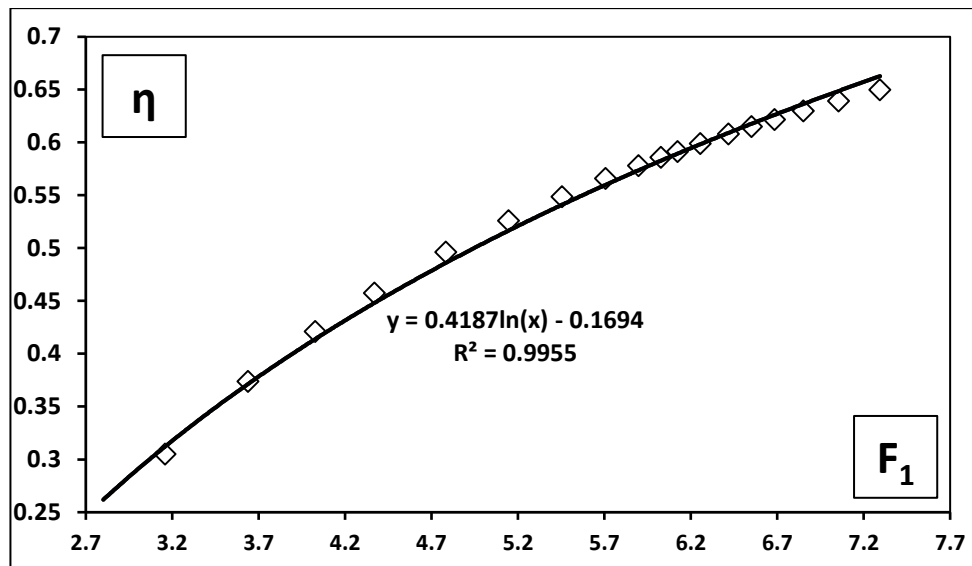


Figure 5.10 : Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 3$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement

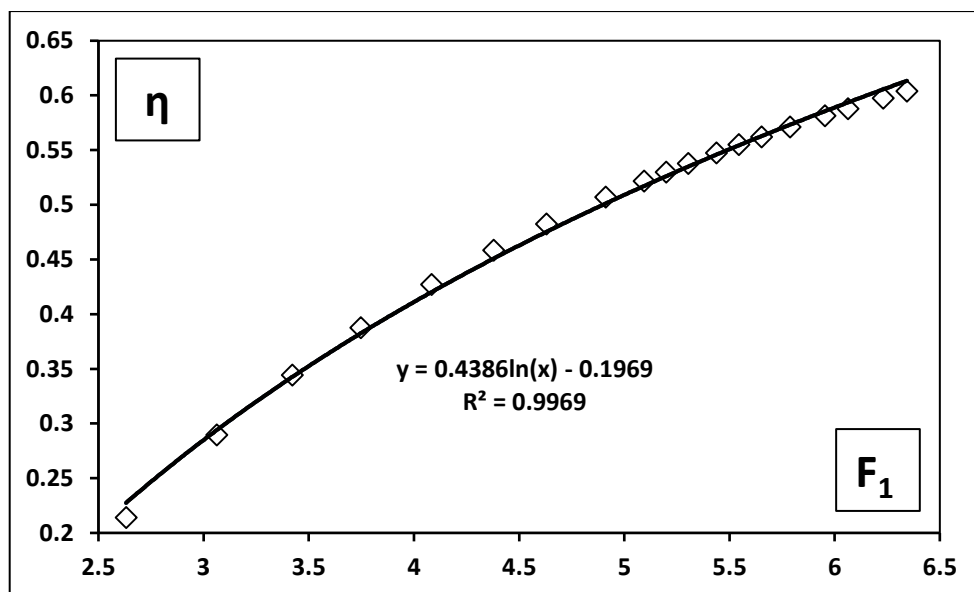


Figure 5.11 : Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 3.5$ cm (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement

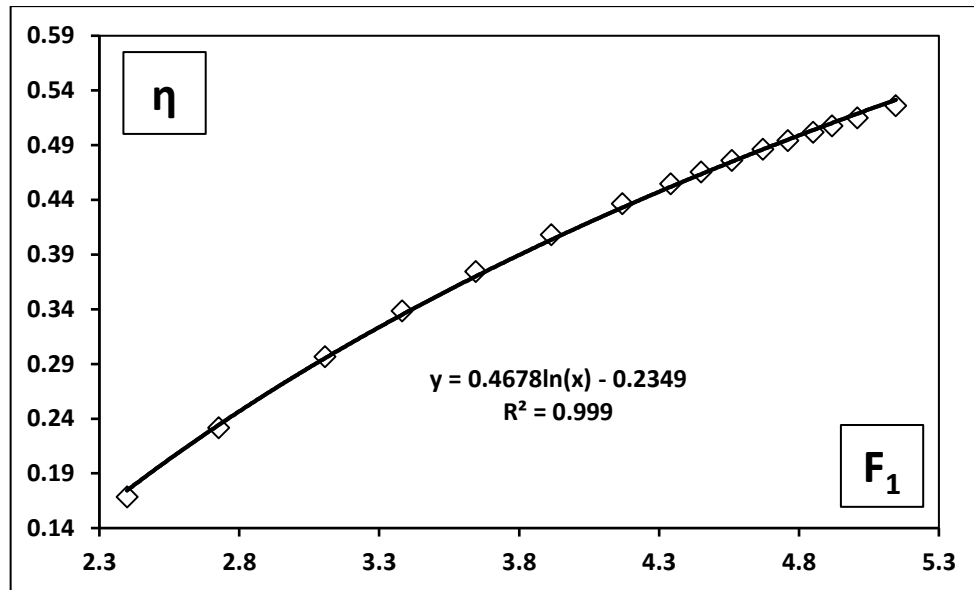


Figure 5.12 : Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour l'ouverture $h_1 = 4$ cm (□) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement

L'ajustement des mesures expérimentales des rendements variées en fonction du nombre de Froude pour différentes ouvertures est par la méthode des moindres carrés est de type logarithmique. Nous donnons des résultats qui sont mentionnés dans le tableau ci-dessous

Tableau 5.2 : les résultats expérimentaux de rendement η en fonction du F_1 pour chaque ouverture h_1 et les mesures de (h_1/B)

A_i	B_i	h_1/B	Equation d'ajustement	R^2
0.3490	-0.0573	0.03333333	$\eta = 0.349 \ln(F_1) - 0.0573$	0.9893
0.3846	-0.1164	0.04166667	$\eta = 0.3846 \ln(F_1) - 0.1164$	0.9932
0.4187	-0.1694	0.05	$\eta = 0.4187 \ln(F_1) - 0.1694$	0.9955
0.4386	-0.1969	0.05833333	$\eta = 0.4386 \ln(F_1) - 0.1969$	0.9969
0.4678	-0.2349	0.06666667	$\eta = 0.4678 \ln(F_1) - 0.2349$	0.9990

A partir de ces résultats nous avons établi une relation expérimentale qui lie tous les coefficients de a_i et b_i en fonction de la hauteur initiale relative (h_1/B)

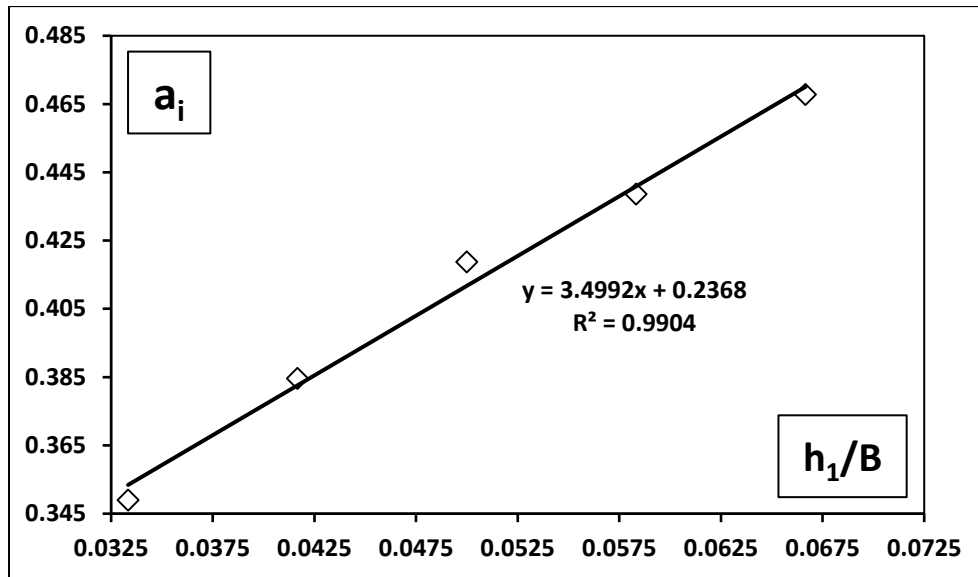


Figure 5.13 : Variation de coefficient a_i en fonction de rapport de hauteur initiale relative (h_1/B) (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement

Cette figure (5.13) mesure la variation a_i en fonction de rapport de hauteur initiale relative (h_1/B). l' ajustement nous a donnée de type linéaire $A = 3.49992 (h_1/B) + 0.2368$

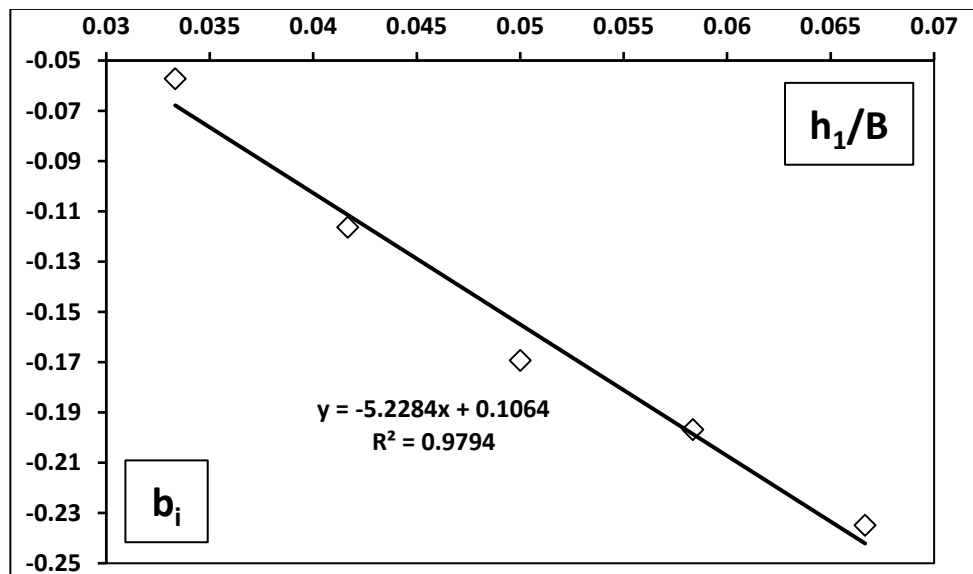


Figure 5.14 : Variation de coefficient b_i en fonction de rapport de hauteur initiale relative (h_1/B) (\square) points expérimentaux , (—) Courbes d'ajustement

Cette figure (5.14) montre la variation b_i en fonction de rapport de hauteur initiale relative (h_1/B). l' ajustement nous a donnée de type linéaire suivant $B = - 5.2284 (h_1/B) + 0.1064$

En injectant les expressions A et B dans la relation globale de forme $\eta_{\text{relation}} = A \ln (F_1) + B$, on obtient l'approche expérimentale de la relation générale suivante :

$$\eta_{\text{relation}} = [3.49992 (h_1/B) + 0.2368] \ln(F_1) + [-5.2284 (h_1/B) + 0.1064] \quad (5)$$

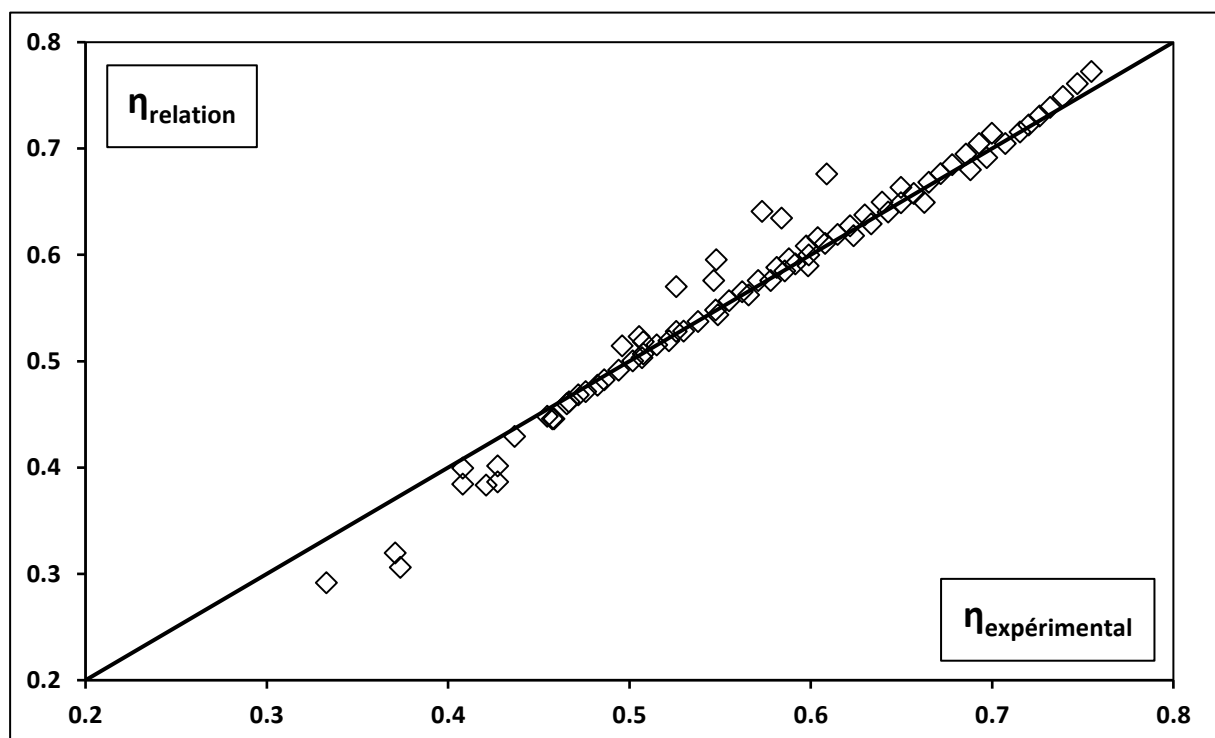


Figure 5.15 : variation du rendement η_{relation} en fonction du rendement $\eta_{\text{expérimental}}$;
 (◊) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement

Cette figure (5.15) montre la comparaison du rendement η_{relation} en fonction du rendement $\eta_{\text{expérimental}}$. On constate clairement que les mesures expérimentales dans la plus grande partie tournent autour de la première bissectrice qui justifie la fiabilité de nos mesures expérimentales obtenues au niveau du laboratoire "LARHYSS" (**BISKRA**)

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

Ce présent chapitre a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal de section droite rectangulaire en lit composé (canal prismatique), contrôlé par seuil à paroi mince

Dans un premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie par les essais. Passant en second temps aux résultats expérimentaux, qui ont été testés par dix-sept (17) seuils s des hauteurs différentes. Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue.

Concernant la relation du rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident F_1 , nous avons constaté qu'elle est linéaire de la forme $Y = A (F_1) + B$ et on a tenté de trouver une approche expérimentale globale de la deuxième hauteur conjuguée variant en fonction de nombre de Froude F_1 et que cette relation a été justifier la première bissectrice.

Aussi on a essayé de trouver une relation globale de rendement η variée en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'ouverture h_1 .

Cette relation globale obtenue justifier toutes les mesures expérimentales par la première bissectrice.

CONCLUSION DE LA PARTIE EXPERIMENTALE

Cette deuxième partie de notre étude a concerné, notre propre contribution dans l'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée par voie expérimentale.

Il a été procédé, , une analyse expérimentale permettant de trouver deux relations fonctionnelles de la forme respectivement $f(Y, F_1)$ et $f(\eta, F_1)$ pour le canal rectangulaire de section composée.

Ces deux relations permettent de trouver le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. Et aussi de du rendement en fonction du nombre de Froude incident F_1

Par ailleurs, une étude expérimentale pour les ressauts hydrauliques évoluant dans ce type de canal a été effectuée.

L'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée, a été conduite pour quelques ouvertures h_1 , l'expérimentation a été menée sous quelques ouvertures de hauteurs : $2 \text{ cm} \leq h_1 \leq 4 \text{ cm}$ avec plusieurs seuils. Une large gamme de débit et de nombre de Froude a été obtenue. Dans un premier temps nous nous sommes intéressé la variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude incident. Il a été obtenu que le rapport des hauteurs conjuguées augmente avec l'augmentation du nombre de Froude. En outre, l'ajustement statistique des points de mesures, a permis d'aboutir, avec une assez bonne corrélation, à une équation linéaire liant Y, F_1 . L'étude expérimentale s'est intéressée ensuite à la dissipation de l'énergie cinétique.

Celle-ci étant représentée par le rendement. En effet, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que le ressaut dans un canal rectangulaire de section composée dissipe mieux l'énergie et que l'ajustement par la méthode des moindre carrée est de type logarithmique liant le rendement η , l'ouverture h_1 et le nombre de Froude incident F_1 .

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Notre mémoire de mastère a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil continu, dans un canal rectangulaire de section composée prismatique à parois lisse. Le manuscrit est divisé en deux parties : une première partie bibliographique et une seconde partie ayant concerné notre propre contribution.

La première partie a été divisée en trois chapitres :

A travers le premier chapitre nous avons abordé les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique évoluant **dans un canal de section droite rectangulaire**. Nous avons examiné les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut.

Dans le deuxième chapitre de la partie bibliographique nous avons traité le ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince dans un canal rectangulaire a été expérimentalement testé. Lorsque le seuil est placé à une distance X environ égale à la longueur L_r du ressaut, l'analyse des mesures expérimentales a montré que la hauteur relative S du seuil est telle que $S = C_o.(F_1 - 1)^{5/4}$. Le paramètre C_o est linéairement dépendant de la position relative X/h_2 du seuil.

Pour le cas d'un seuil dénoyé placé à une distance X environ égale à la longueur L_j , du ressaut, l'étude a pu définir les fonctions $\xi(Y, S) = 0$ et $\zeta(F_1, S) = 0$, ainsi que la position relative X/h_1 du seuil nécessaire à la formation complète du ressaut.

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 $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

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 hauteurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapprochées de la réalité.

La deuxième partie de notre travail a concerné notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans le canal rectangulaire de section 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, muni d'un seuil. Dans ce 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 mastère a concerné l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire en lit composé à pente nulle (canal prismatique). L'analyse des résultats expérimentaux nous a permis de trouver des approches expérimentales globales très acceptables.

Dans un premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie par les essais. Passant en second temps aux résultats expérimentaux, qui ont été testées par dix-sept (17) seuils s des hauteurs différentes. Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue.

En dernier temps Concernant la relation du rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident F_1 , nous avons constaté qu'elle est linéaire de la forme $Y = A (F_1) + B$ et on a tenté de trouver une approche expérimentale globale de la deuxième hauteur conjuguée variant en fonction de nombre de Froude F_1 et que cette relation a été justifiée par la première bissectrice.

Aussi on a essayé de trouver une relation globale du rendement η variant en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'ouverture h_1 . Cette relation globale obtenue a été justifiée également par la première bissectrice de telle sorte que les mesures expérimentales en totalité tournent autour de la première bissectrice.

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 servant au dimensionnement du bassin d'amortisseur.**

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.

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,

vol. 33, n° 1, p. 1 – 16

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.

Annexe

ANNEXE

Tableau 01 : Valeurs expérimentales des rapports des hauteurs conjuguées Y du ressaut contrôlé par seuil à paroi mince pour des valeurs de nombre de Froude F1

Y	F ₁	Y	F ₁	Y	F ₁	Y	F ₁
2.88	2.40	5.60	4.38	7.17	5.46	9.07	7.06
3.11	2.63	5.85	4.45	7.20	5.54	9.32	7.13
3.33	2.73	5.64	4.46	7.37	5.65	9.50	7.14
3.27	2.80	5.65	4.52	7.47	5.71	9.33	7.29
3.66	3.06	6.03	4.56	7.54	5.79	9.52	7.29
3.60	3.11	6.14	4.63	7.56	5.82	9.72	7.46
3.85	3.11	6.18	4.67	7.70	5.90	10.20	7.61
3.83	3.16	6.30	4.76	7.69	5.95	9.92	7.67
3.95	3.34	6.10	4.78	8.00	5.99	10.12	7.84
4.20	3.38	6.43	4.85	7.83	6.03	10.32	8.01
4.23	3.42	6.28	4.89	7.83	6.06	10.56	8.22
4.36	3.62	6.40	4.91	8.00	6.12	10.85	8.30
4.50	3.64	6.35	4.92	8.03	6.23	10.80	8.44
4.63	3.65	6.53	4.92	8.20	6.25	11.20	8.57
4.63	3.75	6.65	5.01	8.17	6.25	11.04	8.65
5.08	3.91	6.57	5.09	8.23	6.34	11.50	8.90
4.80	3.91	6.80	5.15	8.33	6.42	11.85	9.17
4.97	4.03	6.60	5.15	8.60	6.44	12.00	9.34
5.04	4.08	6.74	5.20	8.53	6.55	12.25	9.57
5.09	4.08	6.86	5.30	8.70	6.68	12.50	9.79
5.50	4.17	7.10	5.42	8.84	6.72	12.80	10.08
5.68	4.34	7.03	5.44	8.87	6.85	13.15	10.43
5.50	4.37	7.00	5.44	9.08	6.93	13.50	10.78

Tableau 02 : Valeurs expérimentales des rapports des hauteurs conjuguées $Y_{relation}$
du ressaut contrôlé par seuil à paroi mince pour des valeurs de $Y_{expérimental}$

$Y_{relation}$	$Y_{expérimental}$	$Y_{relation}$	$Y_{expérimental}$	$Y_{relation}$	$Y_{expérimental}$	$Y_{relation}$	$Y_{expérimental}$
2.89	2.88	5.72	5.64	7.07	7.17	9.09	9.08
3.21	3.11	5.79	5.65	7.20	7.20	9.37	9.32
3.44	3.27	5.55	5.68	7.34	7.37	9.59	9.33
3.34	3.33	5.70	5.85	7.42	7.47	9.38	9.50
3.86	3.60	5.85	6.03	7.53	7.54	9.59	9.52
3.80	3.66	6.15	6.10	7.58	7.56	9.82	9.72
3.93	3.83	5.94	6.14	7.76	7.69	10.11	9.92
3.86	3.85	6.00	6.18	7.68	7.70	10.34	10.12
4.18	3.95	6.30	6.28	7.91	7.83	10.02	10.20
4.24	4.20	6.12	6.30	7.86	7.83	10.57	10.32
4.29	4.23	6.34	6.35	7.81	8.00	10.86	10.56
4.56	4.36	6.33	6.40	7.99	8.00	11.16	10.80
4.59	4.50	6.25	6.43	8.14	8.03	10.96	10.85
4.60	4.63	6.34	6.53	8.17	8.17	11.45	11.04
4.74	4.63	6.58	6.57	8.16	8.20	11.33	11.20
4.97	4.80	6.65	6.60	8.29	8.23	11.78	11.50
5.12	4.97	6.46	6.65	8.39	8.33	12.16	11.85
5.20	5.04	6.72	6.74	8.57	8.53	12.39	12.00
4.97	5.08	6.65	6.80	8.42	8.60	12.70	12.25
5.20	5.09	6.87	6.86	8.76	8.70	13.01	12.50
5.31	5.50	7.06	7.00	8.81	8.84	13.40	12.80
5.59	5.50	7.05	7.03	8.99	8.87	13.88	13.15
5.60	5.60	7.03	7.10	9.26	9.07	14.36	13.50

Tableau 03 : Valeurs expérimentales de rendement η du ressaut contrôlé par seuil à paroi mince pour des valeurs de nombre de Froude F_1

η	F_1	η	F_1	η	F_1	η	F_1
0.17	2.40	0.46	4.38	0.55	5.46	0.64	7.06
0.21	2.63	0.47	4.45	0.55	5.54	0.64	7.13
0.23	2.73	0.47	4.46	0.56	5.65	0.64	7.14
0.25	2.80	0.47	4.52	0.57	5.71	0.65	7.29
0.29	3.06	0.48	4.56	0.57	5.79	0.65	7.29
0.30	3.11	0.48	4.63	0.57	5.82	0.66	7.46
0.30	3.11	0.49	4.67	0.58	5.90	0.66	7.61
0.30	3.16	0.49	4.76	0.58	5.95	0.67	7.67
0.33	3.34	0.50	4.78	0.58	5.99	0.67	7.84
0.34	3.38	0.50	4.85	0.59	6.03	0.68	8.01
0.34	3.42	0.51	4.89	0.59	6.06	0.69	8.22
0.37	3.62	0.51	4.91	0.59	6.12	0.69	8.30
0.37	3.64	0.51	4.92	0.60	6.23	0.69	8.44
0.37	3.65	0.51	4.92	0.60	6.25	0.70	8.57
0.39	3.75	0.52	5.01	0.60	6.25	0.70	8.65
0.41	3.91	0.52	5.09	0.60	6.34	0.71	8.90
0.41	3.91	0.53	5.15	0.61	6.42	0.72	9.17
0.42	4.03	0.53	5.15	0.61	6.44	0.72	9.34
0.43	4.08	0.53	5.20	0.61	6.55	0.73	9.57
0.43	4.08	0.54	5.30	0.62	6.68	0.73	9.79
0.44	4.17	0.55	5.42	0.62	6.72	0.74	10.08
0.45	4.34	0.55	5.44	0.63	6.85	0.75	10.43
0.46	4.37	0.55	5.44	0.63	6.93	0.75	10.78

Tableau 04 : Valeurs expérimentales de rendement $\eta_{relation}$ pour des valeurs du rendement $\eta_{expérimental}$

$\eta_{relation}$	$\eta_{expérimental}$	$\eta_{relation}$	$\eta_{expérimental}$	$\eta_{relation}$	$\eta_{expérimental}$	$\eta_{relation}$	$\eta_{expérimental}$
0.20	0.30	0.51	0.50	0.64	0.57	0.66	0.65
0.29	0.33	0.50	0.50	0.58	0.58	0.65	0.65
0.32	0.37	0.52	0.51	0.59	0.58	0.66	0.66
0.31	0.37	0.50	0.51	0.63	0.58	0.65	0.66
0.40	0.41	0.52	0.51	0.58	0.59	0.67	0.67
0.38	0.41	0.51	0.51	0.60	0.59	0.68	0.67
0.38	0.42	0.52	0.52	0.59	0.59	0.68	0.68
0.40	0.43	0.52	0.52	0.61	0.60	0.69	0.69
0.39	0.43	0.53	0.53	0.59	0.60	0.68	0.69
0.43	0.44	0.57	0.53	0.60	0.60	0.70	0.69
0.45	0.45	0.53	0.53	0.62	0.60	0.69	0.70
0.45	0.46	0.54	0.54	0.61	0.61	0.71	0.70
0.45	0.46	0.58	0.55	0.68	0.61	0.70	0.71
0.46	0.47	0.55	0.55	0.62	0.61	0.72	0.72
0.46	0.47	0.60	0.55	0.63	0.62	0.72	0.72
0.47	0.47	0.54	0.55	0.62	0.62	0.73	0.73
0.47	0.48	0.56	0.55	0.64	0.63	0.74	0.73
0.48	0.48	0.57	0.56	0.63	0.63	0.75	0.74
0.48	0.49	0.56	0.57	0.65	0.64	0.76	0.75
0.49	0.49	0.58	0.57	0.64	0.64	0.77	0.75