

N° d'ordre:

N° de série :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET

DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE D'EL-OUED

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présent En vu de l'obtention du Diplôme licence LMD en biologie

Option: Hydraulique Urbaine

THEME

***Effet des rugosité sur
le ressaut hydraulique en canal en U***

La promoteur :

GHOMRI ALI

Présenter par :

ABBASSI MERIEM

TEMACINI AFAF

Promotion : Mai 2014

Remerciements

*Nous remercions Allah qui nous a donné la force et la sagesse
pour achever ce modeste travail*

Nous adressons tous nos respects et nos remerciements

*Au cadre administratif pédagogique de l'université d'El. Oued
précisément de la faculté des science et technologie . et tous
notre enseignants qui nos enseignant au cour de notre crésus*

*L' encadreur , **Mr. Ghomri Ali** qui a dirigé notre travail , ses
conseils , sa disponibilité , sa gentillesse et ses commentaires
précieux , j'ai permis de surmonter mes difficultés et de
progresser dans mon études.*

*Enfinement je veux remercier tous qui m'aider de près ou de
loin.*

SOMMAIRE

TITRE	PAGE
REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE.....	ii
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX ET DES PHOTO.....	iv
LISTES DES ABREVIATIONS.....	vi
INTRODUCTION GENERALE.....	01
PREMIERE PARTIE: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
INTRODUCTION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	02
CHAPITRE I. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE EN CANAL PROFILE EN “U”	
I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2. Approche de hager (1987 ET 1989).....	3
I.2.1. Analyse theorique.....	3
I.2.2.Hauteurs relatives du ressaut	5
I.2.3. Longueurs caracteristiques du ressaut	7
I.2.4. Profils de surface du ressaut.....	7
I.2.5. Description du ressaut.....	8
I.3. CONCLUSION.....	11
CHAPITRE II. : RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE EN CANAL PROFILE EN “U”	
II.1. INTRODUCTION.....	12
II.2.Approche de debabeche et achour (2000).....	12
II.2.1. Hauteur relative du ressaut.....	14
II.2.2. Longueur relative du ressaut.....	14
II.2.3. Hauteur relative du ressaut.....	16
II.2.3.1. Variation de la hauteur relative aval en fonction de la hauteur relative du seuil.....	16
II.2.3.2. Variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de froude incident.....	17
II.2.3.3. Variation de la hauteur relative aval du ressaut en fonction de la position relative du seuil....	18
II.2.4. Rendement du ressaut.....	19
II.2.5.Profil de surface généralisé du ressaut.....	21
II.3. CONCLUSION.....	23
CONCLUSION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE.....	25

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE	
INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE	26
I. POSITION DU PROBLEME	
II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL	
II.1. Description du modèle.....	29
II.2. Appareillage utilise.....	30
II.2.1. Débitmètrea affichage numérique.....	30
II.2.2. Limnimétrie.....	31
II.2.3. Tamiseuse.....	1
II.2.4. Palmer.....	31
III. DESCRIPTION DES ESSAIS	
III.1. Modedupréparationdularugositéutilisée.....	32
IV.RESULTATS EXPERIMENTAUX	
IV.1.CANAL PROFILE EN ‘U’ A FOND RUGUEUX (e/D=0,023).....	35
IV.1.1. Hauteur relative aval y_2 en fonction du débit relatif Q	35
IV.1.2. Hauteur relative aval $y_2 = h_2/d$ en fonction de la hauteur relative $s=s/h_1$ du seuil ...	38
IV.2.3.Longueur relative l_j/h_1 du ressaut en fonction du debit relatif Q^*	41
CONCLUSION A LA DEUXIEME PARTIE.....	42
CONCLUSION GENERALE.....	43
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	VII
ANNEXES.....	VIII

LISTE DES FIGURES

titre	page
Figure1.1 :géométri de la section en forme de “U”	4
Figure 1.2 : erreur relative f pour cent entre les équations (1.1,1.2) et (1.3)	5
Figure 1.3 :Variation du rapport y_2 des hauteurs conjuguées en fonction du débit relatif q pour quelques valeurs de y_1	6
Figure1.4: Longueur relative L_j/h_2 du ressaut, en fonction de IF_1	7
Figure 1.5 : profils axiaux de surface. Q (l/s)	8
Figure 1.6 : allure schématique de l’écoulement pour de petit y_1	8
Figure1.7:caractéristiques du ressaut pour le hauteurs relatives faibles	9
Figure 1.8 : caractéristiques du ressaut pour les hauteurs relatives élevées	10
Figure 2.1 : Variation de la hauteur relative y_2 en fonction du débit relatif Q^* , pour quelques valeurs de y_1	13
Figure 2.2 : Variation de y_{2th} en fonction de y_{2app}	14
Figure 2.3 : Variation de la longueur relative L_j/h_2 du ressaut en fonction du nombre de Froude IF_1 de l’écoulement incident, pour quelques valeurs de la hauteur relative $avay_1$	15
Figure 2.4 : Variation de la hauteur relative aval y_2 du ressaut en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil, pour quatre valeurs de la hauteur relative amont y_1	16
Figure 2.5 : Variation de la hauteur relative aval y_2 du ressaut en fonction de $f(y_1,s/h_1)$	17
Figure 2.6 :Variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction de $(IF_1 - 1)$	18
Figure 2.7 : Variation de la hauteur relative aval y_2 du ressaut contrôlé en fonction de la position relative x/h_1 du seuil, pour différentes valeurs de la hauteur relative amont y_1	18
Figure 2.8: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude IF_1	20
Figure 2.9 : Variation du rendement η en fonction du débit relatif Q^* , pour différentes valeurs de la hauteur relative amont y_1	21
Figure 2.10 : Profil de surface du ressaut	21
Figure 2.11: Profil de surface généralisé du ressaut contrôlé dans un canal profilé en “U”, pour différentes hauteurs initiales h_1	22
Figure2.1: Ressaut contrôlé par seuil mince	27
Figure 2.2 : Schéma de l’installation ayant servi à l’expérimentation	29
Figure 4.1: Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction du débit relatif Q^*	35
Figure 4.2: Ressaut contrôlé en canal à fond rugueux. Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction du débit relatif Q^* , pour les quatre valeurs de y_1	36

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX ET DES PHOTO

Figure 4.3 : Variation du coefficient a_2 en fonction de la hauteur relative aval y_1	37
Figure 4.4 : Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction de (y_1, Q^*)	37
Figure 4.5 : Variation de la hauteur relative aval $y_2=h_2/D$ en fonction de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil, pour quatre valeurs distinctes de y_1	38
Figure 4.6 : Ressaut contrôlé en canal profilé en U à fond rugueux. Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil, pour quatre valeurs différents de y_1	39
Figure 4.7 : Variation du coefficient c_2 en fonction de la hauteur relative amont y_1	40
Figure 4.8 : Variation du coefficient d_2 en fonction de la hauteur relative amont y_1	40
Figure 4.9 : Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction de $f(S, y_1)$	41
Figure 4. 10 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* . pour quatre valeurs distincte y_1	41

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

titre	page
Tableau 4.1 : Coefficients a_2 des courbes d'ajustement	36
Tableau 4.2 : Coefficients c_2 et d_2 des courbes d'ajustements	39

LISTE DES PHOTO

titre	page
Photo 2.1: photographie du canal ayant servi à l'expérimentation	29
Photo 2.2: a) Boîte en charge. b) Série d'ouvertures. c) Manomètre différentiel. d) Pompe	30
Photo 2.3: Limnimètre	31
Photo 2.4: Une série de tamis placés sur un vibreur	31
Photo 2.5: Palmer numérique	31
Photo 3.1: Série de seuils minces ayant servi au contrôle du ressaut	32
Photo 3.2: ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en U à fond rugueux a) Vue à l'amont du ressaut . b) Vue à l'aval du ressaut	33
Photo 3.3: a) échantillon de grains de gravier de rugosités équivalent $\epsilon=5.63\text{mm}$ b) Grains de gravier répartis uniformément sur le fond du canal	34

PRINCIPALES NOTATIONS

d, D	Diamètres, largeur du canal	[m]
D_h	Diamètre hydraulique	
d^*	Diamètre relatif	[m]
IF_1	Nombre de Froude à l'amont du ressaut	[-]
g	Accélération de la pesanteur	[m/s ²]
h	Profondeur d'écoulement	[m]
h_c, k	Profondeur critique	[m]
h_1	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h_2	Hauteur finale du ressaut	[m]
H	Charge totale	[m]
H_c	Charge critique	[m]
ΔH	Perte de charge due au ressaut	[m]
L_j	Longueur du ressaut	[m]
L_r	Longueur du rouleau	[m]
m	Cotangente de l'angle d'inclinaison d'un talus	[-]
P	Pression	[N/m ²]
Q	Débit volume	[m ³ /s]
Q^*	Débit relatif	[-]
q	Débit unitaire	[m ² /s]
R_h	Rayon hydraulique	[m]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
V	Vitesse d'écoulement	[m/s]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées	[-]
y_1	hauteur relative amont du ressaut (h_1/D)	[-]
y_2	hauteur relative aval du ressaut (h_2/D)	[-]
ε	Rugosité équivalente	[mm]
η	Rendement du ressaut	[-]
ρ	Masse volumique	[Kg/m ³]
$\bar{\omega}$	Poids spécifique	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Un ouvrage hydraulique tel qu'un barrage peut se trouver confronter, dans sa partie aval, à un écoulement torrentiel à forte énergie cinétique, celle-ci engendre des forces tractrices néfastes par leur caractère érosif, il serait alors préférable de dissiper cette énergie par la création d'un ressaut hydraulique par la mise en place d'un seuil en travers de l'écoulement.

La modification des conditions à l'amont (débit, hauteur,...etc) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur,...etc), peut conduire aux différentes configurations de ressaut. Le ressaut est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente faible ou nulle, sans obstacle à l'aval (Hager W. H. Bremen R. et Kawogoshi N.1990). Le ressaut est dit contrôlé lorsque sa formation est conditionnée par la mise en place d'un obstacle à l'aval de l'écoulement (Hager W. H. Bretz N1988). Il est dit forcé lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle (Rand W, 1957, Bretz N.v, 1988).

Les recherches expérimentales ont d'abord confirmé que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale.

L'application de la quantité de mouvement a eu pour but d'évaluer le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude incident caractérisant l'écoulement amont. La relation la plus simple est celle obtenue par Belanger pour le cas du ressaut hydraulique en canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible et dont la +fond lisse d'une part, deux chapitres seront nécessaires, à travers lesquels nous aborderons le ressaut hydraulique classique, contrôlé en canal profilé en "U" à fond lisse, le ressaut en canal rectangulaire à fond ondulé et celui en "U" à fond rugueux.

La seconde partie de notre étude, se proposera d'examiner par voie expérimentale, le ressaut hydraulique en canal profilé en "U" à fond rugueux. En effet à l'exception des travaux de Rajaratnam (1968) et celle de (2002), relative au ressaut hydraulique en canal rectangulaire respectivement à fond rugueux et à fond ondulé et aux travaux de ghomri(2005) relative au ressaut en canal profilé en "U" à fond rugueux avec rugosités testées seulement. Le ressaut hydraulique en canal profilé en "U" n'a pas connu la poursuite d'études, c'est pour cette raison que notre étude a été proposée.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal profilé en "U" à fond rugueux. Des relations fonctionnelles, en termes adimensionnels, liant les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'effet de la rugosité du fond du canal, seront proposées.

INTRODUCTION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette première partie de notre étude bibliographique a pour but principal, de passer en revue les travaux les plus intéressants, ayant abordé le ressaut hydraulique en canal de section droite profilé en *U*.

Cette partie bibliographique sera divisée en deux (02) chapitres.

Le premier chapitre concernera les études de Hager (1987) et (1989), relatives au ressaut hydraulique classique en canal profilé en *U*.

Le second chapitre de cette étude aura trait au ressaut contrôlé par seuil en canal profilé en *U*. Deux approches seront alors proposées : l'approche de Debabeche et Achour (2000) et celle plus récente de Debabeche (2003).

I.1. INTRODUCTION

La section en forme de "U" est composée de la section circulaire et la section rectangulaire. Cette section est actuellement utilisée de plus en plus comme section de transition dans la technique d'épuration, qu'elle soit, dans les afflux vers les ouvrages spéciaux ou dans les installations d'épuration des eaux usées. Grâce à la simplicité de sa construction et ses excellentes qualités d'écoulement surtout en basses eaux, cette section remplace de plus en plus les vieilles sections à construction très compliquées.

Contrairement au profil à section circulaire, la section en forme "U" permet le simple mesurage expérimental des caractéristiques d'écoulement. Enfin les résultats des mesures pour les hauteurs de remplissage relativement petites peuvent directement être appliqués au profil à section circulaire.

A ce jour, malgré son utilisation répandue sur le terrain, il y a peu de documentation sur l'évaluation des caractéristiques d'écoulement aussi bien dans les profils en forme de "U" que dans les sections de forme circulaire lors d'un remplissage partiel. Par contre il n'existe que des modestes indications sur les courbes de remous et de dépression, et le ressaut hydraulique dans cette section en forme "U" n'a pas fait l'objet d'une étude expérimentale avant 1987, date à laquelle HAGER (1987) a proposé une étude. Deux ans plus tard, ce même auteur a publié une seconde étude où il a clarifié quelques aspects de base du ressaut hydraulique dans les conduites circulaires à écoulement partiellement plein. Les essais ont cependant été menés dans une conduite profilée en "U" constituée à la base d'un demi-cercle et surmonté de deux parois verticales.

Ce chapitre sera entièrement consacré à l'approche de Hager (1987 et 1989) relative au ressaut hydraulique classique en canal profilé en "U".

I.2. APPROCHE DE HAGER (1987 et 1989)

I.2.1. Analyse théorique

La section en forme "U" est géométriquement caractérisée par sa largeur D . Si la profondeur d'écoulement est inférieure à $D/2$, le débit se présente ainsi dans la section circulaire remplie partiellement ; pour $h \geq D/2$ le débit se présente alors dans la section rectangulaire de largeur D .

Dans la section en forme de "U", il s'agit donc d'une section composée. C'est pour cela que la différence est faite entre les auteurs : $y = h/D < 1/2$ et $y \geq 1/2$.

Dans ce qui suit, seront présentées les caractéristiques géométriques les plus importantes selon HAGER.

Si A désigne la surface mouillée, U le périmètre mouillé, $R = A/U$ le rayon hydraulique et W le volume de la force de pression P sous la répartition de la pression hydrostatique, divisée par le poids spécifique (ρg), on a alors d'après HAGER (1987) pour $y < 1/2$:

$$\begin{aligned} A/D^2 &= (\theta - \sin\theta \cos\theta) / 4 \\ U/D &= \theta \end{aligned} \tag{1.1}$$

$$R/D = (1 - \sin\theta \cos\theta) / \theta$$

$$W/D^3 = (\sin\theta - \sin^3\theta / 3 - \theta \cos\theta) / 8$$

Avec $\theta = \cos^{-1}(1-2y)$ comme angle au centre, et pour $y \geq 1/2$:

$$\begin{aligned} A/D^2 &= y + \pi/8 - 1/2 \\ U/D &= 2y + \pi/2 - 1 \end{aligned} \tag{1.2}$$

$$R/D = (y + \pi/8 - 1/2) / (2y + \pi/2 - 1)$$

$$W/D^3 = (1/2)(y - 1/2)^2 + (\pi/8)(y - 1/2) + 1/12$$

A/D^2 , R/D et W/D^3 en fonction de la hauteur de remplissage y sont représentés à la figure 1.1

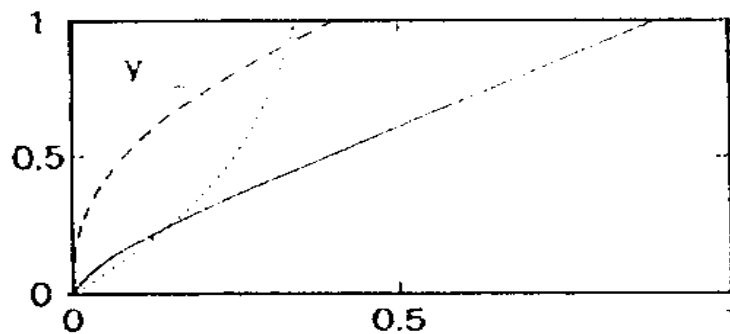


Figure 1.1 : géométrie de la section en forme de "U". (—) A/D^2 , (.....) R/D et (----) W/D^3 en fonction de la hauteur $y = h/d$.

L'inconvénient dans la description des sections en forme de « U » est la composition des caractéristiques de celles-ci d'après les équations (1.1 , 1.2).

C'est pour cela que HAGER (1987) a essayé d'établir des fonctions de substitution :

$$\begin{aligned} A/D^2 &= (4/3) y^{3/2} (1-(1/3)y), \\ R/D &= (2/3) y (1-(1/2)y), \quad 0 < y < 1 \\ W/D^3 &= (8/15) y^{5/2} (1-(1/4)y); \end{aligned} \quad (1.3)$$

La figure 1.2 représente l'erreur relative $f = (\Delta_{\text{approché}} - \Delta_{\text{exact}}) / \Delta_{\text{exact}}$ de la dimension considérée Δ entre les fonctions approximatives (1.3) et les expressions géométriques exactes (1.1 , 1.2). On relève des tolérances de moins de 4% pour $y < 1$, pour les équations (1.3).

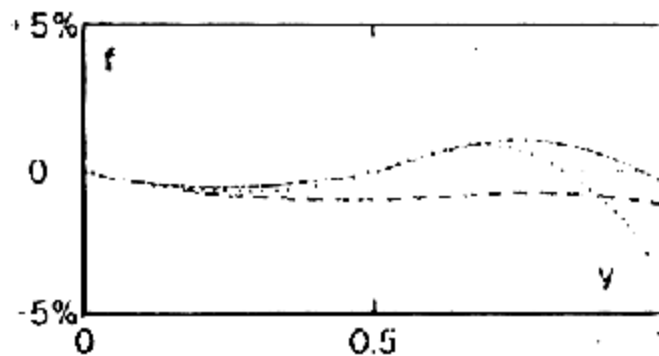


Figure 1.2 : erreur relative f pour cent entre les équations (1.1,1.2) et (1.3).Mêmes notations que la figure 1.1.

Pour effectuer ses essais, HAGER s'est servi d'une rigole en aluminium, en forme de « U » de diamètre $D=0,30\text{m}$, de hauteur $h=0,40\text{m}$ et de longueur $8,50\text{m}$. la pente du fond du canal est de $0,3 \text{ ‰}$. la construction repose sur une table en éléments de béton. L'alimentation du canal est assurée par des pompes à commande électronique.

I.2.2. Hauteurs relatives du ressaut

HAGER (1987) définit les hauteurs relatives du niveau d'eau qui se présentent avant et après le ressaut hydraulique dans un canal prismatique et horizontal, par les hauteurs conjuguées du niveau d'eau. L'auteur propose, à l'aide des formulations (1.3)₁ et (1.3)₃, l'équation suivante :

$$\frac{8}{15}y_1^{5/2}\left(1-\frac{1}{4}y_1\right)+q^2\left[\frac{4}{3}y_1^{3/2}\left(1-\frac{1}{3}y_1\right)\right]^{-1}=\frac{8}{15}y_2^{5/2}\left(1-\frac{1}{4}y_2\right)+q^2\left[\frac{4}{3}y_2^{3/2}\left(1-\frac{1}{3}y_2\right)\right]^{-1} \quad (1.4)$$

celle-ci peut également s'écrire comme suit :

$$q=\left[\frac{\frac{8}{15}y_2^{5/2}\left(1-\frac{1}{4}y_2\right)-\frac{8}{15}y_1^{5/2}\left(1-\frac{1}{4}y_1\right)}{\left[\frac{4}{3}y_1^{3/2}\left(1-\frac{1}{3}y_1\right)\right]^{-1}-\left[\frac{4}{3}y_2^{3/2}\left(1-\frac{1}{3}y_2\right)\right]^{-1}}\right]^{1/2} \quad (1.5)$$

On désigne par 1 et 2 la position immédiatement avant et après le ressaut. Soit $q^2=Q^2/(g.D^5)$.

Une relation entre q , y_1 et y_2 est présentée dans la figure 1.3.

L'auteur fait remarquer qu'une relation peut aussi être établie entre IF_1 , y_1 et y_2 .

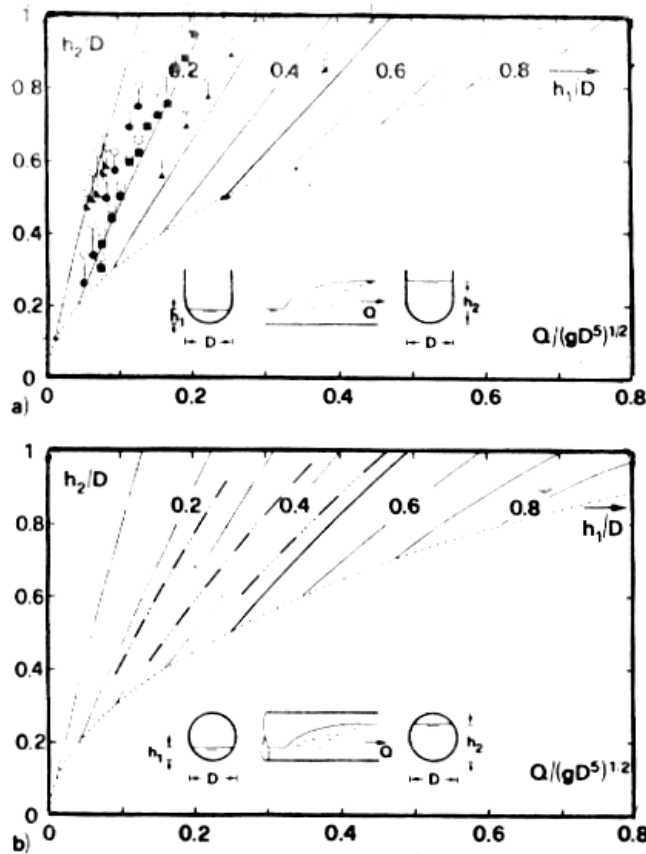


Figure 1.3 : Variation du rapport y_2 de hauteurs conjuguées en fonction du débit relatif q pour quelques valeurs de y_1 . a) canal en "U". b) conduite circulaire.

Il est remarquable que pour des valeurs fixes de q et y_1 , la hauteur conjuguée y_2 d'après l'expérience est toujours plus petite que celle d'après l'équation (1.4). Cette particularité est due principalement, selon HAGER (1987), à la négligence des frottements et de l'inclinaison du sol. La différence est de 5 à 10% sur h_2 . La même particularité est observée par KUNSTATSKY et VYBORA pour les conduites semi-remplies en profil circulaire (fig.1.3b).

I.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut

La longueur L_j du ressaut est définie comme la distance entre le pied du ressaut et le niveau maximal de la surface libre (Rajaratnam 1967), celle-ci ne peut être déterminée qu'approximativement pour raison de turbulences. Le rapport L_j/h_2 en fonction de IF_1 est représenté dans la figure 1.4, une valeur moyenne $L_j/h_2 \approx 6$ a été déterminée, comparée à la section rectangulaire, celle-ci est toujours plus grande dans la section en forme de "U" pour la même valeur de IF_1 . L'effet de y_1 sur L_j/h_2 n'a pas été défini.

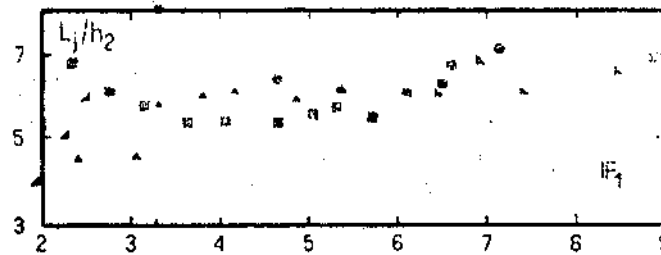


Figure 1.4 : longueur relative L_j/h_2 du ressaut, en fonction de IF_1

I.2.4. Profils de surface du ressaut

Hager a représenté les profils axiaux de surface en fonction du nombre de Froude IF_1 (figure 1.5), néanmoins il n'y a pas de généralisation du profil de surface.

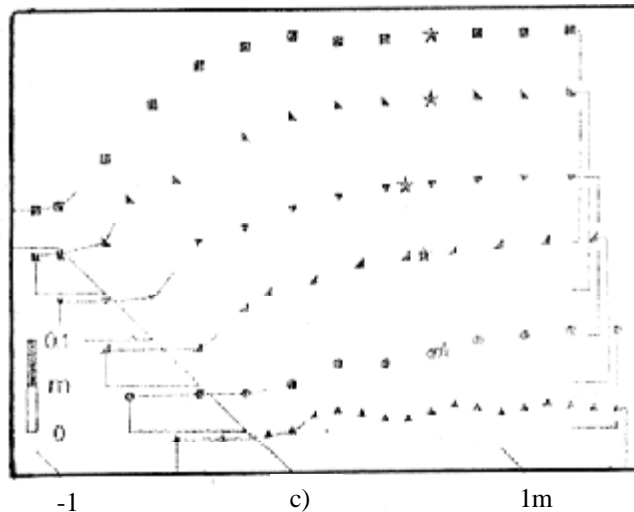


Figure 1.5 : profils axiaux de surface. Q (l/s) : (p) = 7.9, (●) 9.8, (y) 12.8, () 14.8, (x) 17.8, (♣) 19.7. (*) Localisation de la fin du ressaut.

I.2.5. Description du ressaut

Selon Hager, le canal profilé en "U" présente un courant d'écoulement dominant tridimensionnel (figure 1.6). Il le compare à celui de la section en forme de trapèze. A cause de la sensibilité aux oscillations transversales et longitudinales, l'auteur ne recommande pas ce type de ressaut hydraulique sans éléments supplémentaires de stabilisation tel que le bassin de tranquillisation.

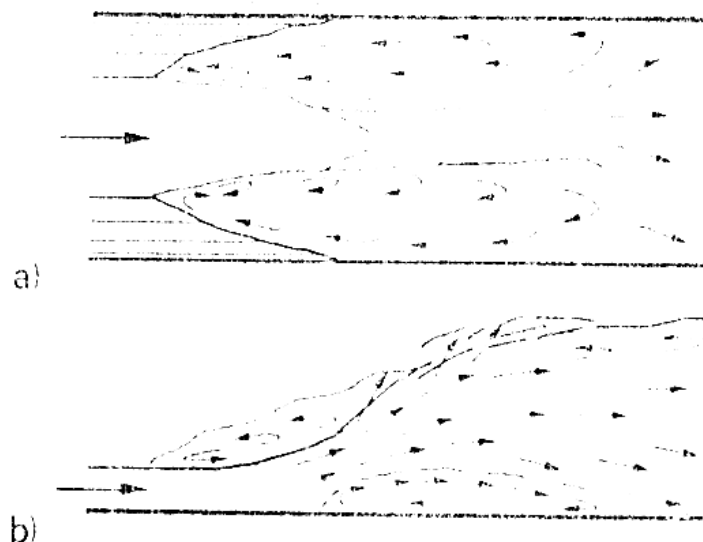


Figure 1.6 : allure schématique de l'écoulement pour de petit y_1
a) écoulement en surface b) écoulement à l'axe.

La figure 1.6 clarifie le phénomène d'écoulement tridimensionnel. Pour y_1 petit, seulement une portion de la largeur du canal est occupée par le fluide. Cela est dû à la présence de séparation de fond, la vitesse élevée du jet est éjectée dans l'air et l'action de pulsation devient perceptible. Dans la dernière portion frontale du ressaut, la turbulence est élevée, cependant dans sa portion aval, l'intensité de turbulence est réduite. Un rouleau de fond est perceptible, sa hauteur maximale est estimée $h_2/3$. Il disparaît complètement pour une profondeur relative y_1 d'écoulement plus grande.

Un peu plus loin à l'aval, des vagues sont produites et le fluide s'étend vers les cotés du canal, de cette manière sont formées deux zones de courant de retour. D'après Hager, un ressaut hydraulique dans un canal de forme de "U" avec un petit y_1 est caractérisé par un comportement spatial considérable. Une distinction doit être faite entre : (1) un jet de grande vitesse ; (2) une zone axiale de séparation du fond ; (3) une zone axiale de séparation ; (4) une zone du courant du retour latérale ; et (5) une surface du bout aval (fin du ressaut).

Ces phénomènes de courants complexes sont illustrés par l'auteur dans les figures (1.7) et (1.8)

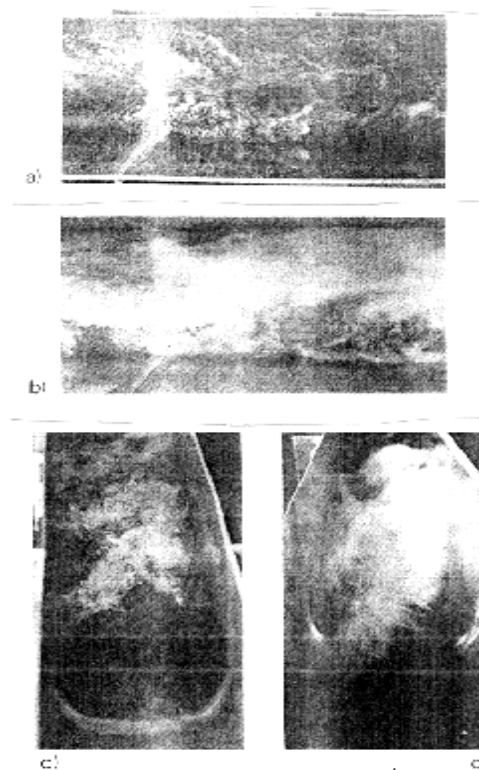


Figure 1.7 : caractéristiques du ressaut pour les hauteurs relatives faibles. $y_1=0.13$ (a),(c) $Q=12.8l/s$; (b),(d) $Q=17.8l/s$.

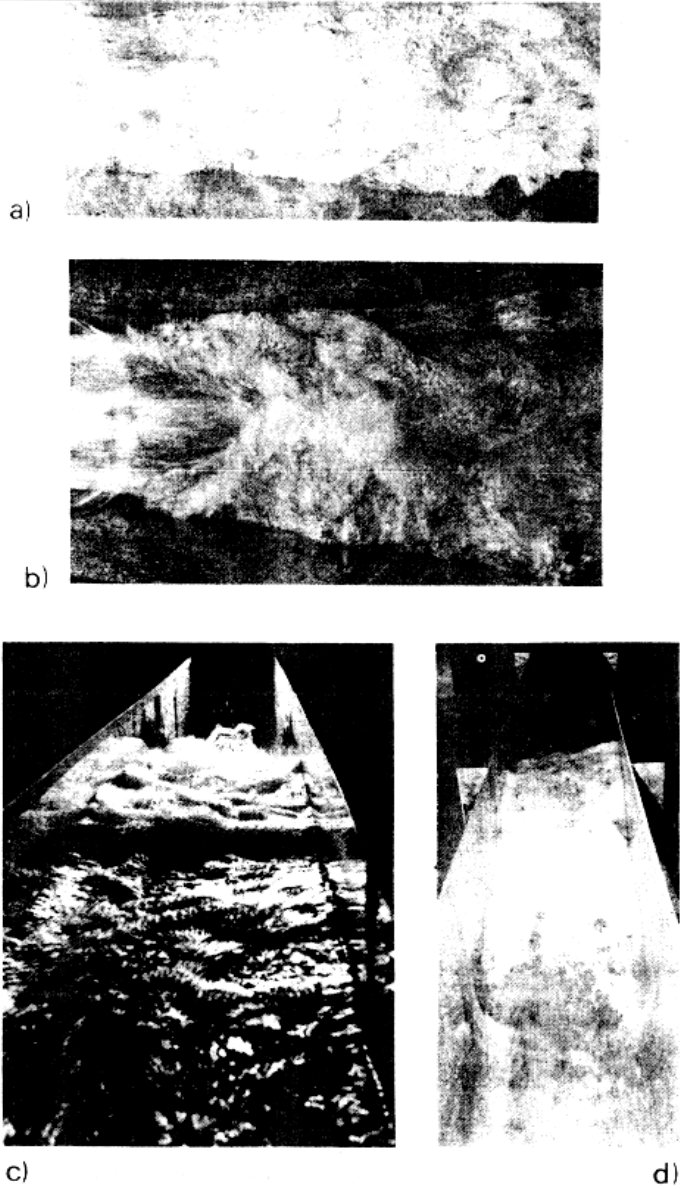


Figure 1.8 : caractéristiques du ressaut pour les hauteurs relatives élevées. $y_1=0.25, Q=39.6l/s$.

I.3. CONCLUSION

Ce chapitre a abordé l'approche de HAGER de 1987 et son complément de 1989. Le ressaut hydraulique dans un canal en forme de “U” est décrit. Concernant le rapport des hauteurs conjuguées, de petites différences entre l'écoulement dans un canal en forme de “U” et un canal de forme circulaire sont trouvées, plusieurs profils de surfaces sont discutés.

La longueur relative de ressaut hydraulique est approximativement $L_j/h_2=6\pm 1$.

Le résultat le plus intéressant concerne le phénomène interne du ressaut. Pour une petite profondeur relative y_1 , un fond de séparation distinct apparaît.

Beaucoup de zones d'écoulement sont décrites et les distributions des vitesses axiales sont présentées. Pour y_1 grand, l'écoulement ressemble à un ressaut dans un canal rectangulaire.

II.1. Introduction

Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal profilé en U , a été traité par les auteurs : Debabeche et Achour (2000) et Debabeche (2003).

Les deux approches ont pour but, d'évaluer les caractéristiques essentielles intervenant au phénomène du ressaut à partir des conditions initiales, et surtout trouver des paramètres adimensionnels relatifs au contrôle du ressaut.

La première approche (en 2000) est purement expérimentale, alors que la seconde (en 2003) présente une partie théorique très bien développée.

En effet, Debabeche (2003) a examiné, à travers cette étude, le contrôle du ressaut par un seuil à parois mince et épaisse dans un canal profilé en U d'un point de vue théorique et expérimentale. Sous certaines hypothèses simplificatrices, le développement théorique conduit à des relations explicites des hauteurs relatives des seuils, tout en tenant compte de l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement. Ceci a permis de déduire la relation fonctionnelle régissant le contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire, en remplacement de l'équation de Forster et Skrinde qui nécessite un réajustement. Une étude particulière est présentée pour définir les conditions d'un seuil relatif minimal à paroi épaisse.

II.2. APPROCHE DE DEBABECHE ET ACHOUR (2000)

II.2.1. Hauteur relative du ressaut

L'étude bibliographique met en évidence l'influence de la hauteur relative amont $y_1 = h_1/D$ du ressaut, sur la variation de la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$ en fonction du débit relatif Q^* .

La figure 2.1 montre la représentation graphique de la variation de y_2 en fonction de Q^* , pour sept (07) valeurs distinctes de y_1 . Ces mesures expérimentales sont comparées aux courbes théoriques de Hager (1987).

La figure 2.2 montre clairement sept (07) nuages de points distincts, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la hauteur relative amont y_1 . Chaque série de mesure est alignée suivant une courbe unique, montrant l'influence de y_1 (ou h_1). Nos mesures expérimentales vérifient bien les courbes théoriques, à l'exception d'un léger décalage, qui est probablement dû à la négligence des forces de frottement dans la relation théorique

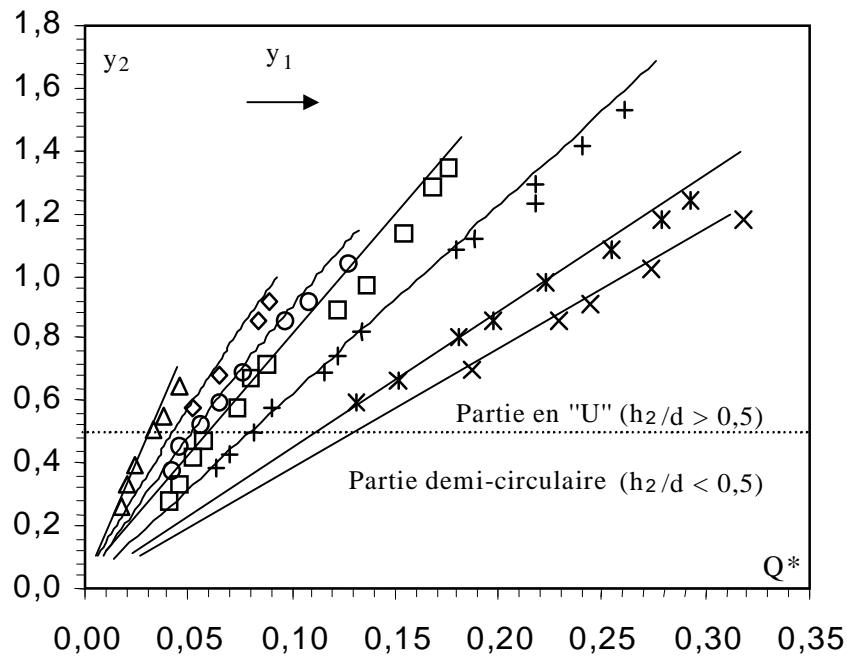


Figure 2.1 : Variation de la hauteur relative y_2 en fonction du débit relatif Q^* , pour quelques valeurs de y_1 : (Δ) 0,0408, (\diamond) 0,0637, (\circ) 0,0816, (\square) 0,0947, ($+$) 0,1341, ($*$) 0,2041, (\times) 0,2449. (3/4) Courbes théoriques selon l'équation (1.5) d'après [23].

Une relation traduisant la variation de y_2 en fonction du débit relatif Q^* , le débit relatif limite Q^*_1 ainsi que la hauteur relative amont y_1 a été trouvée. Celle-ci s'écrit comme suit :

$$y_2 - 0,5 = [0,27 \tanh (y_1) Q^*_1 - 1][(Q^* / Q^*_1) - 1] \tag{2.1}$$

avec $Q^*_1 \geq 0,432 y_1^{0,85}$

Cette équation permet de déterminer la hauteur relative aval y_2 connaissant le débit relatif Q^* et le débit relatif limite Q^*_1 .

La représentation graphique (Figure 2.2) de la variation de la hauteur relative aval théorique y_2 , issue de l'équation 1.4, en fonction de y_2 approchée tirée de l'équation 2.1, montre bien avec une très bonne corrélation la fiabilité de celle-ci.

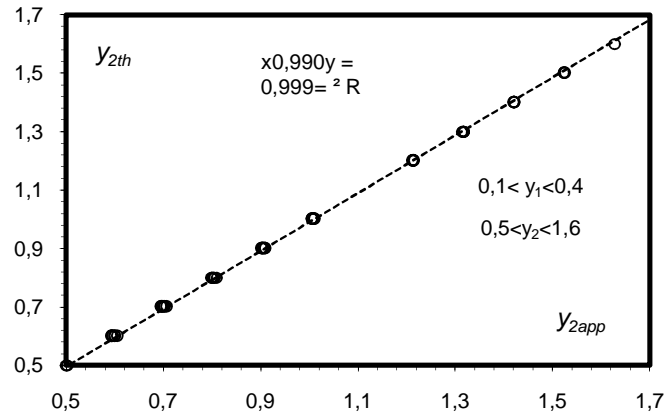


Figure 2.2 : Variation de y_{2th} en fonction de y_{2app}
(o) points expérimentaux. (---) Courbe d'ajustement.

II.2.2. Longueur relative du ressaut

La longueur caractéristique L_j du ressaut n'a pu être quantifiée que par voie expérimentale et sa définition varie d'un auteur à l'autre. En effet on estime que cette longueur doit être mesurée dans 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 de rouleau sont inexistantes.
4. l'écoulement graduellement varié apparaît à l'extrémité aval du rouleau.

Toutes ces définitions ont pour but d'indiquer la limite aval du ressaut au-delà de laquelle le renforcement du bassin d'amortissement n'est plus nécessaire.

Dans son étude de la variation de la longueur relative L_j/h_2 du ressaut en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, Hager (1989) montre que ce rapport est approximativement égal à 6. Cette même valeur a été également trouvée pour le cas d'un ressaut rectangulaire. Seulement Hager (1989) précise que l'effet de h_1/D sur la longueur relative L_j/h_2 du ressaut, n'a pas été défini.

Debabeche et Achour (2000) ont évalué à leur tour la variation de cette même longueur relative L_j/h_2 en fonction de IF_1 , en tenant préalablement compte de la hauteur relative amont y_1 .

La variation de L_j/h_2 en fonction de IF_1 pour différentes valeurs de y_1 est représentée à la figure 2.3.

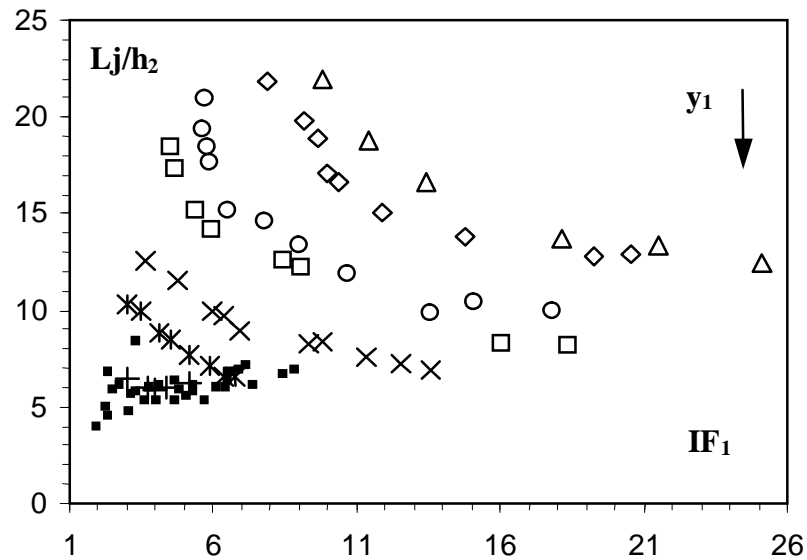


Figure 2.3 : Variation de la longueur relative Lj/h_2 du ressaut en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de la hauteur relative aval y_1 : (Δ) 0,0408, (\grave{a}) 0,0637, (o) 0,0816, () 0,0947, (x) 0,1341, (*) 0,2041, (+) 0,2449. (n) Points expérimentaux de HAGER [23].

La figure 2.3 montre clairement que les points de mesures expérimentales suivent, pour chaque hauteur relative y_1 , l'allure d'une courbe unique. Les mesures montrent qu'au fur et à mesure que y_1 augmente Lj/h_2 diminue.

Pour le ressaut évoluant dans la partie demi-circulaire du canal ($h_2/D \leq 0,5$), la longueur relative Lj/h_2 , pour une valeur constante de y_1 , diminue progressivement en fonction de IF_1 suivant une forte pente. Cette particularité est la même pour toutes les hauteurs relatives y_1 .

Quant au ressaut évoluant dans la partie "U" du canal, le nuage de points suit, pour chaque valeur de y_1 , une pente faible qui tend vers une constante.

Sept (07) nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la hauteur relative amont y_1 , montrent l'influence de celle-ci sur la longueur relative Lj/h_2 du ressaut.

Le rapport $Lj/h_2 \cong 6$ n'est atteint que pour les $y_1 = 0,2449$, toutefois il est nécessaire de signaler que HAGER (1989) a travaillé dans un intervalle de nombre de Froude IF_1 compris entre 1,93 et 8,85.

II.2.3. Hauteur relative du seuil

Comme il a été signalé précédemment l'objectif principal de cette présente étude est de trouver l'interdépendance des paramètres intervenant au contrôle du ressaut. En d'autres termes, l'étude a pour but de déterminer la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction d'un ou de plusieurs paramètres adimensionnels caractéristiques du ressaut contrôlé.

II.2.3.1. Variation de la hauteur relative aval en fonction de la hauteur relative du seuil

L'analyse des mesures expérimentales a permis également de trouver une relation entre la hauteur relative s/h_1 du seuil et la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$.

La figure 2.4 montre que la relation qui existe entre ces deux rapports adimensionnels dépend de la hauteur relative amont y_1 .

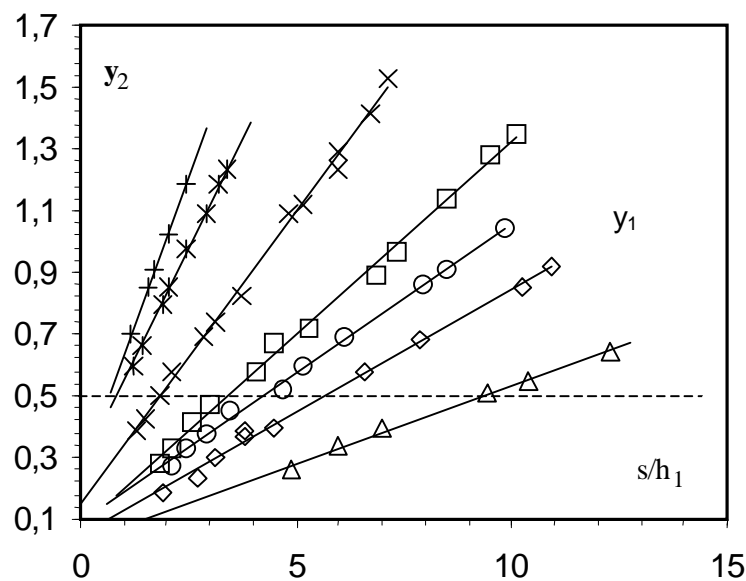


Figure 2.4 : Variation de la hauteur relative aval y_2 du ressaut en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil, pour quatre valeurs de la hauteur relative amont y_1 : (Δ) 0,0408, (\diamond) 0,0637, (o) 0,0816, () 0,0947, (x) 0,1341, (*) 0,2041, (+) 0,2449. (---) ligne séparant la partie "U" ($y_2 > 1/2$) et la partie demi-circulaire ($y_2 < 1/2$).

En effet, sept (07) nuages de points distincts pour chaque valeur de la hauteur relative amont y_1 , fait apparaître l'influence de celle-ci sur la relation ($s/h_1, y_2$). Pour chaque valeur de y_1 les points de mesures expérimentales suivent parfaitement l'allure d'une droite d'équation $y_2 = a (s/h_1) + b$, où a et b sont des constantes qui dépendent de y_1 .

L'analyse des couples de valeurs (y_1, a) et (y_1, b) de chaque équation a permis d'aboutir à une équation générale (2.2) liant y_1, y_2 et s/h_1 :

$$y_2 = y_1 (1,97 \cdot y_1^{0,17} S + 1) \tag{2.2}$$

cette équation satisfait à la condition initiale : $S=0 \Rightarrow y_2 = y_1$.

La figure 2.5 montre qu'effectivement la relation $y_2 = f(S, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et la droite d'ajustement représente la première bissectrice.

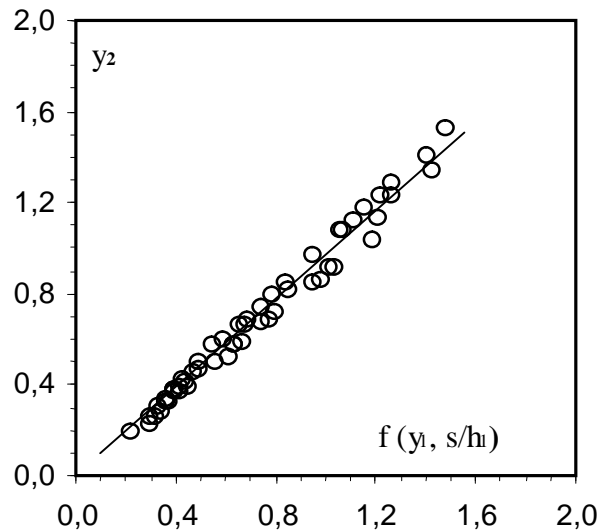


Figure 2.5 : Variation de la hauteur relative aval y_2 du ressaut en fonction de $f(y_1, s/h_1)$. (o) Points expérimentaux. (3/4) première bissectrice.

II.2.3.2. Variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude incident

L'analyse statistique des mesures expérimentales a également montré, qu'un ajustement linéaire par la méthode des moindres carrés, permet d'obtenir avec une corrélation de 99%, une relation unique entre la hauteur relative s/h_1 du seuil et le nombre de Froude IF_1 .

Cette relation est la suivante :

$$s/h_1 = 0,58 \cdot (IF_1 - 1) \tag{2.3}$$

Cette relation montre que l'augmentation du nombre de Froude IF_1 engendre celle de la hauteur relative s/h_1 du seuil.

Les points de mesures expérimentales ainsi que la droite d'ajustement sont représentés à la figure 2.6.

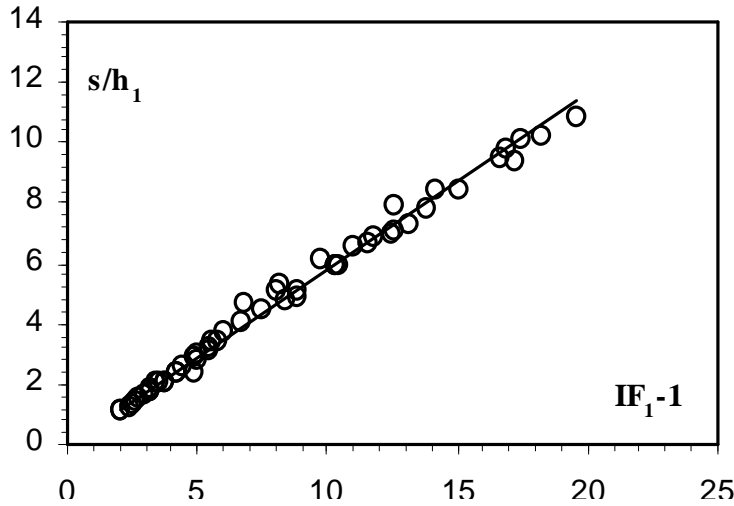


Figure 2.6 :Variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction de $(IF_1 - 1)$.
 (o) points expérimentaux. (¾) Droite d'équation : $s/h_1 = 0,58.(IF_1 - 1)$.

II.2.3.3. Variation de la hauteur relative aval du ressaut en fonction de la position relative du seuil

Le ressaut étant entièrement formé sur le radier du bassin amortisseur correspondant à une hauteur géométrique s du seuil et une longueur x de bassin, comme pour le cas du ressaut rectangulaire et triangulaire, le déplacement du seuil vers l'aval ne modifie pas la configuration du ressaut, ce qui revient à dire que la longueur L_j du ressaut est pratiquement assimilable à la position x du seuil.

La figure 2.7 représente la variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction de la position relative x/h_1 du seuil.

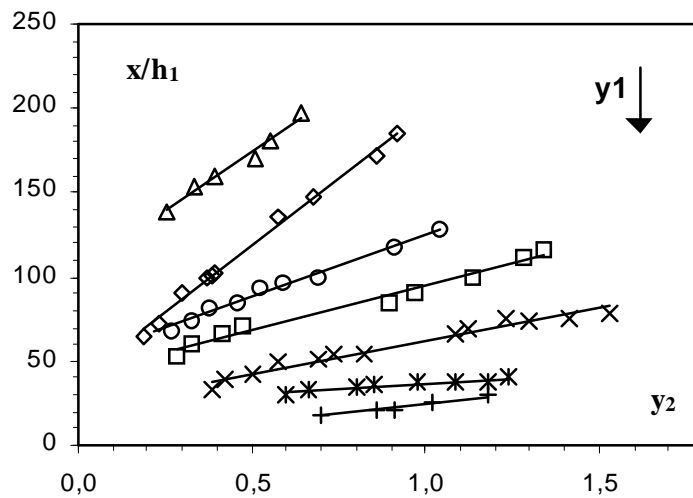


Figure 2.7: Variation de la hauteur relative aval y_2 du ressaut contrôlé en fonction de la position relative x/h_1 du seuil, pour différentes valeurs de la hauteur relative amont y_1 : (Δ) 0,0408, (\diamond) 0,0637, (O) 0,0816, () 0,0947, (x) 0,1341, (*) 0,2041, (+) 0,2449. (¾) droites d'ajustements.

Pour chaque hauteur relative amont y_1 les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $x/h_1 = a y_2 + b$, a et b étant des constantes qui dépendent également de y_1 .

L'analyse des couples de valeurs (y_1, a) et (y_1, b) de chaque équation a permis d'aboutir à une relation unique (2.4) de la forme $x/h_1 = f(y_1, y_2)$:

$$x/h_1 = 5,65 \cdot \frac{y_2}{y_1} + \frac{2,27}{y_1^{1,21}} \quad (2.4)$$

Le rapport y_2/y_1 peut être remplacé par le rapport y des hauteurs conjuguées et l'équation (2.5) devient :

$$x/h_1 = 5,65 \cdot y + \frac{2,27}{y_1^{1,21}} \quad (2.5)$$

Cette relation permet de déterminer la position x du seuil mince, connaissant les hauteurs relatives amont et aval.

II.2.4. Rendement du ressaut

Rappelons que l'intérêt technique du ressaut hydraulique est pratiquement dû à la dissipation d'énergie cinétique qu'il permet de réaliser. L'équation généralisée de Bernoulli entre la section aval et amont immédiats du ressaut impose :

$$H_1 = h_1 + Q^2 / (2 \cdot g \cdot A_1^2) = h_2 + Q^2 / (2 \cdot g \cdot A_2^2) + \Delta H \quad (2.6)$$

Le rendement η du ressaut hydraulique est défini par :

$$\eta = \Delta H / H_1, \Delta H = H_1 - H_2 \quad (2.7)$$

avec H_1 : la charge amont, H_2 : la charge aval et ΔH : la différence de charges.

il varie entre les limites $0 < \eta < 1$.

- l'air de la section amont est : $A_1 = \frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)$

- l'air de la section aval, pour $y_2 \leq 0,5$ est : $A_2 = \frac{D^2}{4} (\theta_2 - \sin \theta_2 \cos \theta_2)$,

l'expression du rendement s'écrit dans ce cas :

$$\eta = \frac{h_1 - h_2 + \frac{8.D.Q^{*2}}{\left[(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2 - (\theta_2 - \sin(\theta_2)\cos(\theta_2))^2 \right]}}{h_1 + \frac{8.D.Q^{*2}}{\left[(\theta_1 - \sin(\theta_1).\cos(\theta_1))^2 \right]}} \quad (2.8)$$

pour $y_2 > 0,5 \Rightarrow A_2 = D^2(\pi/8 + y_2 - 1/2) :$

$$\eta = \frac{h_1 - h_2 + \frac{.D.Q^{*2}}{2} \left[\frac{16}{(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2} - \frac{1}{(\pi/8 + y_2 - 1/2)^2} \right]}{h_1 + \frac{8.D.Q^{*2}}{\left[(\theta_1 - \sin(\theta_1).\cos(\theta_1))^2 \right]}} \quad (2.9)$$

La variation du rendement du ressaut en fonction du nombre de Froude incident est représentée dans la figure 2.8.

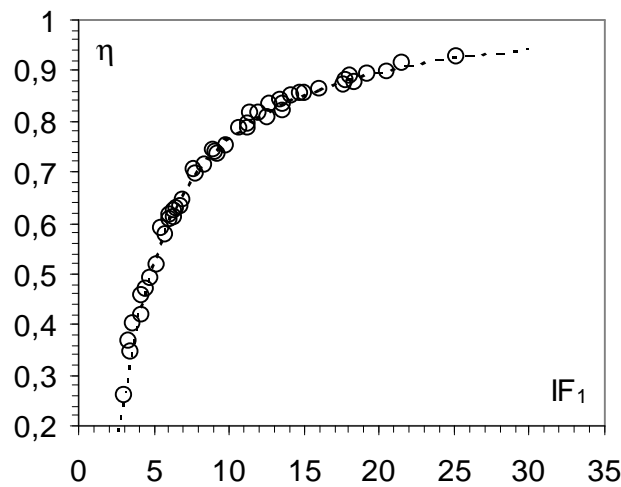


Figure 2.8 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude IF_1 . (o) points expérimentaux. (3/4) Courbe d'ajustement d'équation $\eta = 1,04 \cdot (1 - \sqrt{2} / IF_1)^2$.

La figure 2.8 montre que les points expérimentaux s'ajustent parfaitement autour de la courbe théorique. Une relation unique de type puissance a été obtenue :

$$\eta = 1,04 \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{IF_1} \right)^2 \quad (2.10)$$

La figure (2.10) montre la variation du rendement du ressaut en fonction du débit relatif.

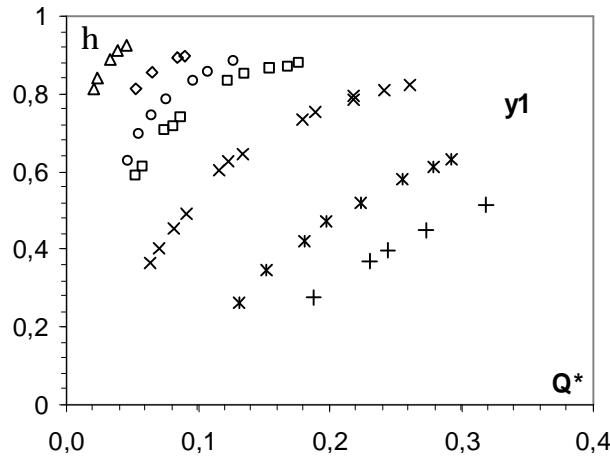


Figure 2.9 : Variation du rendement h en fonction du débit relatif Q^* , pour différentes valeurs de la hauteur relative amont y_1 : (D) 0,0408, (à) 0,0637, (O) 0,0816, () 0,0947, (x) 0,1341, (*) 0,2041, (+) 0,2449.

La figure 2.9 montre clairement que le rendement dépend du débit relatif Q^* et de la hauteur relative amont y_1 . En outre, cette figure montre que le rendement est élevé pour les petits y_1 et faible pour les grands y_1 . Autrement dit pour le même diamètre D , le ressaut dans un canal profilé en "U", dissipe mieux l'énergie pour les petites ouvertures que pour les grandes.

II.2.5. Profil de surface généralisé du ressaut

Comme pour le ressaut rectangulaire, l'expérimentation a permis de définir le profil de la surface libre du ressaut depuis son origine jusqu'à sa section finale dans un canal profilé en "U".

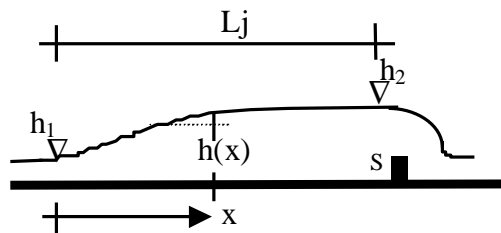


Figure 2.10 : Profil de surface du ressaut

Comme le montre le schéma simplifié de la figure 2.10, la coordonnée longitudinale x est telle que $0 \leq x \leq L_j$, tandis que la profondeur $h(x)$ est telle que $h_1 \leq h(x) \leq h_2$; h_1 et h_2 sont les hauteurs conjuguées du ressaut.

Les paramètres x et $h(x)$ peuvent servir à composer les variables adimensionnelles y et X , en écrivant que $y = (h(x) - h_1)/(h_2 - h_1)$ et $X = x/L_j$, les variables adimensionnelles y et X sont telles que $0 \leq y \leq 1$ et $0 \leq X \leq 1$.

La variation du rapport y en fonction du rapport X est représentée à la figure 2.12. Cette figure montre à la fois les points de mesures expérimentales et la courbe tracée par application de la relation :

$$y = \sin (1,5.X) \quad (2.11)$$

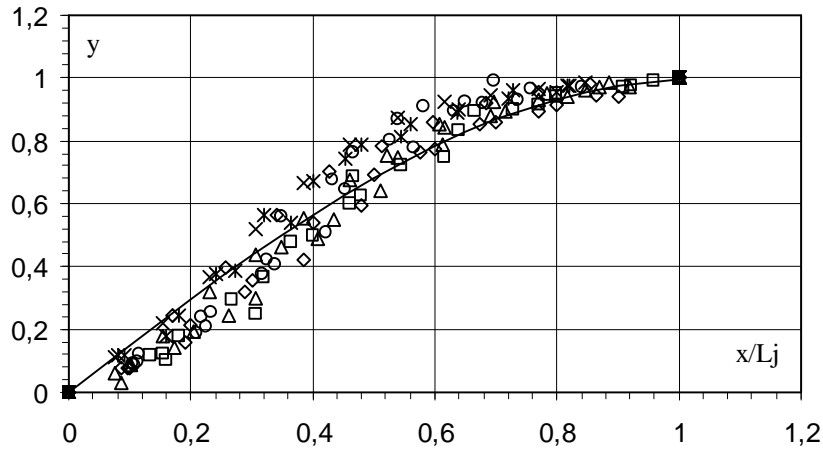


Figure 2.11 : Profil de surface généralisé du ressaut contrôlé dans un canal profilé en "U", pour différentes hauteurs initiales h_1 : (◇) 2, (Δ) 2.32, (×) 3.3, (○) 5, (□) 6. (3/4) courbe selon l'équation $y = \sin (1,5.X)$.

La figure 2.11 montre que le nuage de points issu de l'expérimentation peut être représenté par la relation (2.11) .

II.3. Conclusion

Ce chapitre a abordé en premier lieu l'approche de HAGER de 1987 et son complément de 1989. Le ressaut hydraulique dans un canal profilé en "U" est présenté. Il a été montré qu'il existe quelques petites différences entre l'écoulement dans un canal profilé en "U" et un canal de forme circulaire. Plusieurs profils de surfaces sont discutés. Il a été trouvé que la longueur relative de ressaut hydraulique est $L_j/h_2=6\pm 1$. L'auteur a montré que pour une petite profondeur relative y_1 , un fond de séparation distinct apparaît. Beaucoup de zones d'écoulement sont décrites et les distributions des vitesses axiales sont présentées. Pour des valeurs de y_1 assez grandes, l'écoulement est assimilable à un ressaut dans un canal rectangulaire.

En deuxième lieu ce chapitre a traité le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince en canal profilé en "U". L'approche de Debabeche et Achour (2000) a été proposée.

L'étude a été consacrée à la détermination par voie expérimentale des caractéristiques essentielles intervenant dans un ressaut contrôlé par seuil à paroi mince en canal profilé en "U".

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation de la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$ en fonction du débit relatif Q^* , pour sept valeurs distinctes de y_1 . Les mesures expérimentales vérifient bien les courbes théoriques.

L'expérimentation a eu en outre pour objectif, d'évaluer la variation de la longueur relative L_j/h_2 en fonction de F_1 . Il a été montré que la valeur $L_j/h_2 \cong 6$ trouvée par Hager (1987) a été également trouvée par Debabeche et Achour (2000), mais uniquement pour une valeur de la hauteur relative $y_1=0,2449$.

L'étude a abordé ensuite la relation $y_2= f(y_1,S)$. Les points de mesures s'ajustent parfaitement autour de la première bissectrice. Une relation liant y , y_1 et S a été ensuite déduite de cette dernière.

L'analyse des mesures expérimentales a également montré qu'un ajustement linéaire avec une très bonne corrélation a permis d'obtenir une relation unique entre la hauteur relative s/h_1 du seuil et le nombre de Froude F_1 .

Une relation unique a également été trouvée entre la position relative x/h_1 du seuil, le rapport y des hauteurs conjuguées et la hauteur relative amont y_1 .

CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

A travers six (02) chapitres, nous avons passé en revue les travaux les plus intéressants, concernant le ressaut hydraulique en canal de section droite profilé en U .

Le premier chapitre a abordé l'approche de HAGER (1987 et 1989). Le ressaut hydraulique dans un canal en forme de "U" est décrit. Concernant le rapport des hauteurs conjuguées, de petites différences entre l'écoulement dans un canal en forme de "U" et un canal de forme circulaire sont trouvées, plusieurs profils de surfaces sont discutés.

La longueur relative de ressaut hydraulique est approximativement $L_j/h_2=6\pm 1$.

Le résultat le plus intéressant concerne le phénomène interne du ressaut. Pour une petite profondeur relative y_1 , un fond de séparation distinct apparaît.

Beaucoup de zones d'écoulement sont décrites et les distributions des vitesses axiales sont présentées. Pour y_1 grand, l'écoulement ressemble à un ressaut dans un canal rectangulaire.

Le second chapitre de cette première partie a concerné le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince en canal profilé en "U". Deux approches ont été proposées, l'approche de Debabeche et Achour (2000) et celle de Debabeche (2003).

La première approche a été consacrée à l'évaluation par voie d'expérimentation des caractéristiques essentielles intervenant dans un ressaut contrôlé par seuil à paroi mince en canal profilé en "U".

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation de la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$ en fonction du débit relatif Q^* , pour sept valeurs distinctes de y_1 . Sept nuages de points distincts, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la hauteur relative y_1 ont été trouvés.

Dans un second temps l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer la variation de la longueur relative L_j/h_2 en fonction de IF_1 . En effet Hager (1987) montre que ce rapport est approximativement égal à 6. Cette même valeur a été également trouvée pour le cas d'un ressaut rectangulaire, seulement l'auteur précise que l'effet de h_1/D sur la longueur relative L_j/h_2 du ressaut, n'a pas été défini.

Dans l'évaluation de la variation de cette même longueur relative L_j/h_2 en fonction de IF_1 , Debabeche et Achour (2000) ont trouvé sept nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la hauteur relative y_1 , montrant l'influence de celle-ci sur la longueur relative L_j/h_2 du ressaut.

En effet, selon la description de Debabeche et Achour (2000), deux configurations distinctes du ressaut sont visibles, l'une est dans la partie demi-circulaire du canal et l'autre se forme

dans sa partie "U". La partie amont du ressaut en "U" est caractérisée par une forte turbulence, présentant un jet à grande vitesse projeté en l'air vers l'aval. Ce jet n'est perceptible que pour les ressaut évoluant dans la partie "U" du canal ($y_2 > 0,5$).

Les observations montrent que le ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en "U", présente un rouleau de surface et un rouleau de fond. Ces constatations ne sont que qualitatives, il est nécessaire de les confirmer quantitativement par une étude des vitesses.

Des relations fonctionnelles en termes adimensionnels, liant les caractéristiques du ressaut hydraulique pour différentes ouvertures ont été trouvées.

INTRODUCTION À LA DEUXIEME PARTIE

Notre étude se propose d'examiner par voie expérimentale le ressaut contrôlé par seuil en canal profilé en "U" à fond rugueux.

L'étude bibliographique montre que les caractéristiques adimensionnelles essentielles, intervenant au phénomène du ressaut, dans un canal profilé en "U", sont le nombre de Froude IF_1 ou le débit relatif Q^* , la hauteur relative amont $y_1=h_1/D$ (h_1 est la hauteur au pied du ressaut, D est la largeur du canal), la hauteur relative aval $y_2=h_2/D$ (h_2 est la hauteur maximale mesurée à l'aval du ressaut) et le rapport $y=h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut.

L'objectif principal de cette étude est d'expérimenter le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal profilé en 'U' à fond rugueux. une rugosité équivalente sera alors testée : $\varepsilon =5,63\text{mm}$. Des relations fonctionnelles, en termes adimensionnels, liant les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'effet de la rugosité du fond, seront proposées.

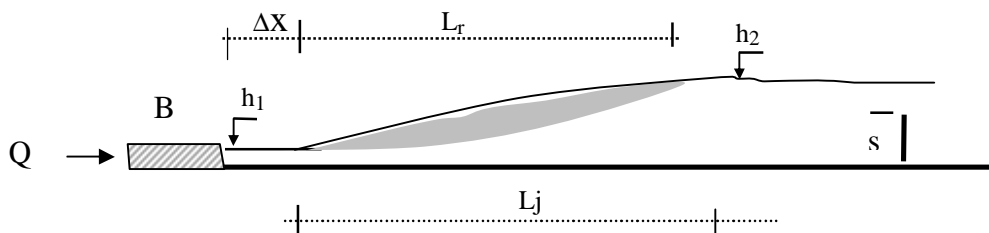
Cette présente partie expérimentale, sera divisée en quatre chapitres : position du problème, protocole expérimental, description des essais et résultats expérimentaux.

Les tableaux de mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes, seront présentés en annexe.

I. POSITION DU PROBLÈME

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

En effet, Pour une hauteur initiale h_1 fixe, l'accroissement du débit entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation de sa longueur de rouleau L_R . La distance Δx sur laquelle le ressaut s'étend augmente également et pour ramener celui-ci dans sa position initiale, c'est à dire à environ 5 cm de la sortie du convergent, le premier seuil de hauteur s doit être surélevé. Ainsi à chaque valeur du nombre de Froude IF_1 ou du débit relatif Q^* , correspond une longueur L_j du ressaut et L_r du rouleau, ainsi qu'une hauteur h_2 à l'aval du ressaut et une hauteur s du seuil (figure 1.1).



Figur1.1: Ressaut contrôlé par seuil mince. h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, L_r longueur du rouleau de surface, Δx distance séparant la boîte en charge B du pied du ressaut, B boîte en charge.

L'objectif principal de cette étude est d'expérimenter le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal profilé en 'U', en faisant varier la rugosité du fond.

En effet, des relations fonctionnelles, en terme adimensionnels, liant les différentes caractéristiques du ressaut pour rugosités équivalentes de fond du canal : $\varepsilon = 5,63\text{mm}$, seront proposées.

Les caractéristiques adimensionnelles du ressaut, concernées par cette étude sont les suivantes :

- le nombre de Froude IF_1 ;
- le débit relatif Q^* ;
- la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil à paroi mince.
- la longueur relative L_j/h_1 du ressaut

- la longueur relative L_j/h_2 du ressaut
- la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$
- la hauteur relative amont $y_1 = h_1/D$
- la rugosité relative ε/D

Il est nécessaire de noter que le régime d'écoulement de toutes les expérimentations réalisées, se situe dans le domaine du turbulent de transition.

II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

II.1. Description du modèle

Le canal de mesure qui nous a servi de banc d'essai (photo. 2.1) est constitué essentiellement d'une rigole demi-circulaire en 'pvc' de 5,67 m de longueur sur laquelle est fixée latéralement, d'un côté une tôle en aluminium de 0,50 m de hauteur et de l'autre côté une série de 7 panneaux transparents en Plexiglas permettant les prises de vues et observations. Ces panneaux sont reliés entre eux par collage au chloroforme. Le tout est fixé par boulonnage à une structure métallique rigide. L'étanchéité est assurée par des joints en caoutchouc et par de la silicone.



Photo. 2.1 : Photographie du canal ayant servi à l'expérimentation.

Le fond du canal est parfaitement horizontal (de pente nulle). Un bassin d'alimentation est relié au canal par le moyen d'une conduite circulaire de 115 mm de diamètre. Celle-ci est reliée à une boîte (Photo. 2.2a) métallique fermée, sur laquelle est insérée une ouverture à paroi plane (photo. 2.2b) en tôle de largeur déterminée débouchant dans le canal (figure 2.1). Le rôle de cette paroi est de générer un écoulement incident à grande vitesse. La section de sortie de celle-ci est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale h_1 du ressaut.

Le réglage des débits volumes s'effectue par manipulation de la vanne et sont mesurés à l'aide d'un débitmètre à affichage numérique.

L'alimentation du canal s'effectue par le moyen d'une pompe (photo. 2.2d) débitant jusqu'à 44 l/s. Le canal de mesure a été conçu au laboratoire d'hydraulique de l'Université de Biskra.

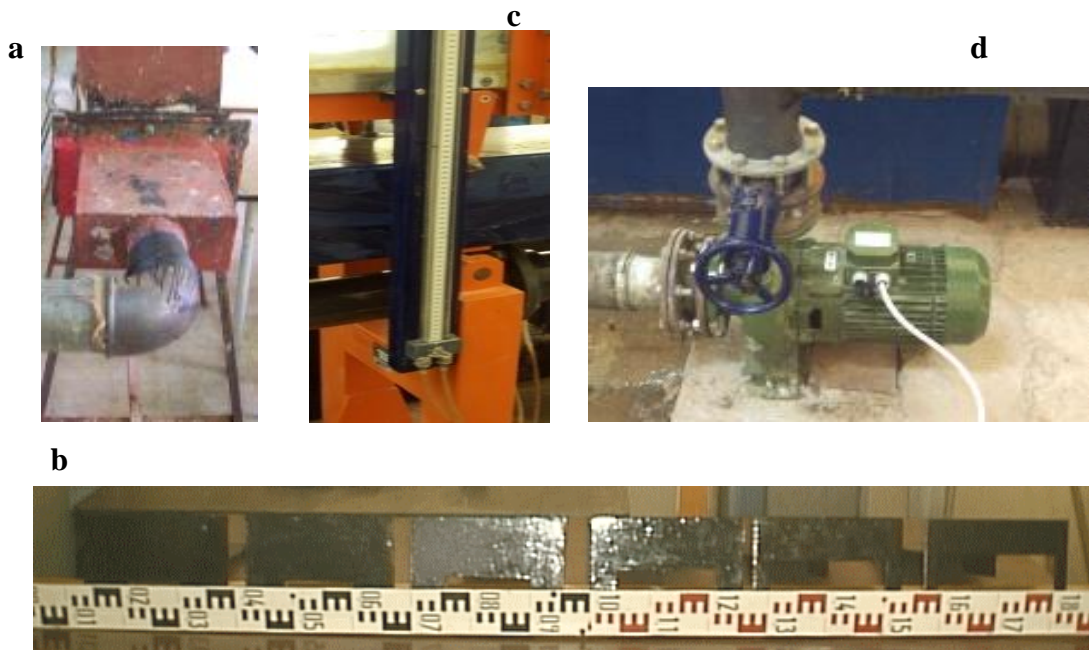


Photo 2.2 : a) Boîte en charge. b) Série d'ouvertures. c) Manomètre différentiel. d) Pompe.

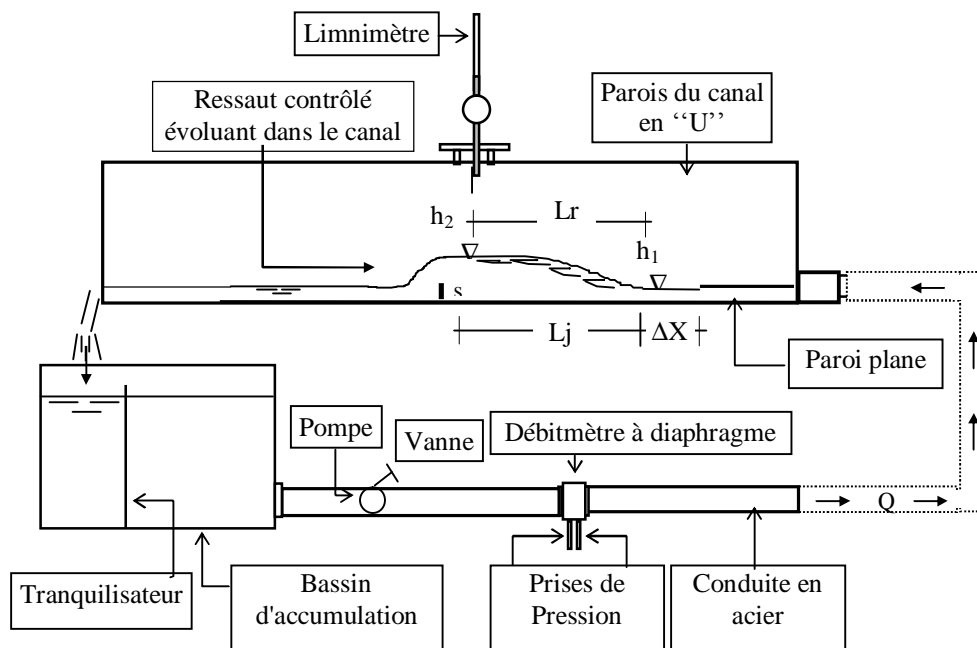


Figure 2.1 : Schéma de l'installation ayant servi à l'expérimentation..

II.2. Appareillage utilisé

II.2.1. Débitmètre à affichage numérique

Le débitmètre à affichage numérique est un dispositif permettant d'afficher les valeurs des débits volumes en l/s. serviront aux calculs des relations adimensionnelles

II.2.2. Limnimètre

À 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 (photo. 2.3).

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.

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



Photo 2.3 : Limnimètre



Photo 2.4 : Une série de tamis placés sur un vibreur.



Photo 2.5: Palmer numérique

II.2.3. Tamiseuse

Afin d'obtenir la rugosité équivalente : 5.63 mm, nous avons procédé au tamisage du sable de concassage au moyen d'une tamiseuse (Photo 2.4).

II.2.4. PALMER

Pour mesurer la hauteur des aspérités des particules de sable près-tamisées, étalées et collées, nous avons utilisé un Palmer à affichage digital (Photo 2.5).

III. Description des essais

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut contrôlé par seuil à paroi mince dans un canal profilé en "U", à fond demi-circulaire rugueux. (Photo 2.1).

L'expérimentation a été menée sous quatre hauteurs initiales ($h_1(\text{cm}) = 2.3, 3.40, 5.20, 6.10$). Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue ($2,3 < IF_1 < 20$).

Des seuils de différentes hauteurs s ont été testés (Photo3.1), afin d'observer leur influence sur le contrôle du ressaut ; treize seuils ont ainsi été confectionnés, dont la hauteur s varie entre 3,5 cm et 13,5 cm.



Photo 3.1 : Série de seuils minces ayant servi au contrôle du ressaut.

Pour une hauteur s et une position x du seuil et pour une hauteur h_1 de l'écoulement incident, l'augmentation du débit volume Q , provoque l'apparition d'un ressaut . Le couple de valeur (Q, h_1) permet en outre le calcul du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident. L'accroissement de IF_1 entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation de sa longueur de ressaut L_j . La distance Δx sur laquelle le ressaut s'étend augmente également et pour ramener celui-ci dans sa position initiale, c'est à dire à environ 5 cm de la sortie du convergent, le seuil de hauteur s doit être surélevé. Ainsi à chaque valeur du nombre de Froude IF_1 correspond une valeur de la longueur L_j de ressaut et une valeur de la hauteur s du seuil.

Un échantillon constitué d'une quarantaine de points de mesures expérimentales, pour chaque caractéristique, a permis ainsi d'aboutir à des résultats significatifs. Ces paramètres sont : le débit Q , la hauteur initiale h_1 , la hauteur finale h_2 , la hauteur s du seuil, la longueur L_r du rouleau de surface et la longueur L_j du ressaut, compté à partir du début du ressaut.

Ceux-ci permettent de composer les produits adimensionnels suivants :

Ø le débit relatif Q^* ou le nombre de Froude incident IF_1 ,

$$IF_1 = \sqrt{\frac{Q^2 D \sin a}{g \left[\frac{D^2}{4} (a - \sin a \cos a) \right]^3}}$$

$$IF_1 = \frac{8Q^* \sqrt{\sin a}}{(a - \sin a \cos a)^{3/2}} \quad (3.1)$$

$$a(rd) = \arccos(1 - 2y_1)$$

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

Ø la hauteur relative amont $y_1 = h_1/D$,

Ø la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$,

Ø le rapport $y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut.

Ø la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil,

Ø la longueur relative Lj/h_1 du ressaut,

Ø la longueur relative Lj/h_2 du ressaut.

Ø la rugosité relative ε/D du fond du canal.



Photo3.2 : Ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en U à fond rugueux.

a) Vue à l'amont du ressaut. b) Vue à l'aval du ressaut

III.1. Mode de préparation de la rugosité utilisée

Afin d'obtenir un fond demi-circulaire rugueux, avec une répartition uniforme de la rugosité, nous avons procédé selon les étapes suivantes :

- Le tamisage du sable ou gravier de granulométrie différente est effectué par le moyen d'un appareil électrique composé par plusieurs tamis de différent diamètres normalisés
- variant entre 5 et 12,5 mm (photo 3.3,a), avec des temps de tamisage bien fixés en relation avec la gamme de gravier à tamiser (moins de 5 minutes) .
- Après l'obtention de la gamme de gravier voulue, ce dernier est lavé puis séché.
- La gamme choisie, varie entre 5 et 12,5 mm selon le refus du tamis normalisé. Les particules obtenues sont ensuite uniformément réparties sur une toile en plastique , puis collées par le moyen d'une colle forte (Becta 10000)
- A la fin de la préparation de la toile rugueuse, nous estimons la valeur de la rugosité équivalente par un appareil de mesure dit : "PALMER NUMERIQUE" , de précision 1/1000
- Enfin, les rugosités équivalentes obtenues sont : $\epsilon = 5,63\text{mm}$,

a)



b)



Photo 3.3 : a) échantillon de grains de gravier de rugosité équivalente $\epsilon = 5,63\text{mm}$
b) Grains de gravier répartis uniformément sur le fond du canal.

IV.1. CANAL PROFILE EN 'U' A FOND RUGUEUX (ϵ/D) = 0,023)

IV.1.1. HAUTEUR RELATIVE AVAL y_2 EN FONCTION DU DEBIT RELATIF Q^*

La figure 4.1 représente la variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction du débit relatif Q^* du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal à fond rugueux, de rugosité relative $\epsilon/D=0,023$ ($\epsilon=5,63$ mm), pour 04 valeurs distinctes de y_1 .

Comme pour le ressaut en canal à fond lisse, quatre allures de points de mesures sont visibles, correspondant chacune à une hauteur relative fixe de y_1 . Les traits continus illustre la courbe théorique issue de l'équation de quantité de mouvement pour les quatre valeurs de y_1 : 0.0939, 0.1388, 0.2122 et 0,2489.

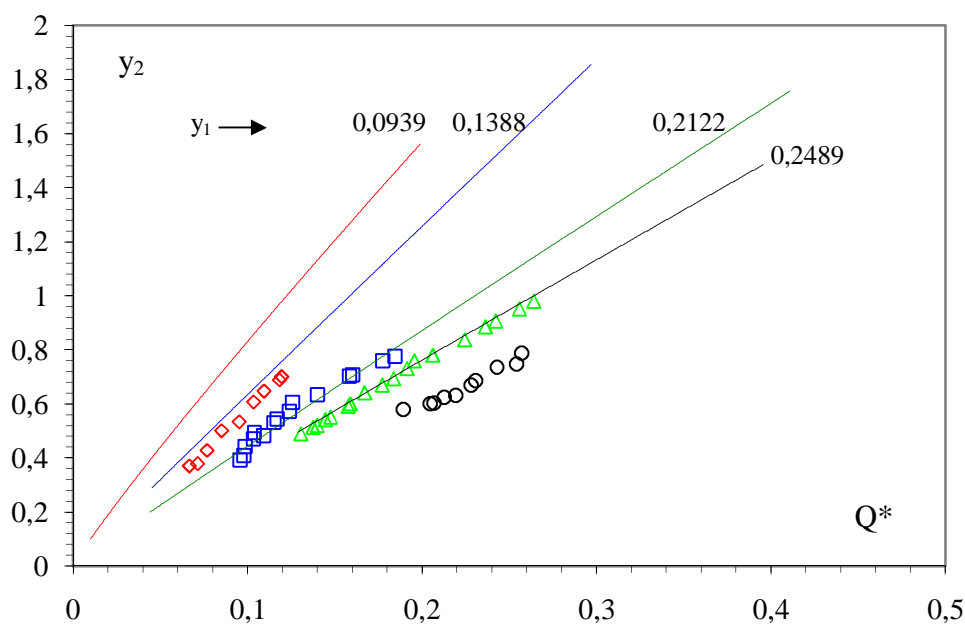


Figure 4.1: Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction du débit relatif Q^* . les motifs colorés vides représentent les points de mesures expérimentales. (34) Courbe théorique selon l'équation de la quantité de mouvement, pour les quatre valeurs de y_1 : 0.0939, 0.1388, 0.2122 et 0.2489

En remarque en premier lieu que l'augmentation du de débit relatif Q^* entraîne celle de la hauteur relative aval et que l'influence de la hauteur relative amont y_1 est perceptible. On constate que pour le même nombre de débit relatif Q^* , y_2 augmente avec l'augmentation de y_1 . Cette figure montre que les points de mesures du ressaut contrôlé à fond rugueux se situent bien au-dessous des courbes théoriques (rugosité nulle).

La figure 4.2 illustre quatre allures, correspondant chacune à une valeur bien connue de y_1 . Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés du ressaut contrôlé à fond rugueux.

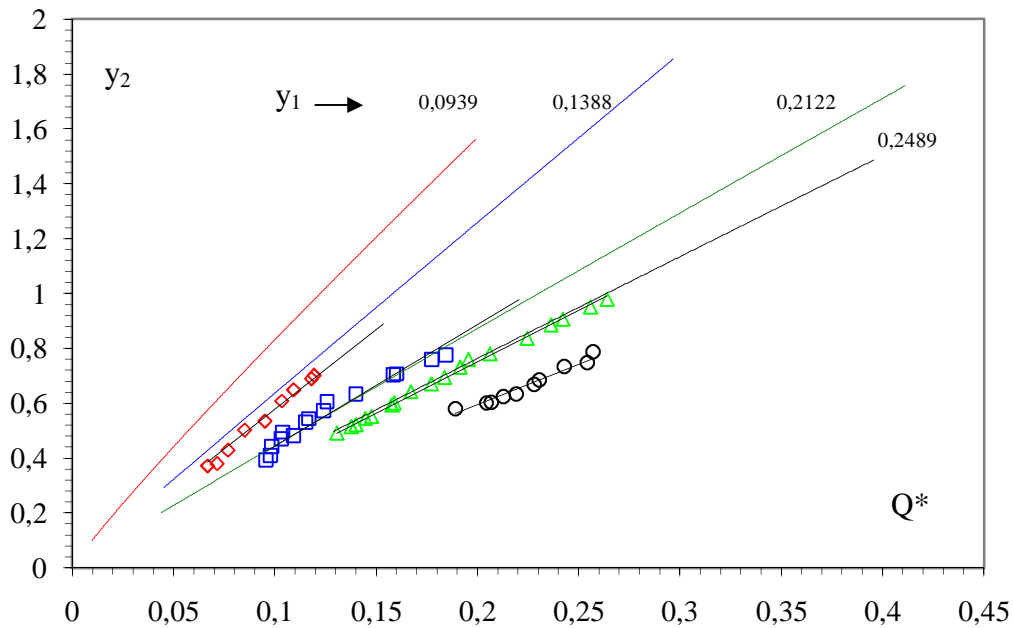


Figure 4.2: Ressaut contrôlé en canal à fond rugueux. Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction du débit relatif Q^* , pour les quatre valeurs de y_1 : ($\hat{\Delta}$) 0,0939, (\square) 0,1388, (Δ) 0,2122 et (\circ) 0,2489. ($\frac{3}{4}$) courbes d'ajustement

L'analyse des points de mesures expérimentales, montre que pour chaque valeur de y_1 , un ajustement de type linéaire est possible de la forme : $y_2 = a_2 Q^*$

Le tableau 4.1 regroupe les valeurs des coefficients de a_2

Tableau 4.1 : Coefficients a_2 des courbes d'ajustement

h_1 (cm)	$y_1 = h_1/D$	Coefficient a_2	R^2
2,3	0,0939	5,78	0,9811
3,4	0,1388	4,44	0,9600
5,2	0,2122	3,76	0,9984
6,1	0,2490	2,97	0,9606

Le tableau 4.1 montre la diminution progressive du coefficient a_2 avec l'augmentation de la hauteur relative amont y_1 . L'ajustement statistique des couples des valeurs (y_1, a_2) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire d'équation :

$a_2 = -16,13y_1 + 7,02$. celle-ci est illustrée par la figure 4.3

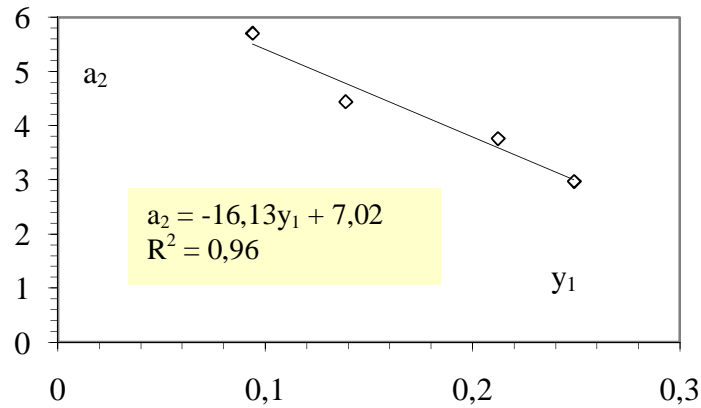


Figure 4.3 : Variation du coefficient a_2 en fonction de la hauteur relative aval y_1

En effet, en remplaçant le coefficient a_2 par son expression dans la relation $y_2 = a_2 Q^*$, l'équation liant la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$ au nombre de débit relatif Q^* et à la hauteur relative amont y_1 devient :

$$y_2 = (-16,13 y_1 + 7,02) Q^* \tag{4.1}$$

pour $0,0939 \leq y_1 \leq 0,2489$.

La figure 4.4 montre que la relation $y_2 = f(Q^*, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ses derniers suivent parfaitement la première bissectrice.

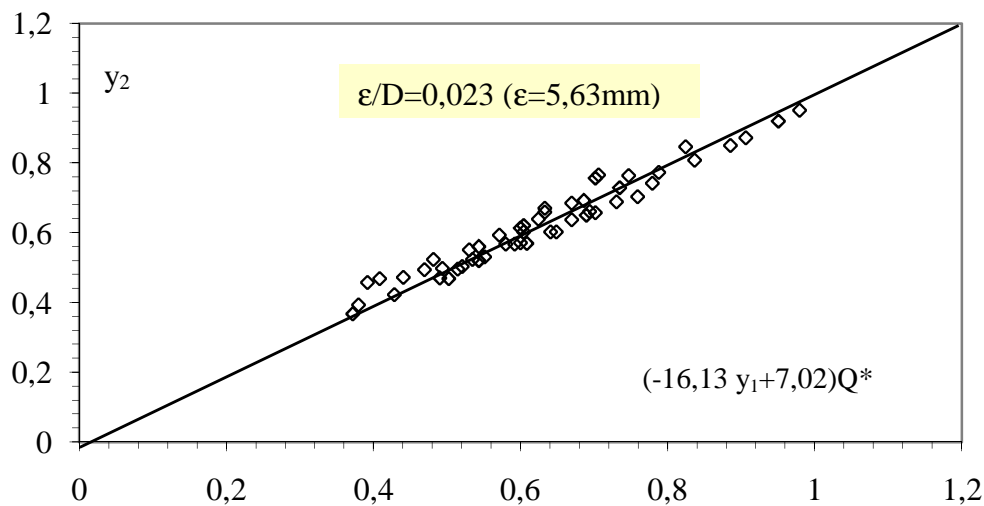


Figure 4.4 : Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction de (y_1, Q^*) . (0) Points expérimentaux du ressaut contrôlé en canal profilé à fond rugueux de rugosité relative $e/D = 0,023$ (3/4) Première bissectrice d'équation : $y_2 = (-16,13 y_1 + 7,02) Q^*$

IV.1.2. Hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$ en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil

La figure 4.5 montre la représentation graphique de la variation de y_2 en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal à fond rugueux, pour quatre valeurs distinctes de y_1 .

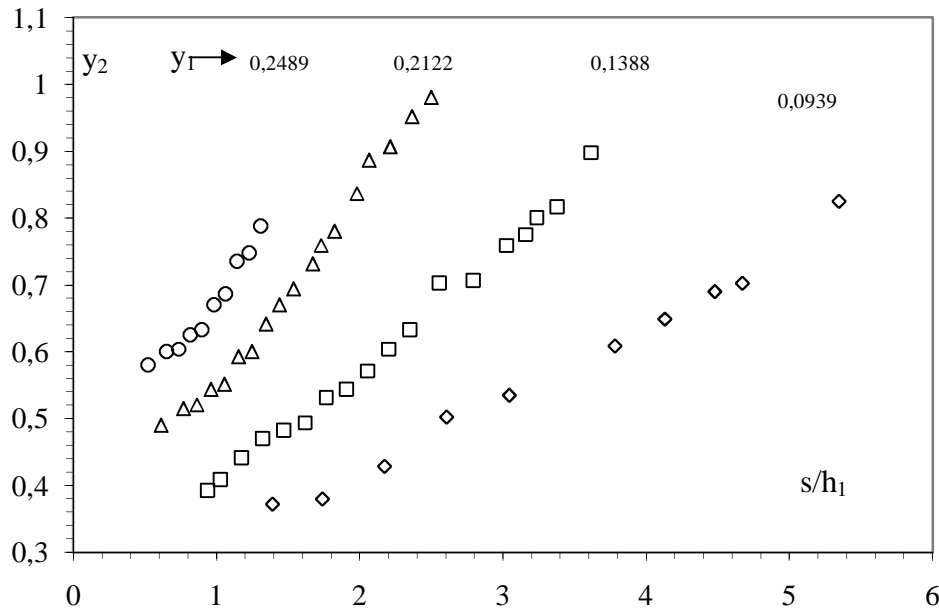


Figure 4.5 : Variation de la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$ en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil, pour quatre valeurs distinctes de y_1 . Les motifs noirs vides représentent les points de mesures expérimentales.

Cette figure montre que les points de mesures du ressaut contrôlé à fond rugueux sont distincts, pour les quatre valeurs de y_1 . En outre, l'augmentation de la hauteur relative S du seuil entraîne celle de la hauteur relative aval y_2 . On remarque également que pour une même valeur de S , y_2 augmente avec l'augmentation de y_1 .

Par ailleurs l'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal à fond rugueux, montre que pour chaque valeur de y_1 une courbe de type exponentielle est possible de la forme $y_2 = c_2 \exp(d_2 \cdot s/h_1)$ la figure 4. 6le montre bien.

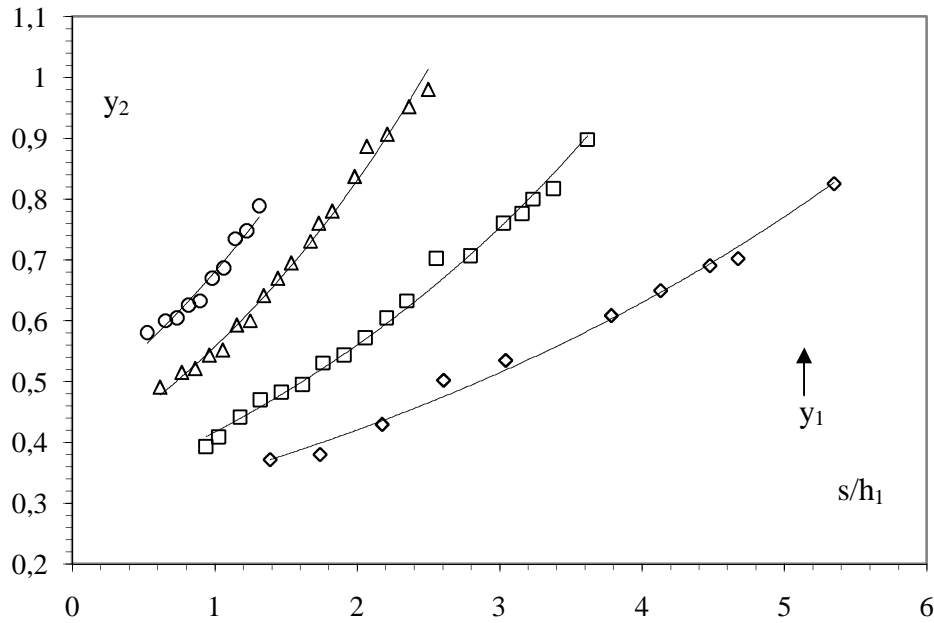


Figure 4.6 : Ressaut contrôlé en canal profilé en U à fond rugueux. Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil, pour quatre valeurs différents de y_1 : (Δ) 0,0939, (□) 0,1388 (◇) 0,2122 et (○) 0,2489. (3/4) Courbes d’ajustements

Le tableau 4.2 regroupe les valeurs des coefficients c_2 et d_2 .

Tableau 4.2 : Coefficients c_2 et d_2 des courbes d’ajustements

$h_1(\text{cm})$	$y_1 = h_1/D$	Coefficient c_2	Coefficient d_2	R^2
2,3	0,0939	0,280	0,2026	0,989
3,4	0,1388	0,3091	0,2967	0,9915
5,2	0,2122	0,3739	0,3989	0,9928
6,1	0,2490	0,4562	0,3991	0,9617

Le tableau 4.2 montre l'augmentation progressive du coefficient c_2 avec de la hauteur relative amont y_1 . L'ajustement statistique des couples des valeurs (c_2, y_1) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type exponentielle : $c_2 = 0,21\exp(3,03y_1)$ la figure 4.7 la ,montre bien.

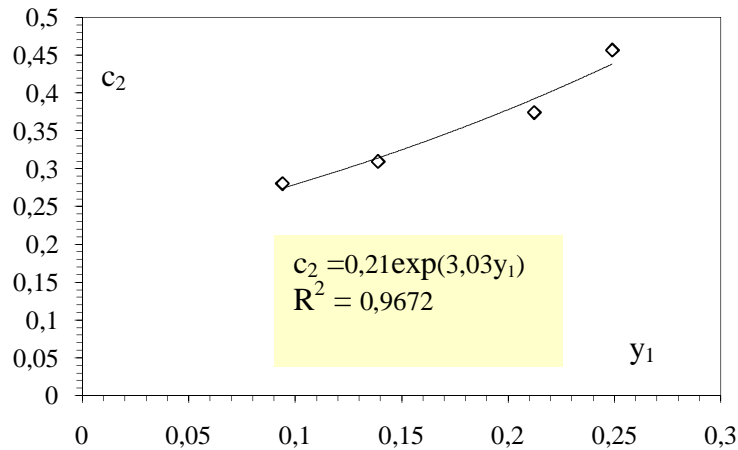


Figure 4.7 : Variation du coefficient c_2 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

Un ajustement des couples des valeurs (d_2 , y_1) du tableau 4.2 donne avec une bonne corrélation, la relation de type puissance suivante: $d_2 = 1,16y_1^{0,72}$. Cette équation est présentée à la figure 4.8.

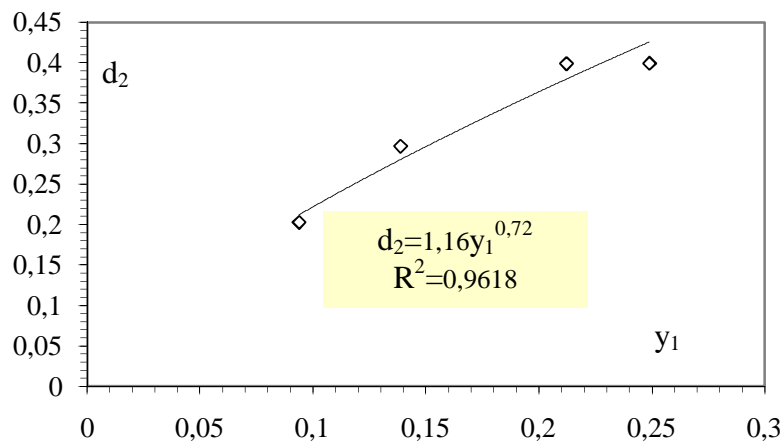


Figure 4.8 : Variation du coefficient d_2 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

En remplaçant les coefficients c_2 et d_2 par leurs expressions respectives dans la relation $y_2 = c_2 \exp(b_2.s/h_1)$, l'équation liant la hauteur relative aval y_2 à la hauteur relative S du seuil et à la hauteur relative amont y_1 devient :

$$y_2 = 0,21 \exp(3,03y_1) \cdot \exp(1,16y_1^{0,72} \cdot s/h_1) \tag{4.2}$$

avec $0,0939 \leq y_1 \leq 0,2489$.

La figure 4.9 montre que la relation $y_2 = f(S, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice.

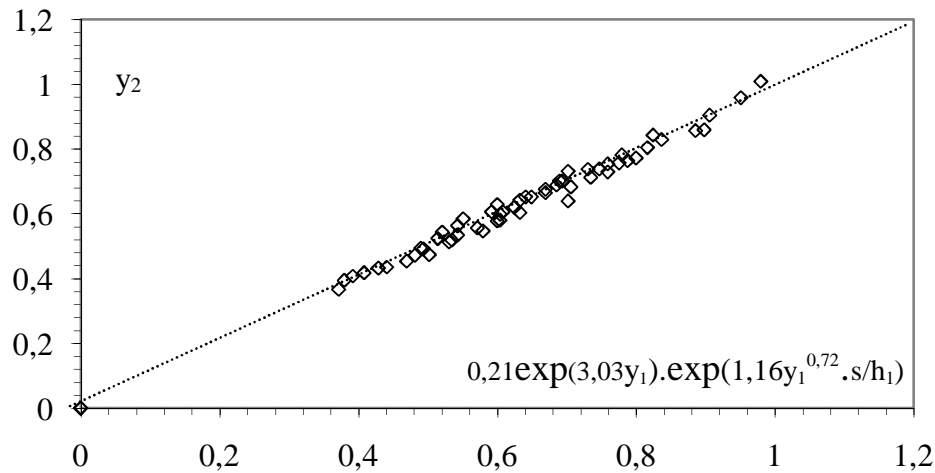


Figure 4.9 : Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction de $f(S, y_1)$. (à) Points de mesure expérimentales du ressaut contrôlé en canal profilé en U de rugosité relative $e/D=0,023$. (3/4) Première bissectrice d'équation: $y_2=0,21\exp(3,03y_1).\exp(1,16y_1^{0,72}).s/h_1$

IV.2.3. LONGUEUR RELATIVE L_j/H_1 DU RESSAUT EN FONCTION DU DEBIT RELATIF Q^*

La figure 4.10 illustre la variation de la hauteur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* , pour quatre valeurs distinctes de la hauteur relative amont y_1 . Les motifs vides noirs et vides colorés représentent les points de mesures expérimentales, respectivement du ressaut 'à fond lisse' et du ressaut 'à fond rugueux'. Il ressort de cette figure, que les points de mesures du ressaut 'à fond lisse' se situent bien au-dessus de ceux du ressaut 'à fond rugueux'.

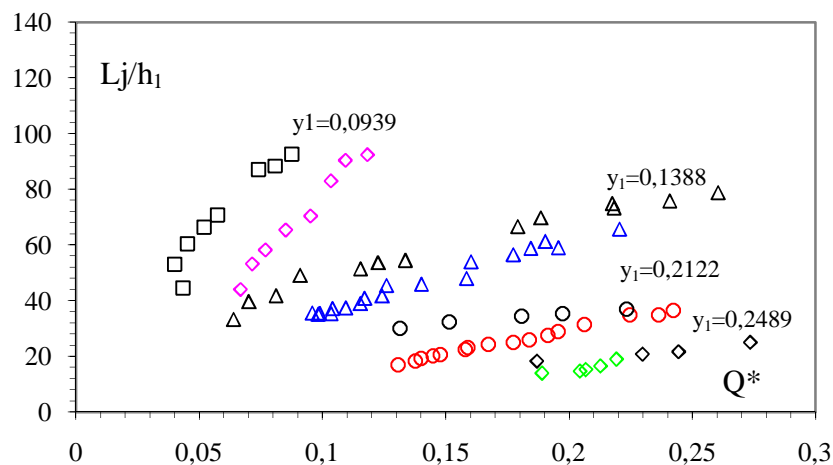


Figure 4.10 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* , pour quatre valeurs distinctes de y_1 . Les motifs colorés vides représentent les points expérimentaux du ressaut contrôlé en canal à fond rugueux. Les motifs vides noirs représentent le ressaut contrôlé à fond lisse.

nous pouvons conclure que pour $0,0939 \leq y_1 \leq 0,2489$, la longueur du ressaut contrôlé en canal à fond rugueux est plus petite que celle du ressaut contrôlé en canal à fond lisse.

CONCLUSION A LA DEUXIEME PARTIE

Nous avons abordé dans cette étude, une analyse expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal profilé en "U", à fond demi-circulaire rugueux. Rugosités équivalentes ont été testées : $e = 5,63\text{mm}$. Pour des rugosités équivalente étudiées, l'expérimentation a été menée sous quatre ouvertures de hauteurs: $2,3\text{ cm} \leq h_1 \leq 6,1\text{cm}$ et vingt et un seuils de hauteurs: $3,2\text{ cm} \leq s \leq 13,5\text{ cm}$ une large gamme de débits volumes et de débit relatifs a été obtenue.

Dans un premier temps nous avons analysé la variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction du débit relatif Q^* , pour quatre ouvertures distinctes de y_1 . quatre nuages de points distincts, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la hauteur relative amont y_1 sont trouvés, montrant ainsi l'influence de la hauteur initiale h_1 . en outre pour le même nombre du débit relatif Q^* , la hauteur relative aval y_2 augmente avec l'augmentation de la hauteur relative amont y_1 . Par ailleurs, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé à fond rugueux, pour rugosité testée montre qu'un ajustement linéaire est possible entre y_2 et Q^* .

L'étude expérimentale a permis d'évaluer dans un deuxième temps, la variation de la hauteur relative S du seuil, pour quatre ouverture distinctes de y_1 , montrant aussi l'influence de la hauteur relative amont h_1 . En outre, l'augmentation de la hauteur relative S du seuil entraîne celle de la hauteur relative aval y_2 . On remarque également que pour une même valeur de S , y_2 augmente avec l'augmentation de y_1 . L'analyse statistique des mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal profilé en U 'à fond rugueux', par la méthode des moindres carré, a permis d'aboutir, avec une bonne corrélation, à une équation de type exponentielle liant S , y_2 et y_1 pour des rugosités étudiées.

Par ailleurs, nous avons montré, la variation de la hauteur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de débit relatif Q^* , pour les deux configurations de ressaut, à savoir :le ressaut 'à fond rugueux' et 'à fond lisse' pour quatre valeur distinctes de la hauteur relative amont y_1 . Il ressort que pour $0,0939 \leq y_1 \leq 0,2489$, la longueur du ressaut contrôlé est plus petite que celle du ressaut à fond lisse pour rugosités équivalente testées.

CONCLUSION GENERALE

Notre étude a eu pour objet d'analyser expérimentalement le ressaut hydraulique évoluant dans canal profilé en U, à fond demi-circulaire rugueux deux parties ont été nécessaires: une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine , une deuxième partie qui à été consacré à une analyse purement expérimentale pour ce type de ressaut hydraulique à travers laquelle nous avons tenté de trouver des relations expérimentales pour du rugosité étudié.

La première partie a été divisée en deux chapitres :

Le premier chapitre a eu pour but de présenter l'approche de de HAGER (1978 et 1989). Concernant le ressaut hydraulique dans un canal profilé en " U " est décrit. Pour le rapport des hauteurs conjuguées , de petites différences entre l'écoulement dans un canal en forme de " U " et un canal de forme circulaire sont trouvées , plusieurs profils de surfaces sont discutés .

La longueur relative de ressaut hydraulique est approximativement égal à: $L_j/h_2 \cong 6 \pm 1$.

Le résultat le plus intéressant concerne le phénomène interne du ressaut .pour une petite ouverture relative amont y_1 , un fond de séparation distinct apparaît.

Beaucoup de zones d'écoulement sont décrites et les distributions de vitesses axiales sont présentées. Pour y_1 grand, l'écoulement ressemble à un ressaut dans un canal rectangulaire.

Le second chapitre de la partie bibliographique, a permis d'examiner le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à parois mince en canal profilé en " U ". Deux approches ont été proposées, l'approche de Debabeche et Achour (2000) et celle de Debabeche(2003).

La première approche a été consacrée à évaluer par voie expérimentale des caractéristiques essentielles intervenant pour un ressaut contrôlé par seuil à paroi mince en canal profilé en " U ".des relations fonctionnelles formulées en termes adimensionnels , liant ces caractéristiques ont été proposées. en outre , selon la description de Debabeche et Achour (2000) , deux configurations distinctes du ressaut sont visibles , l'une est dans la partie demi-circulaire du canal et l'autre se forme dans sa partie " U ".la partie amont du ressaut en " U " est caractérisée par une forte turbulence , présentant un jet à grande vitesse projeté en l'air vers l'aval. Ce jet n'est perceptible que pour les ressauts évoluant dans la partie " U " de canal ($y_2 > 0,5$).

L'approche de Debabeche (2003) a concerné le contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince et épaisse dans un canal profilé en " U ". le thème a été examiné de point de vue théorique et expérimentale .le développement théorique a pu trouver de manière explicite des relations fonctionnelles , liant la hauteur relative du seuil au débit relatif et à la hauteur relative aval , pour les deux types de seuils considérés .ces relations montrent facilement que la hauteur

géométrique du seuil à paroi épaisse est nettement inférieur à son homologue du seuil à paroi mince. L'étude a proposée une relation explicite de la hauteur relative du seuil à paroi épaisse dans un canal rectangulaire, en remplacement de l'équation fortement implicite de Forster et Skrinde(1957).

La deuxième partie de notre travail a concerné l'étude du ressaut évoluant en canal profilé en "U", à fond demi-circulaire rugueux. une rugosité équivalente sera alors testée: $\varepsilon = 5,63\text{mm}$. Les résultats obtenus par cette étude sont suivants:

Dans un premier temps nous avons analysé la variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction du débit relatif Q^* , pour quatre ouvertures distinctes de y_1 . quatre nuages de points distincts, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la hauteur relative amont y_1 sont trouvés, montrant ainsi l'influence de la hauteur initiale h_1 . en outre pour le même nombre du débit relatif Q^* , la hauteur relative aval y_2 augmente avec l'augmentation de la hauteur relative amont y_1 . par ailleurs, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé à fond rugueux, pour rugosité testée montre qu'un ajustement linéaire est possible entre y_2 et Q^* .

Dans un second temps l'étude expérimentale a permis d'évaluer, la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil, pour quatre ouverture distinctes de y_1 , montrant aussi l'influence de la hauteur relative amont h_1 . En outre, l'augmentation de la hauteur relative du seuil entraîne celle de la hauteur relative aval y_2 . On remarque également que pour une même valeur de la hauteur relative du seuil, la hauteur relative aval augmente avec l'augmentation de y_1 . L'analyse statistique des mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal profilé en "U" 'à fond rugueux', par la méthode des moindres carré, a permis d'aboutir, avec une bonne corrélation, à une équation de type exponentielle liant s/h_1 , y_2 et y_1 pour cette rugosité étudiée.

L'étude expérimentale montre enfin, la variation de la hauteur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de débit relatif Q^* , pour les deux configurations de ressaut, à savoir :le ressaut 'à fond rugueux' et 'à fond lisse' pour quatre valeur distinctes de la hauteur relative amont y_1 . Il ressort que pour $0,0939 \leq y_1 \leq 0,2489$, la longueur du ressaut contrôlé est plus petite que celle du ressaut à fond lisse pour chacun des trois rugosités équivalente testées.

A la fin de ce modeste travail, nous estimons que nous avons contribué à l'étude du ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en "U" à fond rugueux pour une rugosité testée, par ailleurs nous recommandons la poursuite d'études afin d'aboutir à une approche expérimentale générale incluant la rugosité relative régissant ce type de ressaut.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Achour, B., Dissipation d'énergie par ressaut, thèse d'état. Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil, 1998.
2. Achour, B., Debabeche, M., Ressaut contrôlé par seuil dans un canal profile en U. Journal of hydraulic research, Vol. 41 (02), pp. 97-103, 2003.
3. Bretz, N., V., Ressaut Hydraulique Forcé par seuil, Laboratoire de constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, Communication No.2, 1988.
4. Debabeche, M., Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie, 2003.
5. Debabeche, M., Achour, B., Ressaut hydraulique classique en canal profilé en "U". 1^{ER} Séminaire Sur L'eau, Université de Mascara, 2000.
6. Debabeche, M., Achour, B., Forced hydraulic jump in U-shaped channel. 29 Convegno di idraulica e C.I., Università di Trento, Italia, 2004.
7. Hager, W., H., Der Ablufss im U-Profil. Korrespondenz Abwasser 34(5) : 468-482, 1987.
8. Hager, W., H., Hydraulic jump in U-channel, Proc. ASEC, J. Hydraulic Engineering 115(5), 667-675, 1989.
9. Rajartnam, N., Hydraulic jumps on rough beds, Transaction of the engineering institute of Canada, Vol. 11, N° A-2, may 1968.
10. Rand, W., (1957) An approach to generalized design of stilling basins, Trans. New York Academy of Sciences, Vol. 20 (2), 173-191.

Tableau A1: Mesures expérimentale de base, du ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en "U" à fond rugueux

h_1 (mm)	Q(l/s)	Q*	$y_2=h_2/D$	$y_1=h_1/D$	s/ h_1	L_j/h_1	Re	e/ D_h	Dy/ y_2 (a)	Dy/ y_2 (b)
23	6,22	0,066787	0,37	0,0939	1,39	44,13	162922,96	0,055	1,01	1,03
23	6,66	0,071515	0,38	0,0939	1,74	53,26	174457,33	0,055	3,59	4,23
23	7,15	0,076835	0,43	0,0939	2,17	58,26	187433,49	0,055	1,31	1,21
23	7,92	0,085109	0,50	0,0939	2,61	65,43	207618,64	0,055	7,14	5,29
23	8,86	0,095157	0,53	0,0939	3,04	70,43	232129,17	0,055	2,06	2,51
23	9,63	0,103431	0,61	0,0939	3,78	83,04	252314,31	0,055	6,80	0,21
23	10,18	0,109341	0,65	0,0939	4,13	90,43	266732,28	0,055	7,80	1,08
23	11,00	0,118207	0,69	0,0939	4,48	92,39	288359,22	0,055	5,99	2,35
23	11,11	0,119389	0,70	0,0939	4,67	106,30	291242,81	0,055	6,80	4,81
23	14,30	0,153669	-	0,0939	5,35	111,74	374866,98	0,055	-	2,91
34	8,91	0,095748	0,39	0,1388	0,94	118,81	190539,98	0,074	14,41	4,23
34	9,13	0,098112	0,41	0,1388	1,03	126,31	195244,67	0,074	13,00	2,56
34	9,19	0,098703	0,44	0,1388	1,18	133,82	196420,85	0,074	6,60	1,04
34	9,63	0,103431	0,47	0,1388	1,32	141,32	205830,23	0,074	5,09	3,16
34	10,18	0,109341	0,48	0,1388	1,47	148,82	217591,96	0,074	7,88	1,66
34	9,68	0,104022	0,49	0,1388	1,62	156,33	207006,40	0,074	0,71	0,07
34	10,73	0,115252	0,53	0,1388	1,76	163,83	229353,68	0,074	3,71	3,07
34	10,89	0,117025	0,54	0,1388	1,91	171,33	232882,20	0,074	2,99	1,28
34	11,55	0,124117	0,57	0,1388	2,06	178,84	246996,27	0,074	3,71	2,28
34	11,72	0,125890	0,60	0,1388	2,21	186,34	250524,79	0,074	0,35	3,67
34	13,04	0,140075	0,63	0,1388	2,35		278752,94	0,074	5,54	4,16
34	14,74	0,158397	0,70	0,1388	2,56	193,84	315214,29	0,074	7,31	8,51
34	14,91	0,160170	0,71	0,1388	2,79	201,35	318742,81	0,074	7,80	2,84
34	16,50	0,177310	0,76	0,1388	3,03	208,85	352851,82	0,074	-	3,48
34	17,16	0,184403	0,78	0,1388	3,16	216,35	366965,89	0,074	-	1,95
34	18,21	0,195632	-	0,1388	3,24	223,86	389313,17	0,074	-	2,97
34	17,71	0,190313	-	0,1388	3,38	231,36	378727,62	0,074	-	0,92
34	20,52	0,220456	-	0,1388	3,62	238,86	438712,43	0,074	-	3,79

de rugosité équivalente $e = 5,63\text{mm}$.

Dy/ y_2 (a): l'erreur relative pour les mesures expérimentale de $y_2=f(Q^*)$.

Dy/ y_2 (b): l'erreur relative pour les mesures expérimentale de $y_2=f(s/h_1)$.

Tableau A1: Mesures expérimentale de base, du ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en "U" à fond rugueux de rugosité équivalente $e = 5,63\text{mm}$

$h_1(\text{mm})$	$Q(\text{l/s})$	Q^*	$y_2=h_2/D$	$y_1=h_1/D$	s/h_1	L_j/h_1	Re	e/D_h	$Dy/y_2(\text{a})$	$Dy/y_2(\text{b})$
52	12,16	0,012155	0,49	0,2122	0,62	17,02	207242,61	0,126	4,26	1,12
52	12,82	0,012815	0,51	0,2122	0,77	18,46	218495,60	0,126	3,84	2,10
52	13,04	0,013035	0,52	0,2122	0,87	19,23	222246,60	0,126	3,37	4,58
52	13,48	0,013475	0,54	0,2122	0,96	20,19	229748,59	0,126	4,24	4,05
52	13,75	0,013750	0,55	0,2122	1,06	20,71	234437,34	0,126	3,69	6,32
52	14,69	0,014685	0,59	0,2122	1,15	22,50	250379,08	0,126	4,28	2,67
52	14,80	0,014795	0,60	0,2122	1,25	23,08	252254,58	0,126	4,93	5,04
52	15,57	0,015565	0,64	0,2122	1,35	24,29	265383,07	0,126	6,53	2,01
52	16,50	0,016500	0,67	0,2122	1,44	25,00	281324,81	0,126	4,97	1,29
52	17,11	0,017105	0,69	0,2122	1,54	25,87	291640,05	0,126	4,96	1,34
52	17,82	0,017820	0,73	0,2122	1,67	27,42	303830,79	0,126	6,08	1,30
52	18,21	0,018205	0,76	0,2122	1,73	28,92	310395,04	0,126	7,90	0,36
52	19,20	0,019195	0,78	0,2122	1,83	31,44	327274,52	0,126	5,09	0,64
52	20,90	0,020900	0,84	0,2122	1,98	34,77	356344,75	0,126	3,59	0,59
52	22,00	0,022000	0,89	0,2122	2,07	34,75	375099,74	0,126	4,17	2,95
52	22,55	0,022550	0,91	0,2122	2,21	36,38	384477,24	0,126	3,97	0,21
52	23,82	0,023815	0,95	0,2122	2,37	38,37	406045,47	0,126	3,33	1,22
52	24,59	0,024585	0,98	0,2122	2,50	44,13	419173,96	0,126	3,10	3,42
61	17,60	0,017600	0,58	0,2490	0,52	14,02	275015,41	0,170	2,02	5,46
61	19,03	0,019030	0,60	0,2490	0,66	14,75	297360,41	0,170	2,33	3,43
61	19,25	0,019250	0,60	0,2490	0,74	15,25	300798,10	0,170	2,79	0,68
61	19,80	0,019800	0,62	0,2490	0,82	16,56	309392,34	0,170	2,30	0,51
61	20,41	0,020405	0,63	0,2490	0,90	18,93	318845,99	0,170	3,95	1,69
61	21,23	0,021230	0,67	0,2490	0,98	21,15	331737,34	0,170	2,32	0,47
61	21,45	0,021450	0,69	0,2490	1,07	21,48	335175,03	0,170	0,97	0,61
61	22,61	0,022605	0,73	0,2490	1,15	21,89	353222,92	0,170	0,68	2,77
61	23,65	0,023650	0,75	0,2490	1,23	24,34	369551,96	0,170	2,16	0,96
61	23,93	0,023925	0,79	0,2490	1,31	26,80	373849,07	0,170	2,00	2,76

Dy/y_2 (a): l'erreur relative pour les mesures expérimentale de $y_2=f(Q^*)$.

Dy/y_2 (b): l'erreur relative pour les mesures expérimentale de $y_2=f(s/h_1)$.