

IV.1. INTRODUCTION

Ce chapitre de notre étude sera consacré dans un premier temps à un développement théorique, permettant de trouver une relation de la forme $f(Y, F_1, C_r)$, tels que : Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, F_1 est le nombre de Froude incident et C_r est le coefficient de résistance. Ce dernier exprime l'effet de la rugosité des parois du canal triangulaire sur le ressaut hydraulique. Ce chapitre abordera dans un deuxième temps une étude expérimentale, qui aura pour objectif d'établir des relations empiriques adimensionnelles régissant les caractéristiques de ce type du ressaut.

IV.2. ANALYSE THEORIQUE

La Figure 4.1 montre un ressaut contrôlé par seuil dans un canal de section droite triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° à parois rugueuses. Le seuil est placé à l'extrémité aval du canal, afin de surélever le plan d'eau à l'aval. h_1 et h_2 représentent les hauteurs conjuguées respectivement de la section initiale et finale du ressaut.

L'écoulement étant en régime torrentiel à l'amont et fluvial à l'aval.

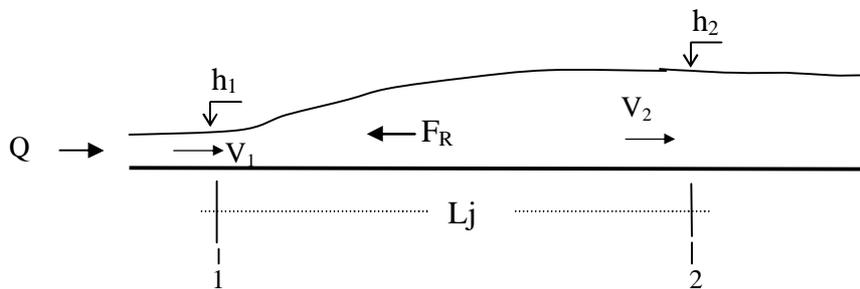


Figure 4.1 : Ressaut contrôlé par un seuil dans un canal triangulaire à parois rugueux .Schéma de définition.

Etant donnée les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ la répartition hydrostatique des pressions, dans les sections amont et aval ;
- ✓ la pente du canal est faible ou presque nulle ;
- ✓ la résistance de l'air est négligeable, l'écoulement est permanent ;

On peut appliquer l'équation de quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut, en tenant compte de la force de résistance F_R due à la rugosité appliquée aux parois du canal. Cette équation s'écrit comme suit :

$$F_1 - F_2 - F_R = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad (4.1)$$

où :

F_1 et F_2 sont respectivement les forces de pression s'exerçant sur les sections amont et aval du ressaut : $F_1 = P_1 A_1$ et $F_2 = P_2 A_2$

V_1 et V_2 sont respectivement les vitesses aux sections amont et aval du ressaut,

ρ est la masse volumique du liquide,

Q est le débit volume.

F_R est la force de résistance due à la rugosité des parois du canal, dont l'expression est la suivante :

$$F_R = C \rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) p \quad (4.2)$$

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

L_j : Longueur du ressaut (m) ;

ρ : masse volumique de l'eau (kg/m^3) ;

C : un coefficient du à la rugosité ;

p : Périmètre mouillé du canal (m).

L'équation (4.1) peut s'écrire alors sous la forme :

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 - C \rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) p = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad (4.3)$$

P étant la pression hydrostatique.

L'expression (4.3) s'écrit pour un canal triangulaire sous la forme suivante :

$$\rho g \bar{h}_1 A_1 - \rho g \bar{h}_2 A_2 = \rho Q^2 \left(\frac{1}{h_2^2} - \frac{1}{h_1^2} \right) + C \rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) p \quad (4.4)$$

- Les aires des sections 1 et 2 ont pour expressions : $A_1 = h_1^2$ et $A_2 = h_2^2$

- Les positions des centres de gravité des sections mouillées A_1 et A_2 : sont respectivement :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{3} \text{ et } \bar{h}_2 = \frac{h_2}{3}.$$

- Les vitesses : $V_1 = \frac{Q}{h_1^2}$ et $V_2 = \frac{Q}{h_2^2}$

- $Y = h_2/h_1$ étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.

- Le nombre de Froude incident de la section triangulaire est : $F_1 = \frac{2Q^2}{gm^2 h_1^5}$

pour un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° , $m = 1$.

L'équation (4.4) devient :

$$\rho g \left(\frac{h_1^3}{3} - \frac{h_2^3}{3} \right) = \rho Q^2 \left(\frac{1}{Y^2 h_1^2} - \frac{1}{h_1^2} \right) + C \rho g L_j \left(\frac{Q^2}{2 g h_1^4} \right) p \quad (4.5)$$

En faisant $\frac{\rho Q^2}{h_1^2}$ en facteur, l'équation (4.5) devient :

$$\rho g \left(\frac{h_1^3}{3} - \frac{h_2^3}{3} \right) = \frac{\rho Q^2}{h_1^2} \left(\frac{1}{Y^2} - 1 + C g \frac{L_j}{2 g h_1^2} p \right) \quad (4.6)$$

En divisant les deux membres par le terme ρg , (4.6) devient :

$$\left(\frac{h_1^3}{3} - \frac{h_1^3 Y^3}{3} \right) = \frac{Q^2}{g h_1^2} \left(\frac{1}{Y^2} - 1 + C g \frac{L_j}{2 g h_1^2} p \right) \quad (4.7)$$

En faisant h_1^3 en facteur l'équation (4.7) devient :

$$\frac{1 - Y^3}{3} = \frac{Q^2}{g h_1^5} \left(\frac{1}{Y^2} - 1 + C \frac{L_j}{2 h_1^2} p \right) \quad (4.8)$$

En introduisant l'expression du nombre de Froude dans l'équation (4.8) on obtient :

$$\frac{1 - Y^3}{3} = \frac{F_1^2}{2} \left(\frac{1}{Y^2} - 1 + C \frac{L_j}{2 h_1^2} p \right) \quad (4.9)$$

en remplaçant le périmètre mouillé p_1 par sa valeur

$$p_1 = 2\sqrt{2}h_1 \quad (4.10)$$

$P.L_j$: représente la section rugueuse du canal son expression devient :

$$(h_1 + h_2)\sqrt{2}.L_j \quad (4.11)$$

en remplaçant (4.11) dans l'équation (4.9) on aura :

$$\frac{1 - Y^3}{3} = \frac{F_1^2}{2} \left(\frac{1}{Y^2} - 1 + C \frac{L_j}{2 h_1^2} (h_1 + h_2)\sqrt{2} \right) \quad (4.12)$$

L'équation (4.12) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{1 - Y^3}{3} = \frac{F_1^2}{2Y^2} \left(1 - Y^2 + C \frac{L_j Y^2}{2 h_1} (1 + Y)\sqrt{2} \right)$$

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(1-Y^3)}{3 \left(1-Y^2 + \frac{Y^2(1+Y)LjC\sqrt{2}}{2h_1} \right)} \quad (4.13)$$

ensuite :

$$\frac{1}{F_1^2} = \frac{3 \left(1-Y^2 + \frac{Y^2(1+Y)LjC\sqrt{2}}{2h_1} \right)}{2Y^2(1-Y^3)} \quad (4.14)$$

en faisant le développement suivant :

$$\left(1-Y^2 + \frac{Y^2(1+Y)LjC\sqrt{2}}{2h_1} \right) = (1-Y^3) \times \left(1 - \frac{Lj(1+Y)C\sqrt{2}}{2Yh_1} \right) + \frac{Lj(1+Y)C\sqrt{2}}{2Yh_1} + Y^3 - Y^2 \quad (4.15)$$

en remplaçant (4.15) dans (4.14) on obtient l'expression (4.16):

$$\frac{2}{3F_1^2} = \frac{(1-Y^3) \times \left(1 - \frac{Lj(1+Y)C\sqrt{2}}{2Yh_1} \right) + \left(\frac{Lj(1+Y)C\sqrt{2}}{2Yh_1} + Y^3 - Y^2 \right)}{Y^2(1-Y^3)} \quad (4.16)$$

$$\frac{2}{3F_1^2} = \frac{\left(1 - \frac{Lj(1+Y)C\sqrt{2}}{2Yh_1} \right)}{Y^2} + \frac{\left(\frac{Lj(1+Y)C\sqrt{2}}{2Yh_1} + Y^3 - Y^2 \right)}{Y^2(1-Y^3)} \quad (4.17)$$

On posant $\frac{Lj(1+Y)C\sqrt{2}}{2Yh_1} = K$

L'expression (4.17) devient :

$$\frac{2}{3F_1^2} = \frac{(1-K)}{Y^2} + \frac{K+Y^3-Y^2}{Y^2(1-Y^3)} \quad (4.18)$$

le développement de (4.18) permet d'écrire :

$$\frac{2}{3F_1^2} - \frac{K}{Y^2} \left(\frac{Y^3}{1-Y^3} \right) = \left(\frac{Y^3 - Y^2}{Y^2(1-Y^3)} \right) + \frac{1}{Y^2} \quad (4.19)$$

en multipliant les deux membres par le terme $Y^2(1-Y^3)$ on aura :

$$\frac{2Y^2(1-Y^3)}{3F_1^2} - KY^3 = Y^2(1-Y^3) \left(\frac{Y^3 - Y^2}{Y^2(1-Y^3)} + \frac{1}{Y^2} \right)$$

ensuite :

$$\frac{2(1-Y^3)}{3F_1^2} - KY = (1-Y^3) \left(\frac{Y^3 - Y^2}{Y^2(1-Y^3)} + \frac{1}{Y^2} \right) \quad (4.20)$$

L'expression (4.19) peut être alors développée selon les étapes suivantes :

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

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

et en divisant les deux membres par le terme $\frac{Y^2}{1-Y^2} F_1^2$ on aura :

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

et puis :

$$\frac{2Y^2(1-Y^3)}{3(1-Y^2)} - \left(\frac{Y^3}{1-Y^2} \right) F_1^2 K = F_1^2$$

$$\frac{2Y^2(1-Y^3)}{3(1-Y^2)} = F_1^2 \left(1 - \frac{KY^3}{Y^2-1} \right) \quad (4.21)$$

on pose $C_r = \frac{KY^3}{Y^2-1}$

En remplaçant K par son expression, le rapport C_r s'écrit comme suit :

$$C_r = \frac{Lj\sqrt{2}CY^2}{2(Y^2-1)h_1} \quad (4.22)$$

Remplaçant (4.22) dans la relation (4.21) on obtient la relation finale (4.23) :

$$F_1^2(1-C_r) = \frac{2Y^2(1-Y^3)}{3(1-Y^2)} \quad (4.23)$$

En effet, cette expression est semi-théorique du fait que le coefficient de résistance C_r , ne peut être trouvé qu'à partir de données expérimentales.

Pour un rapport C_r nul, l'expression (4.23) revient à l'équation théorique (1.7) de Hager et Wanoschek (1987) d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire à parois parfaitement lisse.

En effet, la relation semi-théorique obtenue permet de trouver le rapport des hauteurs conjuguées connaissant le rapport de résistance (ou coefficient de résistance) et le nombre de Froude incident. Seulement, le rapport C_r étant une inconnue dans l'équation (4.23), il est essentiel de procéder à une analyse expérimentale de cette expression afin d'évaluer la relation qui lie le rapport de résistance à la rugosité absolue ε .

IV.3. ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'ÉQUATION SEMI-THÉORIQUE

IV.3.1. Introduction

Cette analyse a pour objectif principal d'analyser expérimentalement la relation semi théorique (4.23), afin d'évaluer la relation qui lie le coefficient C_r de résistance à la rugosité absolue ε .

IV.3.2. Variation du coefficient C_r de résistance en fonction de la rugosité absolue ε

Afin de trouver l'expression du coefficient C_r de résistance en fonction de la rugosité absolue ε , nous allons représenter sur la figure 4.2, la variation du terme $2Y^2(1-Y^3)/[3(1-Y^2)]$ en fonction de F_1^2 pour les quatre rugosités absolues : $\varepsilon(\text{mm}) = 4,53 ; 6,04 ; 7,11$ et $8,73$.

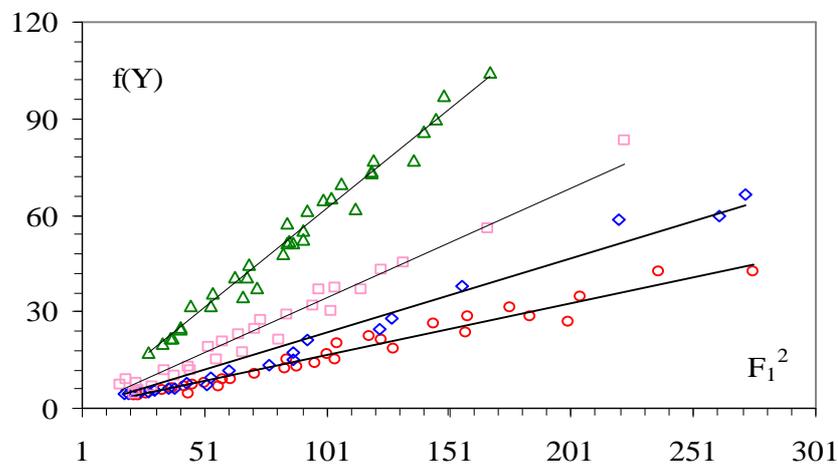


Figure 4.2 : Variation de $f(Y)$ en fonction de F_1^2 , pour quatre rugosités absolues : $\varepsilon(\text{mm}) = (\Delta) 4,53 ; (\diamond) 6,04 ; (\square) 7,11$ et $(\circ) 8,73$. (—) Courbe d'ajustement.

La figure 4.2 montre quatre nuages de points distincts, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la rugosité absolue ε .

L'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut, montre que chaque nuage de points peut s'ajuster avec une droite de la forme $2Y^2(1-Y^3)/[3(1-Y^2)] = d F_1^2$. En comparant avec la relation (4.23), le terme 'd' représente le facteur $(1-C_r)$.

Le Tableau 4.1 regroupe les valeurs des coefficients C_r .

Tableau 4.1: Coefficient C_r des courbes d'ajustement

ε (mm)	Coefficient (C_r)	R^2
0 (lisse)	0	
4,53	0,39	0,98
6,04	0,66	0,97
7,11	0,77	0,98
8,73	0,84	0,97

Le tableau 4.1 montre que le coefficient C_r augmente avec l'augmentation de la rugosité absolue ε . L'ajustement statistique des couples des valeurs (ε, C_r) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire d'équation : $C_r=0,101\varepsilon$. Celle-ci est représentée à la figure 4.3.

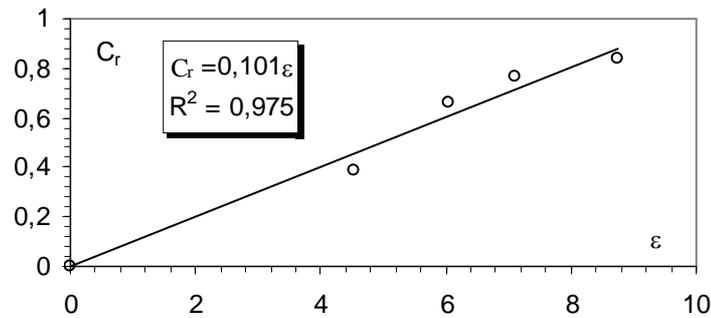


Figure 4.3 : Variation du coefficient C_r en fonction de la rugosité absolue ε

En remplaçant le coefficient C_r par son expression dans la relation : $2Y^2(1-Y^3)/[3(1-Y^2)] = (1-C_r) F_1^2$, l'équation semi théorique devient :

$$F_1^2(1-0,101\varepsilon) = \frac{2Y^2(1-Y^3)}{3(1-Y^2)} \quad (4.24)$$

$$0 \leq \varepsilon \leq 8,73\text{mm}$$

La figure 4.4 montre que la relation $f(Y) = \xi(\varepsilon, F_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice, montrant ainsi la fiabilité de la relation (4.24).

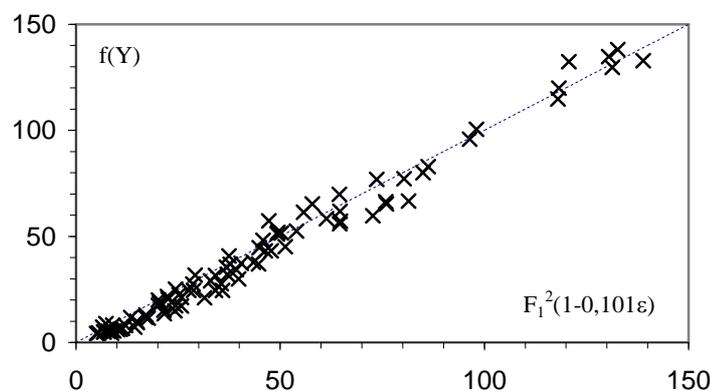


Figure 4.4 : Variation de $f(Y)$ en fonction de la relation $F_1^2(1-0,101\varepsilon)$

(\times) Points des mesures expérimentales. (-) première bissectrice

IV.3.3. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient Cr de résistance et du nombre de Froude F₁

L'équation semi théorique (4.23) étant implicite en Y, nous avons obtenue une relation approchée permettant de trouver facilement le rapport Y en fonction du coefficient C_r de résistance des parois du canal et du nombre de Froude incident F₁ de l'écoulement.

La figure (4.5) montre un nuage de points qui suit absolument l'allure d'une courbe unique. L'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés non linéaire donne avec une très bonne corrélation la relation puissance suivante :

$$Y = 1,055 F_1^{0,7} (1 - 0,101\varepsilon)^{0,35} \tag{4.25}$$

$$4,53 \leq \varepsilon(\text{mm}) \leq 8,73$$

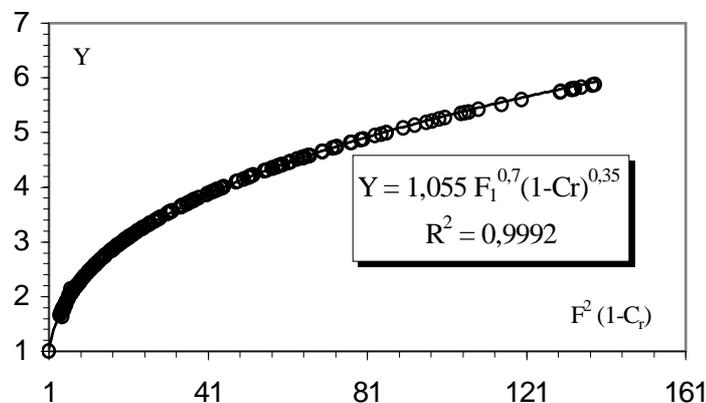


Figure 4. 5 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de F²(1-C_r).
(o) points de mesures expérimentales. (—) Courbe d'ajustement.

La figure 4.6 montre la comparaison du terme (1-C_r) issue de l'équation semi théorique (4.23) avec celui de la relation approchée (4.25). On constate que le nuage de points suit parfaitement la première bissectrice, montrant ainsi que la relation (4.25) représente bien la relation semi théorique.

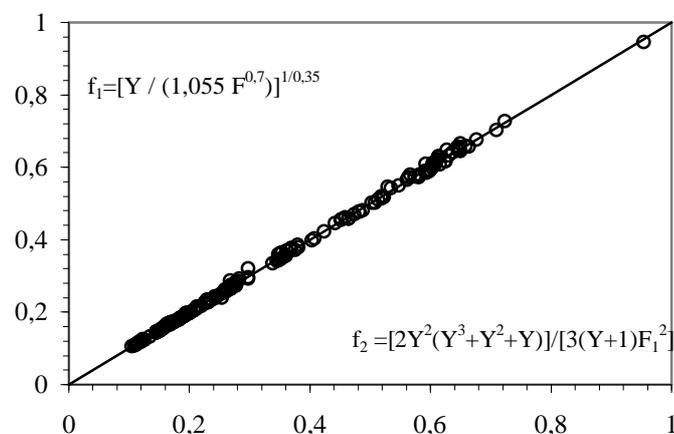


Figure 4. 6 : Comparaison (1-C_r) issue de la relation approchée f₁ avec celui de la relation semi théorique f₂.
(o) points de mesures expérimentales. (—) Première bissectrice.

Par ailleurs, les écarts relatifs entre les valeurs (1-Cr) issues de l'équation semi théorique (4.23) avec celui de la relation approchée (4.25) sont calculés et présentés au tableau 4.2, afin d'examiner la validité de la relation semi théorique (4.23). Le tableau 4.2., montre clairement que les écarts relatifs sont en leur majorité inférieur à 5%.

Tableau 4.2. : Ecart relatifs en (%) entre (1-Cr) semi- théorique et (1-Cr) approchée.

(1-Cr)Théo	(1-Cr) Appro	$\Delta(1-Cr)/ (1-Cr)$ (en %)
0,58	0,57	1,52
0,68	0,68	0,06
0,61	0,60	0,32
0,55	0,55	-0,11
0,61	0,62	-1,58
0,60	0,59	1,44
0,60	0,60	0,77
0,61	0,60	0,29
0,61	0,61	0,15
0,61	0,61	-0,54
0,61	0,62	-1,13
0,59	0,61	-2,76
0,52	0,51	0,92
0,57	0,58	-2,26
0,53	0,55	-3,06
0,62	0,62	1,42
0,65	0,64	0,77
0,65	0,65	0,59
0,66	0,66	-0,10
0,65	0,65	-0,24
0,65	0,65	-0,42
0,65	0,65	-1,36
0,63	0,62	1,58
0,59	0,59	1,52
0,71	0,70	1,15
0,66	0,66	0,99
0,59	0,59	0,30
0,60	0,59	1,56
0,60	0,59	1,17
0,52	0,52	1,06
0,58	0,58	0,45

IV.4. ETUDE EXPERIMENTALE

Le ressaut hydraulique est le passage de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial. Cette transition se fait à la suite d'une variation du niveau d'eau en aval. Le ressaut est considéré classique lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente faible ou nulle, sans obstacle à l'aval. Il est, cependant, dit contrôlé lorsqu'il est provoqué par la mise en place d'un obstacle à l'aval. Il est dit forcé lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle. Le ressaut hydraulique peut, en outre, évoluer dans des canaux à parois lisses ou rugueuses.

Le présent sous chapitre se propose d'analyser expérimentalement le ressaut contrôlé par seuil mince en canal de section triangulaire à parois rugueuses, de rugosités absolues : $\varepsilon = 4,53 \text{ mm}$; $\varepsilon = 6,04$; $\varepsilon = 7,11 \text{ mm}$ et $\varepsilon = 8,73 \text{ mm}$.

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, le seuil de hauteur s doit être surélevé. Ainsi à chaque valeur du nombre de Froude F_1 , correspond une longueur L_j du ressaut et L_r du rouleau, ainsi qu'une hauteur h_2 à l'aval du ressaut et une hauteur s du seuil (Figure 4.7).

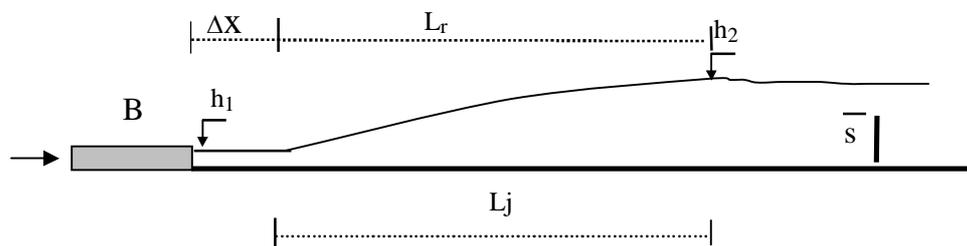


Figure 4.7 : Ressaut contrôlé par seuil mince, h_1 hauteur d'eau amont ; h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, L_r longueur du rouleau de surface, L_j la longueur du ressaut, ΔX distance séparant la boîte en charge B et le pied du ressaut, B boîte en charge.

Des relations fonctionnelles, en termes adimensionnels, liant les différentes caractéristiques du ressaut en canal à parois rugueuses, seront proposées.

IV .4.1. Protocole expérimental

Le canal ayant servi comme modèle pour l'expérimentation du ressaut hydraulique (photo 4.1) est composé d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure de section droite triangulaire par le moyen d'une conduite circulaire de 110 mm de diamètre. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe (photo 4.2b) qui alimente une boîte en charge (photo 4.2a) débouchant dans le canal de mesure.

Le canal de mesure ayant servi à l'étude expérimentale est composé de deux parties : un canal triangulaire de longueur 3 m muni de parois rugueuses et un canal rectangulaire à parois lisses où se fait l'étalonnage par un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérales.

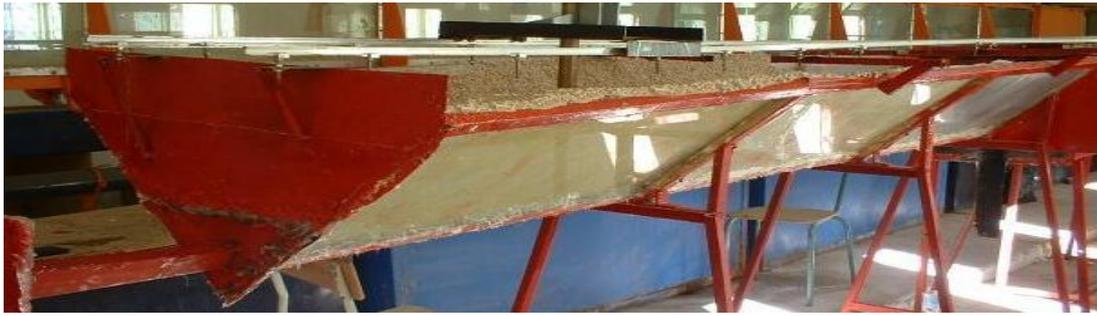


Photo 4.1 : Photographie du canal de section droite triangulaire ayant servi à l'expérimentation.



(b)



(a)

Photo 4.2: Photographie de : a) Boîte en charge. b) Pompe



Photo 4.3 : Photographie de débitmètre à diaphragme **Photo 4.4** : Photographie de manomètre différentiel.

La position du ressaut est contrôlée par la mise en place de seuil mince de différentes hauteurs, placés à l'aval du canal de mesure.

Le débit volume Q et la profondeur h_2 sont les deux grandeurs nécessitant un appareillage spécifique. la position x du seuil ainsi que la hauteur géométrique s sont simplement mesurées à l'aide d'un ruban gradué et la hauteur initial h_1 du ressaut est assimilée à l'ouverture du convergent en charge générant l'écoulement incident, après avoir positionné le pied du ressaut à environ $\Delta x \cong 5\text{cm}$.

Le débit volume Q est mesuré à l'aide d'un débitmètre à diaphragme préalablement étalonné et dont la précision est d'environ $\pm 0,5\%$. h_2 a été mesuré à l'aide d'un limnimètre à vernier à double précision.

IV.4.2. Appareillages de mesure

IV.4.2.1. Débitmètre à Diaphragme

Le débitmètre à diaphragme est un dispositif destiné à la mesure des débits par différence de pressions. Une chute de pression est produite, liée à la vitesse de l'écoulement et, par conséquent, au débit. Ainsi à chaque débit volumique Q passant par le diaphragme correspond une différence de cote Δh . Les débits volumiques Q ont été mesurés par un déversoir à échancrure rectangulaire, sans hauteur de pelle avec contraction latérale.

L'ajustement de la courbe $Q = f(\Delta h)$, donne la relation du débit volumique passant par le débitmètre à diaphragme :

$$Q = a(\Delta h)^b \quad (4.26)$$

IV.4.2.2. Limnimètre

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à l'ouverture due à la section de sortie du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été évaluées par un limnimètre (photo 4.5).



Photo 4. 5 : Photographie de 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.

IV.4.2.3. Tamiseuse

Afin d'obtenir une rugosité équivalente de $\varepsilon = 4,53$ mm ; $\varepsilon = 6,04$; $\varepsilon = 7,11$ mm et $\varepsilon = 8,73$ mm, nous avons procédé au tamisage du gravier de concassage au moyen d'une tamiseuse photo (4.6)



Photo 4.6: Série de tamis placés sur un vibreur.

IV.4.2.4. Palmer

Pour mesurer la hauteur des aspérités des particules de gravier près tamisées, étalées et collées, nous avons utilisé un Palmer Numérique à affichage digital de précision 1/1000 mm, allant jusqu'à 25 mm d'épaisseur (photo 4.7)



Photo 4.7 : palmer numérique.

IV.4.3. Description des essais

IV.4.3.1. Etalonnage du Diaphragme

On note que dans tous nos essais, les débits volumiques Q sont mesurés par un déversoir à échancrure rectangulaire, sans hauteur de pelle avec contraction latérale (Figure 4.8). La variation du débit se fait par manipulation de la vanne collectée à la conduite circulaire de diamètre 110 mm, Il se produit dans l'étranglement de diaphragme une chute de pression qui est lue à partir des différences de côtes sur les piézomètres, et cette différence de charge est liée à la vitesse de l'écoulement, par conséquent au débit. Ainsi à chaque débit volumique Q passant par le diaphragme correspond une différence de côte Δh (Hachemi, 2007).

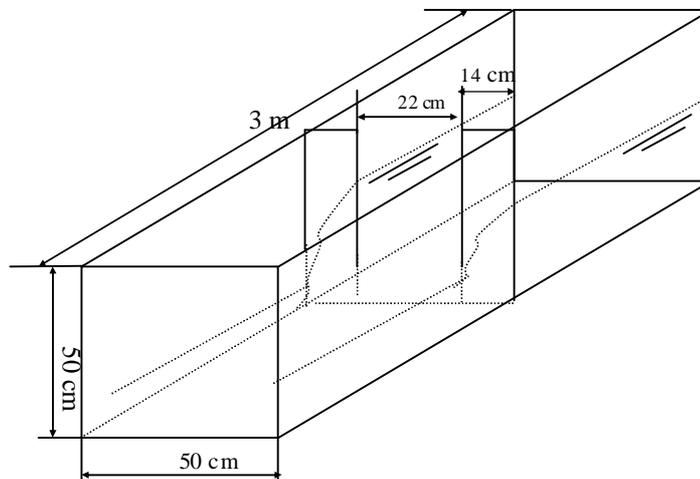


Figure 4.8 : Schéma de définition de la deuxième partie du canal avec déversoir.

La hauteur de la lame d'eau passant au-dessus du déversoir rectangulaire est obtenue par la lecture sur un limnimètre placé au-dessus de l'ouverture du déversoir. Le débit volume est défini par la formule suivante :

$$Q = B \times 0,3794 \sqrt{2g} \beta \left(1 + 0,16496 \beta^{2,0716}\right)^{3/2} h^{3/2} \quad (4.27)$$

Avec : $\beta = \frac{b}{B}$.

Où :

Q : le débit en (m³/s);

B : la largeur du canal en (m) ;

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

β : rapport de forme ;

b : Largeur de l'échancrure

h : la hauteur de la lame d'eau(m)

La condition d'application de cette relation est : $\beta = \frac{b}{B} < 0,45$

Le Tableau 4.3: regroupe tous les résultats de mesures expérimentales de l'étalonnage.

Tableau 4.3 : Résultats expérimentaux de l'étalonnage du débitmètre.

Δh (cm)	h (cm)	Q (l/s)
2,3	2,442	1,443
2,5	2,562	1,550
2,9	2,586	1,572
3,7	2,712	1,689
5	2,898	1,865
11,4	4,202	3,257
12,7	4,24	3,301
13,4	4,592	3,720
20,1	4,916	4,121
24,3	5,232	4,525
28	5,608	5,021
32	5,702	5,148
35	5,894	5,410
43	6,302	5,981
46	6,494	6,257
50	6,602	6,414
62	7,134	7,204
71	7,306	7,466
80	7,746	8,151
49,6	19,416	6,416
62,4	19,416	7,268
98,7	19,416	9,060
123,2	19,416	10,171
154,4	19,416	11,249
170,3	19,416	11,899
192,4	19,416	12,193
223,6	19,416	12,801
255,1	19,416	14,537
263,3	19,416	14,698
279,3	19,416	15,909

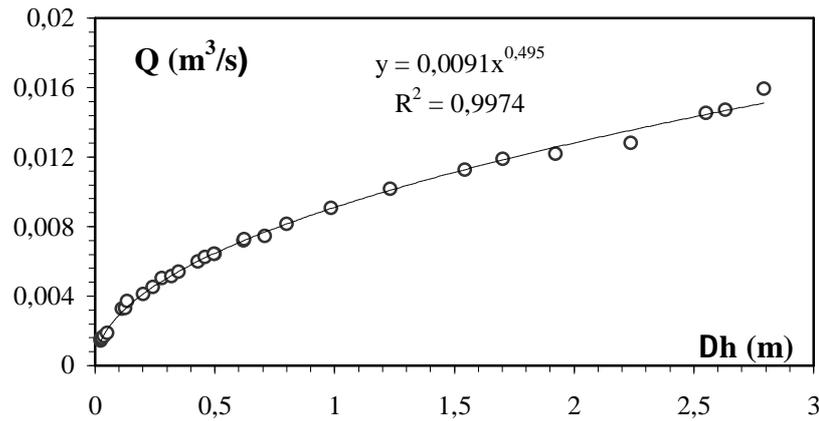


Figure 4.9 : Courbe expérimentale de la relation $Q = f(\Delta h)$.

L'ajustement de la courbe $Q = f(\Delta h)$, donne la relation du débit volumique passant par le débitmètre à diaphragme :

$$Q = 0,0091(\Delta h)^{0,4950} \quad (4.28)$$

IV.4.3.2. Procédure expérimentale des essais

L'étude expérimentale est menée sous différentes hauteurs initiales h_1 du ressaut correspondant à une gamme des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. La hauteur initiale h_1 et le nombre de Froude incident F_1 sont tels que $1,8(\text{cm}) \leq h_1 \leq 5,0(\text{cm})$ et $3,95 \leq F_1 \leq 17,85$.

Des seuils de différentes hauteurs s ont été testés, dont la hauteur varie entre 1,5 cm et 8 cm (photo 4.8).

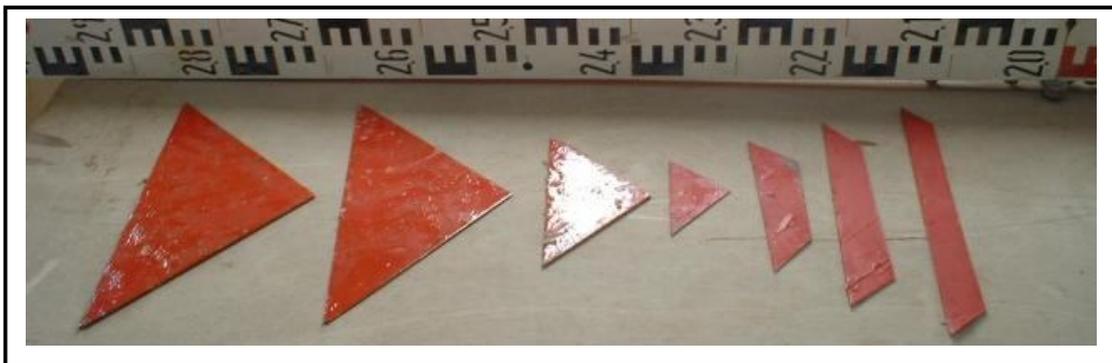


Photo 4.8 : Série de seuils.

Pour une hauteur s et une position x du seuil et pour une hauteur h_1 de l'écoulement incident, l'augmentation du débit volumique Q , provoque l'apparition d'un ressaut. Le couple de valeur (Q, h_1) permet en outre le calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. A chaque valeur du nombre de Froude F_1 correspondent une valeur de la longueur L_j du ressaut et une valeur de la hauteur s du seuil.

Un échantillon constitué 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 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 :

✓ Le nombre de Froude F_1 ,
$$F^2 = \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial h}$$

$$A = h^2 \quad , \quad \frac{\partial A}{\partial h} = 2h \quad , \quad F^2 = \frac{2Q^2}{gh^5}$$

- ✓ La longueur relative L_j/h_1 du ressaut.
- ✓ Rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut.

IV.4.3.3. Mode de préparation de la rugosité utilisée

Afin d'obtenir des parois rugueuses, avec une répartition uniforme de la rugosité, nous avons procédé selon les étapes suivantes :

- Le tamisage **du gravier** de granulométrie différente est effectué par le moyen d'un appareil électrique composé par plusieurs tamis de différents diamètres normalisés.
- Variation entre 4 et 12,50 mm avec des temps de tamisage bien fixés en relation avec la gamme de gravier à tamiser (environ 5 minutes).
- Après l'obtention de la gamme de gravier voulue, ce dernier est lavé puis séché.
- La gamme choisie, varie entre 4 et 12,50 mm (photo 4.10), 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 BECTA 10 000.
- A la fin de la préparation de la toile rugueuse, nous évaluons la valeur de la rugosité équivalente par un appareil de mesure dit " PALMER NUMERIQUE ", de précision 0,001 mm.
- Enfin, la rugosité équivalente obtenue est : $\varepsilon = 4,53$ mm, $\varepsilon = 6,04$, $\varepsilon = 7,11$ mm et $\varepsilon = 8,73$ m.

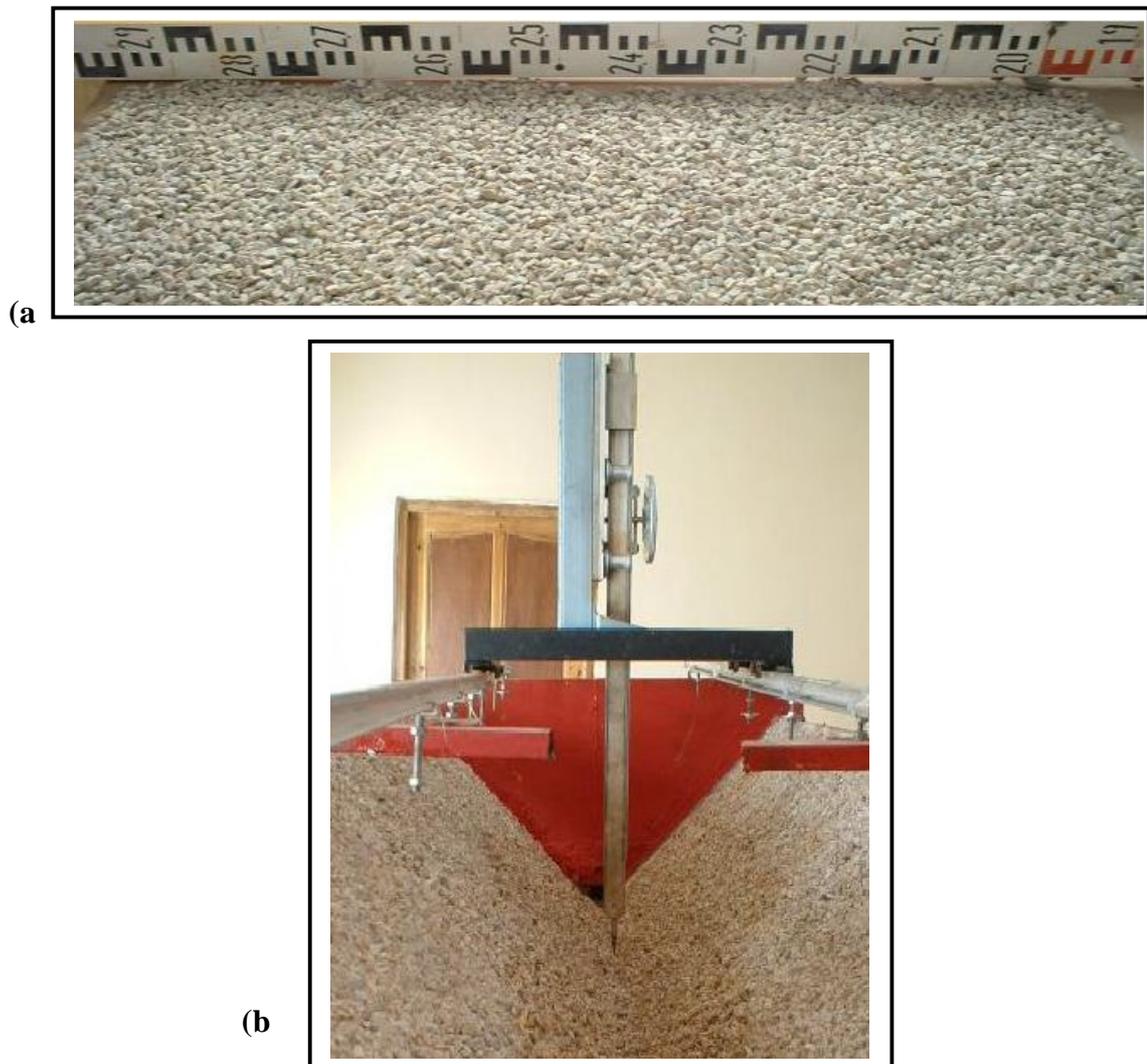


Photo 4.9 : a) Echantillon de grains de gravier de rugosité équivalente $\varepsilon=8,73$ mm.
 b) Grain de gravier répartis uniformément sur les parois du canal triangulaire.

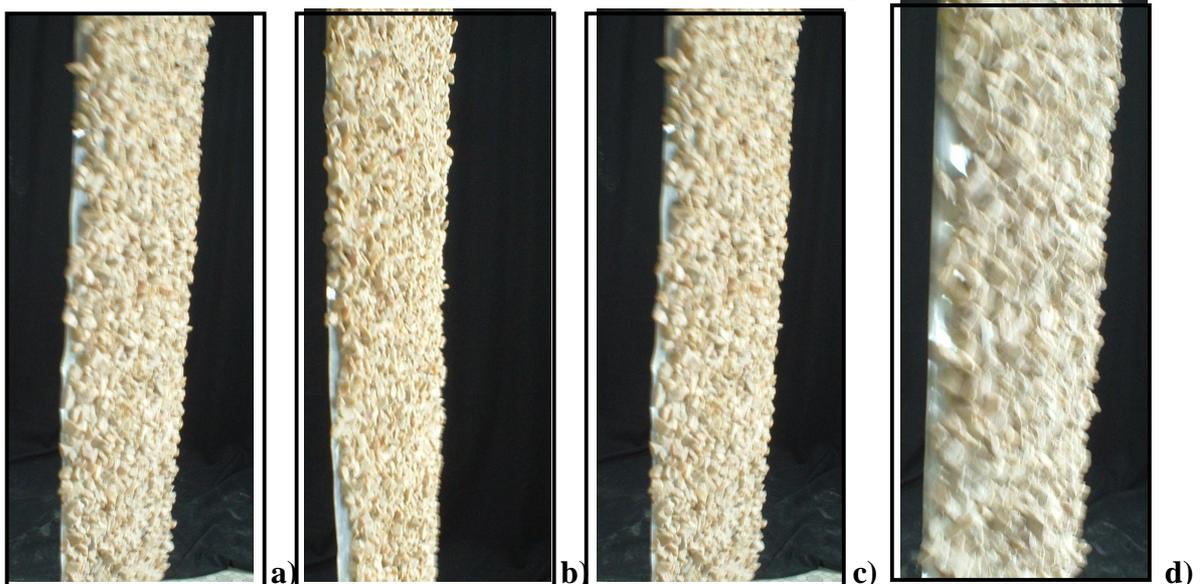


Photo 4.10 : Echantillons de grains de gravier de rugosités :
 a) $\varepsilon=4,53$ mm, b) $\varepsilon=6,04$ mm, c) $\varepsilon=7,11$ mm, d) $\varepsilon=8,73$ mm.

IV.4.4. Résultats expérimentaux

IV.4.4.1. Longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

La Figure (4.10) montre la représentation graphique de la variation de L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude pour quatre valeurs des rugosités absolues $\varepsilon = 4,53$ mm ; $\varepsilon = 6,04$; $\varepsilon = 7,11$ mm et $\varepsilon = 8,73$ mm.

On remarque aussi quatre nuages des points, la rugosité absolue des parois du canal, dépend de chaque valeur de la rugosité.

Par ailleurs, l'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut, montre que pour chaque valeur de rugosité " ε " correspond une courbe de type linéaire de la

forme $\frac{L_j}{h_1} = a_1(F_1 - 1)$.

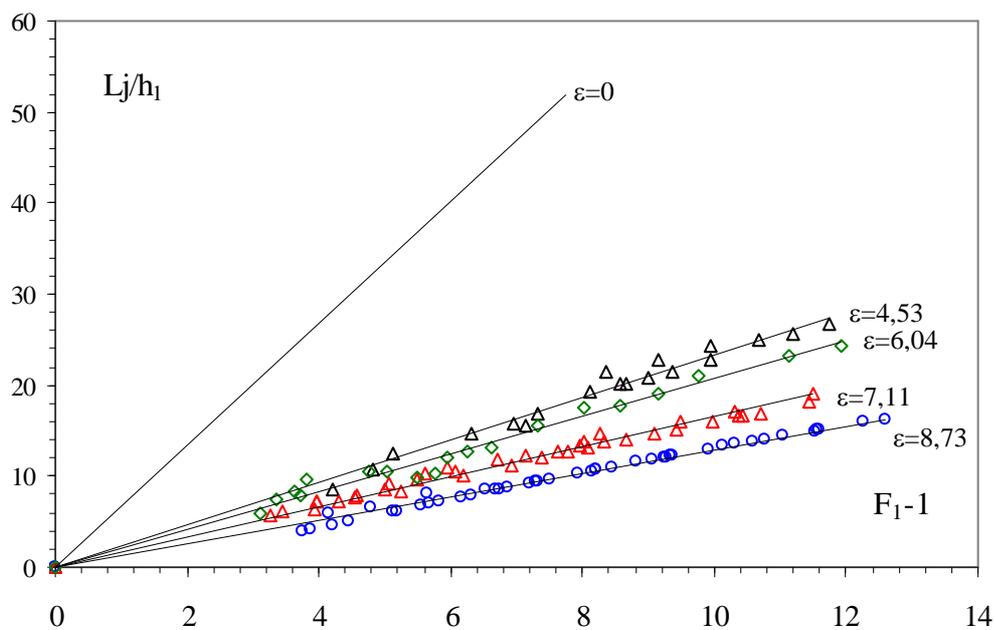


Figure 4.10 : Ressaut contrôlé dans un canal triangulaire à parois rugueuses. Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de nombre Froude, pour quatre valeurs différentes de " ε ": (Δ) 4,53mm (\square) 6,04mm (Δ) 7,11mm et (\circ) 8,73mm. (—) Courbes d'ajustements.

L'analyse de ces allures nous montre que la longueur relative L_j/h_1 augmente au fur et à mesure que le nombre de Froude augmente et ceci pour toutes les rugosités requises. En outre, plus la rugosité équivalente des parois augmente plus le rapport de la longueur relative L_j/h_1 diminue.

Le tableau 4.4 regroupe les valeurs des coefficients a_1 .

Tableau 4.4: coefficients a_1 des courbes d'ajustements.

ε (mm)	Coefficient a_1	R^2
4,53	2,34	0,98
6,04	2,08	0,99
7,11	1,66	0,99
8,73	1,30	0,99

Le tableau 4.4 montre que le coefficient a_1 diminue progressivement avec l'augmentation de la rugosité équivalente ε . L'ajustement statistique des couples de valeurs (a_1, ε) par la méthode des moindres carrés donne la relation de type linéaire suivante : $a_1 = 3,5 - 0,26 \varepsilon$, celle-ci est représentée dans la figure 4.11.

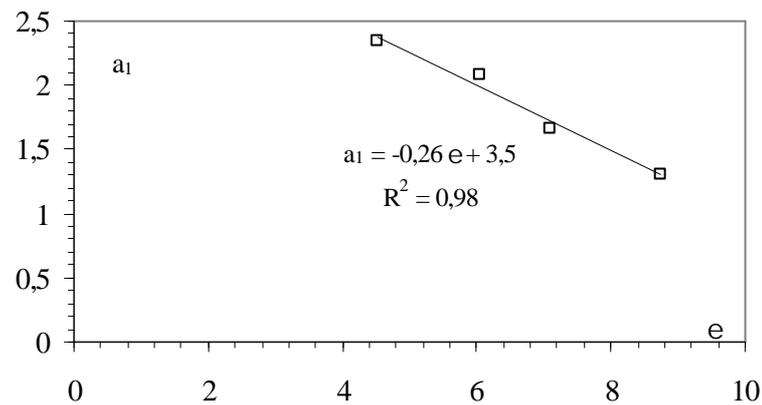


Figure 4.11 : Variation du coefficient "a₁" en fonction de la rugosité ε .

En remplaçant le coefficient a_1 par son expression dans la relation $L_j/h_1 = a_1 (F_1 - 1)$, l'équation liant la longueur relative $\frac{L_j}{h_1}$ du ressaut au nombre de Froude incident et la rugosité équivalente ε s'écrit : $L_j/h_1 = (3,5 - 0,26 \varepsilon)(F_1 - 1)$

$$\frac{L_j}{h_1} = (3,5 - 0,26\varepsilon)(F_1 - 1) \quad (4.29)$$

pour $4,53 \leq \varepsilon \leq 8,73$ mm

La Figure (4.12) montre que la relation $Lj/h_1 = f(\varepsilon, F_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice, montrant ainsi la fiabilité de la relation (4.29).

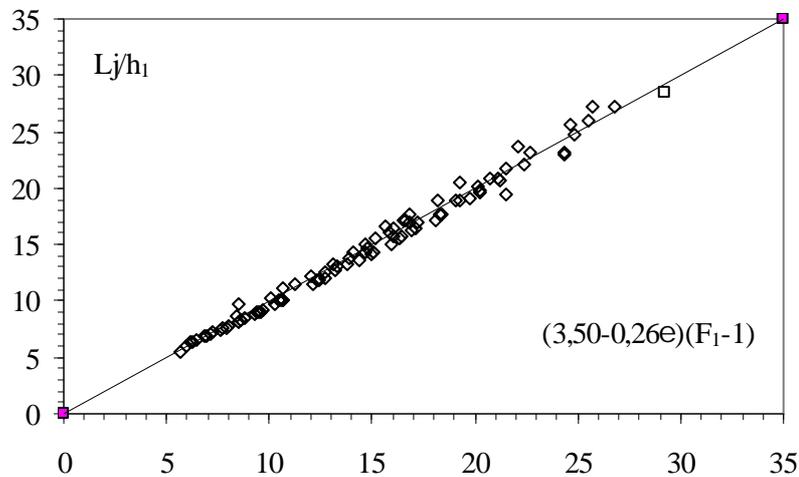


Figure 4.12 : Variation de la longueur relative Lj/h_1 en fonction de $f(\varepsilon, F_1)$.
 (○) Les points expérimentaux du ressaut contrôlé à parois rugueuses.
 (—) Première bissectrice.

Par ailleurs, les erreurs relatives entre les mesures expérimentales Lj/h_1 et les mesures issues de l'équation d'ajustement (4.29) sont indiquées au tableau 4.5, afin de confirmer la fiabilité de celle-ci. Le tableau 4.5 montre clairement que les erreurs relatives sont en majorité inférieures à 5%.

Tableau 4.5 : Ecart relatif entre Lj/h_1 expérimental et Lj/h_1 de la relation 4.29.

Lj/h_{1exp}	$Lj/h_{1relation}$	$\Delta(Lj/h_1)/(Lj/h_1)$ (en %)	Lj/h_{1exp}	$Lj/h_{1relation}$	$\Delta(Lj/h_1)/(Lj/h_1)$ (en %)
15,83	16,14	1,92	5,96	6,02	1,00
16,78	17,00	1,29	12,69	12,08	-5,06
20,1	20,09	-0,06	13,2	12,79	-3,18
20,73	20,90	0,81	14,63	14,38	-1,77
21,55	21,71	0,75	15,16	15,57	2,65
22,68	23,11	1,84	16,84	17,67	4,70
25,53	26,01	1,84	19,28	20,56	6,23
26,78	27,26	1,77	22,12	23,76	6,92
12,41	11,87	-4,58	13,86	13,76	-0,75
18,07	17,23	-4,87	16	15,69	-1,99
10,68	11,19	4,58	19,07	18,97	-0,50
14,78	14,63	-1,03	24,62	25,61	3,88
15,62	16,60	5,92	25,76	27,22	5,35
19,22	18,83	-2,05	7,9	7,53	-4,91
20,2	19,88	-1,62	8,38	8,65	3,16
24,34	23,08	-5,45	10,03	10,21	1,72
24,86	24,80	-0,24	11,23	11,41	1,59
24,36	23,00	-5,91	12,03	12,20	1,42
29,24	28,54	-2,46	13,1	13,34	1,82
12,14	11,46	-5,92	14,03	14,30	1,90

Tableau 4.5 (suite et fin) : Ecart relatifs entre L_j/h_1 expérimental et L_j/h_1 de la relation 4.29.

$L_j/h_{1\text{exp}}$	$L_j/h_{1\text{relation}}$	$\Delta(L_j/h_1)/(L_j/h_1)$ (en %)
14,68	15,01	2,21
16,08	16,48	2,43
16,6	17,14	3,16
18,23	18,88	3,42
7,61	7,48	-1,73
12,75	12,58	-1,32
13,34	13,13	-1,61
16,57	17,22	3,80
5,66	5,40	-4,81
6,44	6,51	1,02
7,12	7,08	-0,50
8,58	8,27	-3,70
9,56	9,08	-5,26
10,46	10,04	-4,18
12,3	11,81	-4,17
13,74	13,24	-3,74
16,96	16,18	-4,84
18,4	17,70	-3,94
19,76	19,18	-3,03
21,24	20,74	-2,41
22,36	22,08	-1,26
10,29	9,76	-5,48
15	14,20	-5,66
16,46	15,67	-5,02
18,32	17,60	-4,07
20,25	19,70	-2,82
21,14	20,84	-1,44
9,38	8,96	-4,74
10,65	10,09	-5,57
15,06	14,23	-5,81
16,29	15,49	-5,18
17,15	16,39	-4,66
6,13	6,29	2,49
6,98	6,96	-0,25
8,58	8,28	-3,63
9,28	8,86	-4,77
10,7	10,11	-5,81
14,4	13,59	-5,93
15,08	14,27	-5,67
15,9	15,08	-5,42
6,84	6,84	0,00
7,77	7,59	-2,37
8,5	8,22	-3,43
9,68	9,21	-5,06
10,59	10,03	-5,62
6,24	6,37	2,08
7,22	7,16	-0,84
7,98	7,77	-2,64
8,76	8,44	-3,80
9,44	9,02	-4,69

IV.4.4.2. Longueur relative L_j/h_2 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

La Figure (4.13) montre la représentation graphique de la variation de L_j/h_2 en fonction du nombre de Froude pour les quatre valeurs de rugosité absolue suivantes $\varepsilon = 4,53 \text{ mm}$; $\varepsilon = 6,04$; $\varepsilon = 7,11 \text{ mm}$ et $\varepsilon = 8,73 \text{ mm}$. On remarque en conséquence quatre allures de points distinctes, correspondant chacune à une rugosité bien déterminée. En effet, on remarque également que pour la même valeur du nombre de Froude incident, la longueur du ressaut diminue avec l'augmentation de la rugosité absolue, ce qui montre l'effet réducteur de la longueur du ressaut par la rugosité imposé aux parois du canal.

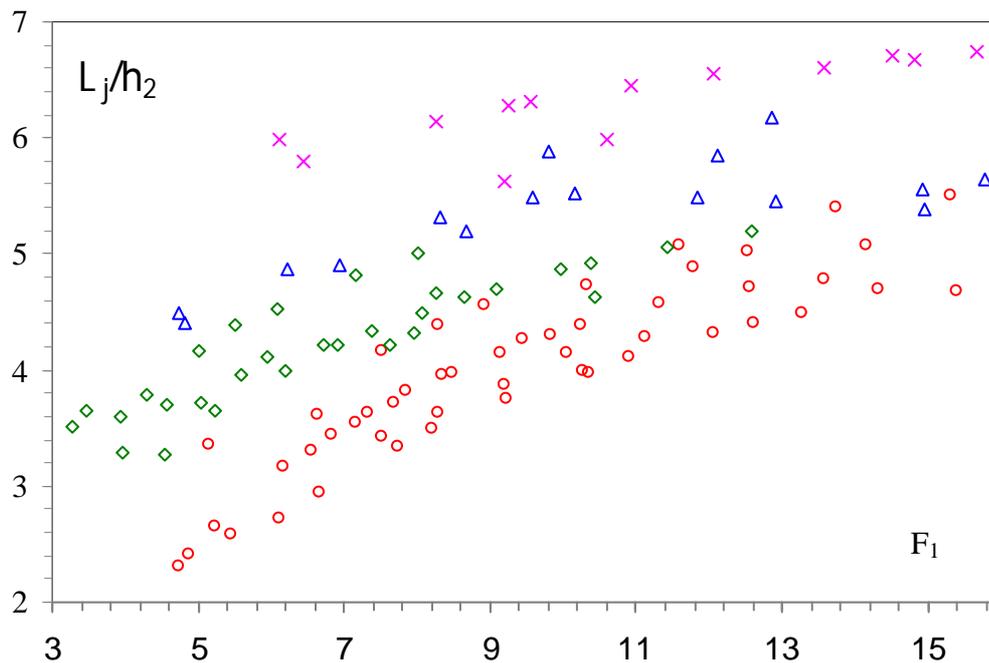


Figure 4.13 : Variation de la longueur relative L_j/h_2 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 Pour différentes valeur de rugosités " ε ": (O) 8,73mm ; (□) 7,11 mm ; (Δ) 6,04mm et (×) 4,53mm.

IV.4.4.3. Rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

La Figure (4.14) représente la variation de Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident F_1 pour quatre valeurs de rugosité absolue : $\varepsilon = 4,53 \text{ mm}$, $\varepsilon = 6,04$, $\varepsilon = 7,11 \text{ mm}$, et $\varepsilon = 8,73 \text{ mm}$. Celle-ci montre quatre nuages de points, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la rugosité équivalente ε . On remarque en premier lieu, que l'augmentation du nombre de Froude incident entraîne celle du rapport Y des hauteurs conjuguées. Il est évident qu'il y'a une nette influence de la rugosité des parois sur la réduction du niveau d'eau à l'aval. En effet, pour le même nombre de Froude F_1 ,

l'augmentation de la rugosité absolue engendre la diminution du rapport Y des hauteurs conjuguées.

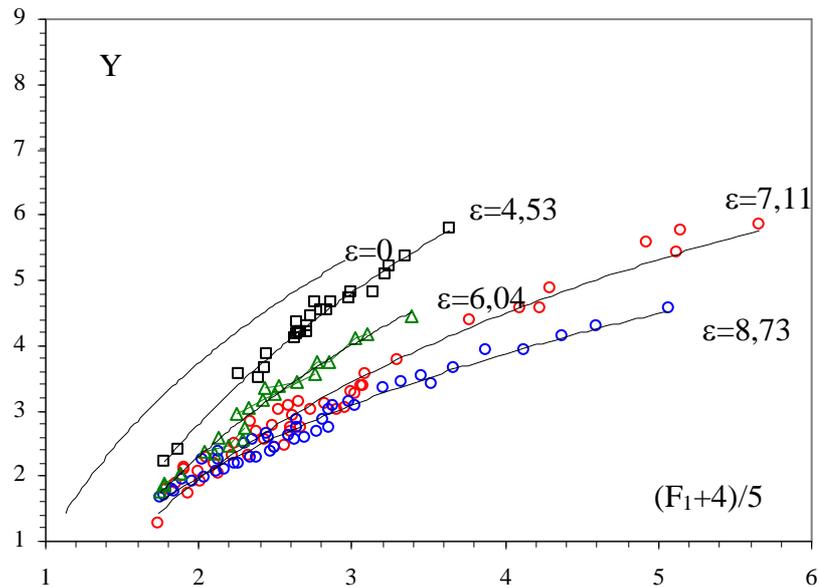


Figure 4.14 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude, Pour quatre valeurs différentes de " ε ": (\square) 4,53mm (Δ) 6,04mm (\square) 7,11mm et (\circ) 8,73mm. (—) Courbes d'ajustements. (....) Courbe selon Debabeche (2003)

L'ajustement des points de mesures expérimentales, montre lisiblement que pour chaque valeur de la rugosité ε , un ajustement logarithmique est possible, de la forme $Y = b_2 \ln [(F_1+4)/5] + c$. Le tableau 4.6 regroupe les valeurs des coefficients de b_2 et c .

Tableau 4.6: coefficients b_2 et c des courbes d'ajustement.

ε (mm)	Coefficient b_2	Coefficient c	R^2
4,53	4,94	-0,63	0,99
6,04	4,20	-0,61	0,98
7,11	3,67	-0,60	0,97
8,73	2,73	-	0,98

Le tableau 4.6 montre que le coefficient b_2 diminue avec l'augmentation de la rugosité équivalente ε . L'ajustement statistique des couples des valeurs (b_2 , ε) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire d'équation : $b_2 = -0,50\varepsilon + 7,22$. Celle-ci est représentée dans la figure 4.15

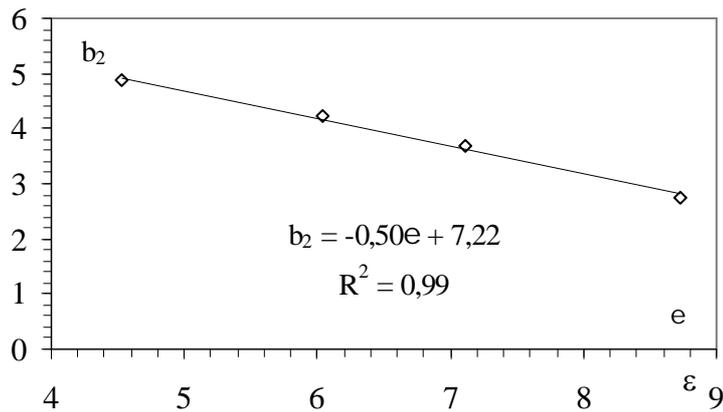


Figure 4.15: Variation du coefficient "b₂" en fonction de la rugosité absolue "ε".

Le coefficient c ne dépend pas de la rugosité absolue et prend la valeur fixe de -0,61. En effet, en remplaçant les coefficients b₂ et c par leurs expressions dans la relation $Y = b_2 \text{Ln}[(F_1+4)/5]+c$, l'équation liant le rapport des hauteurs conjuguées au nombre de Froude incident et à la rugosité équivalente devient :

$$Y = (7,22-0,50 \varepsilon) \text{Ln} [(F_1+4)/5] -0,61 \tag{4.30}$$

avec $0,00 \leq \varepsilon \leq 8,73 \text{ mm}$

La figure (4.16) montre aussi que la relation $Y=f(\varepsilon, F_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales, qui suivent parfaitement la première bissectrice.

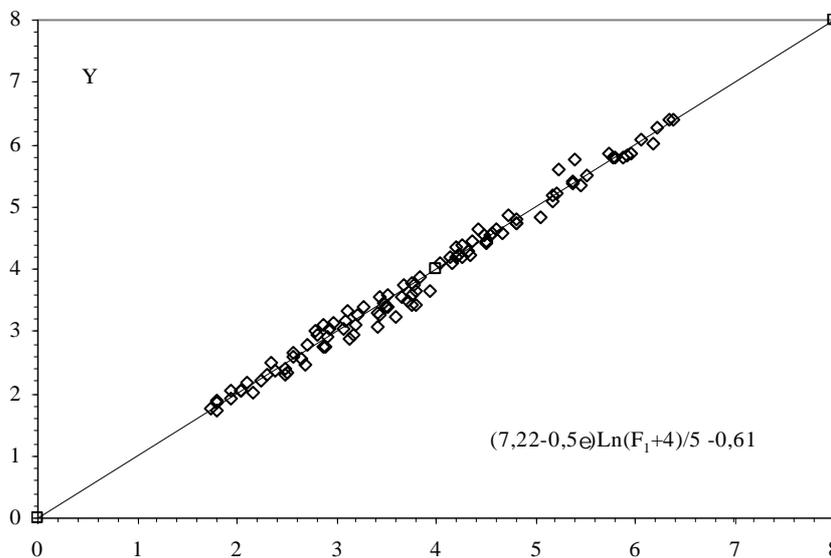


Figure 4.16 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de $f(\varepsilon, F_1)$.

(□) Les points expérimentaux du ressaut contrôlé en canal triangulaire à parois rugueuses.

(—) Première bissectrice

Les écarts relatifs entre les mesures expérimentales du rapport des hauteurs conjuguées et celles issues de l'équation globale d'ajustement (4.30) sont mentionnés au tableau 4.7, en vue de justifier la fiabilité de cette dernière. Le tableau 4.7, montre clairement que les erreurs relatives sont en majorité inférieure à 5%.

Tableau 4.7 : Ecart relatifs entre Y expérimental et Y de la relation 4.30.

Y exp	Y relation	$\Delta Y/Y$ (en %)
4,35	4,20	3,36
4,19	4,20	-0,33
5,34	5,45	-1,97
5,82	5,91	-1,55
3,87	3,83	1,03
4,21	4,23	-0,39
4,3	4,33	-0,69
4,73	4,81	-1,70
5,08	5,18	-1,87
5,79	5,88	-1,52
5,87	5,96	-1,45
6,03	6,18	-2,43
6,39	6,39	-0,02
2,22	2,24	-0,72
3,49	3,71	-6,34
4,45	4,37	1,88
4,54	4,49	1,06
4,65	4,61	0,77
4,81	4,82	-0,15
5,21	5,21	-0,10
5,37	5,38	-0,14
5,8	5,78	0,33
2,39	2,48	-3,80
4,2	4,26	-1,34
4,65	4,42	5,01
3,55	3,43	3,38
3,65	3,79	-3,82
4,1	4,17	-1,62
4,22	4,33	-2,69
4,55	4,55	0,04
4,74	4,81	-1,56
4,82	5,05	-4,84
4,46	4,51	-1,12
5,19	5,17	0,42
5,51	5,51	0,03
5,79	5,79	-0,01
6,07	6,06	0,23
6,26	6,23	0,49
6,39	6,35	0,58

Tableau 4.7 (suite et fin) Ecart relatifs entre Y expérimental et Y de la relation 4.30.

Y exp	Y relation	$\Delta Y/Y$ (en %)
1,77	1,73	2,22
2,36	2,39	-1,21
2,75	2,88	-4,63
3,34	3,11	6,82
3,38	3,27	3,20
3,45	3,48	-0,78
3,74	3,68	1,65
3,76	3,78	-0,61
4,11	4,03	1,83
4,19	4,14	1,08
1,9	1,80	5,14
2,05	2,05	-0,01
1,86	1,80	3,10
2,05	2,05	-0,01
2,6	2,57	1,32
2,96	2,80	5,42
3,05	2,94	3,76
3,16	3,09	2,17
3,25	3,22	0,87
3,56	3,65	-2,55
4,41	4,50	-2,08
4,58	4,67	-1,94
5,59	5,23	6,40
5,75	5,39	6,21
3,39	3,49	-2,92
3,77	3,76	0,17
4,38	4,25	2,88
4,57	4,56	0,15
4,88	4,73	3,02
5,42	5,38	0,82
5,86	5,75	1,95
1,74	1,79	-3,00
1,91	1,94	-1,45
2,03	2,16	-6,29
2,32	2,48	-6,92
3,27	3,44	-5,30
2,51	2,34	6,81
2,67	2,57	3,71
2,77	2,72	1,96
2,92	2,91	0,19
3,03	3,07	-1,43
3,12	3,19	-2,15
3,3	3,41	-3,38
3,38	3,51	-3,79
3,6	3,75	-4,17
3,14	2,97	5,50
3,58	3,52	1,68
2,06	1,93	6,11
2,18	2,11	3,25
2,31	2,31	0,16
2,56	2,64	-3,29
2,75	2,90	-5,37

IV.4.4.4. Rendement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses

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:

$$\eta = \Delta H / H_1 \quad (4.31)$$

$$\Delta H = H_1 - H_2 \quad (4.32)$$

H_1 et H_2 désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiales et finales du ressaut. Celles-ci sont définies par les relations (4.33) et (4.34):

$$H_1 = h_1 + V_1^2 / (2g) \quad (4.33)$$

$$H_2 = h_2 + V_2^2 / (2g) \quad (4.34)$$

En tenant compte de l'équation de continuité ($Q = V/A$), ces deux dernières relations s'écrivent :

$$H_1 = h_1 + Q^2 / (2g A_1^2) \quad (4.35)$$

$$H_2 = h_2 + Q^2 / (2g A_2^2) \quad (4.36)$$

$$\text{avec } A_1 = m h_1^2$$

Le nombre de Froude de l'écoulement incident dans un canal à section droite est défini par la

relation suivante :

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{g m^2 h_1^5} \quad (4.37)$$

En introduisant l'équation (4.37) dans la relation (4.31) on obtient l'expression (4.38) du rendement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}} \quad (4.38)$$

$Y = h_2/h_1$ étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

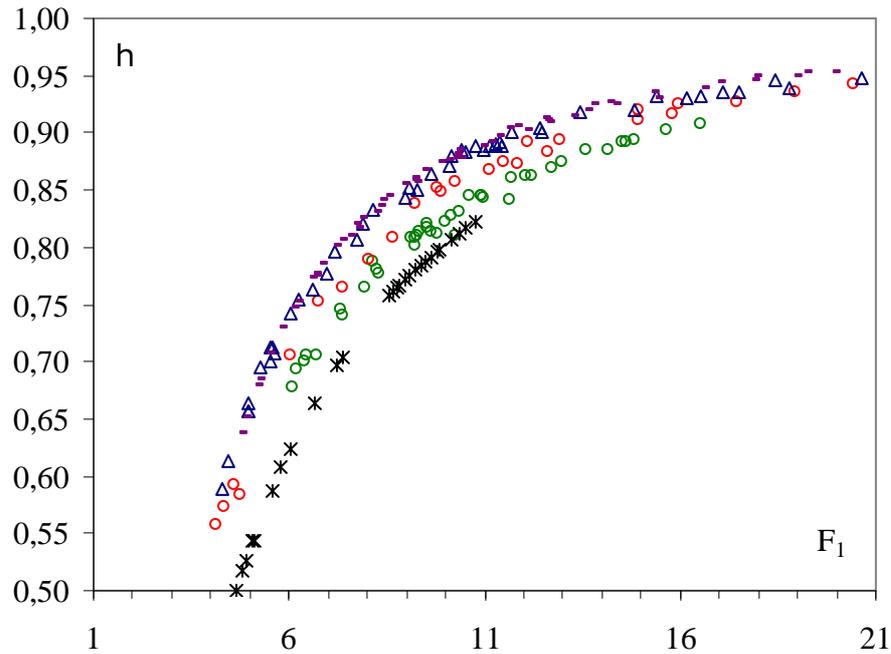


Figure 4.17 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour cinq valeurs différentes de ε (*) 0,00mm (o) 4,53mm (o) 6,04mm (Δ) 7,11mm et (-) 8,73mm.

La Figure (4.17) montre que pour une gamme pratique de Froude incident les points de mesure du ressaut à parois rugueuses sont au-dessus de ceux à parois lisses. En outre, le ressaut hydraulique dans le canal à parois rugueuses dissipe mieux l'énergie que son homologue à parois lisse. Donc, la figure montre que la dissipation de la charge hydraulique croit avec l'augmentation de la rugosité. Cependant, pour des nombres de Froude élevé, les points de mesures se rejoignent et l'effet de la rugosité s'atténue. Ceci peut être expliqué par le fait qu'au-delà d'un certain nombre de Froude pratique, le ressaut devient clapoteux et ne peut adhérer constamment au fond du canal (selon la classification de Bradley et Peterka, 1957).

IV.4.4.5. Profil de surface généralisé du ressaut

L'expérimentation nous a permis de définir le profil de la surface libre du ressaut depuis son origine jusqu'à sa section finale dans un canal triangulaire à parois rugueuses.

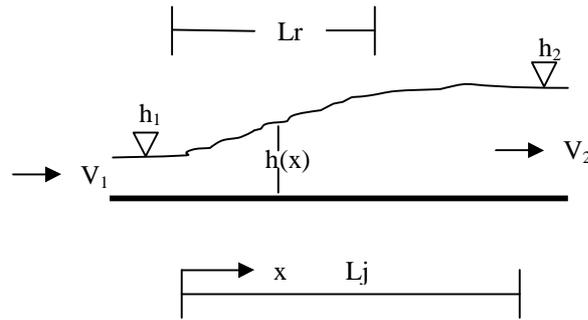


Figure (4.18) : Profil de surface du ressaut.

Comme le montre le schéma simplifié de la Figure (4.18), 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 $X = x / L_j$ variables adimensionnelles y et X sont limitées telles que : $0 \leq X \leq 1$ et $0 \leq y \leq 1$.

La variation du rapport y en fonction du rapport X est représentée à la Figure (4.19), cette figure montre les points de mesure expérimentales pour différentes rugosités.

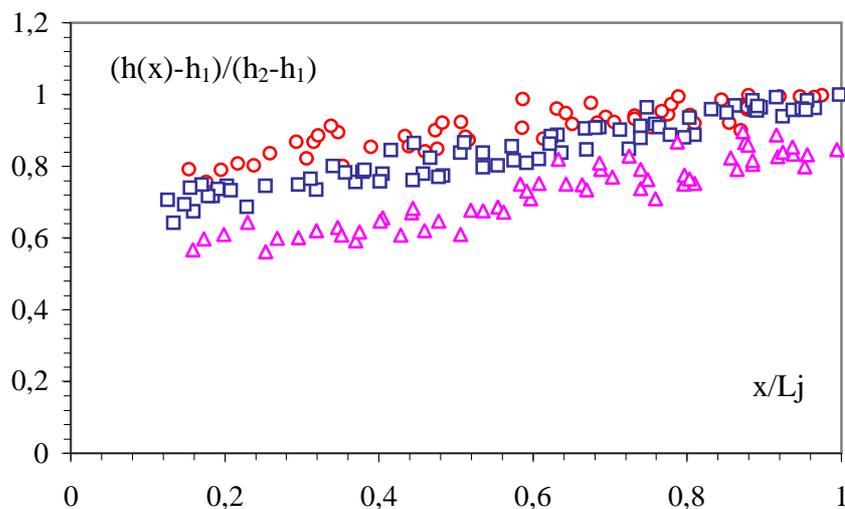


Figure 4.19: Profil de surface généralisé du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses pour trois rugosités distinctes
(\circ) 6,04mm (\square) 7,11mm et (\triangle) 8,73mm.

D'après la Figure (4.19) on constate que les nuages de points pour les trois rugosités étudiées sont distincts. Par ailleurs, pour le même rapport x/L_j , la valeur y augmente avec la diminution de la rugosité, ce qui montre clairement l'influence de la rugosité dans la réduction de la profondeur h_2 .

IV.4.4.6. Exemple d'application

Nous présentons ici, un exemple d'application des relations obtenues, pour le cas du ressaut hydraulique évoluant en canal triangulaire à parois rugueuses, de rugosité absolue $\varepsilon=5\text{mm}$.

Soient :

- $Q=120$ l/s, le débit volume passant par le bassin d'amortissement de section droite triangulaire à parois rugueuses à angle d'ouverture de 90° ($m=1$).

- $h_1=13$ cm, la hauteur initiale du ressaut.

- Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident est :

$$F_1 = 2. Q / (g.m h_1^2)^{0.5}, \text{ soit } F_1 \cong 8,9$$

- La longueur relative du ressaut est : $L_j/h_1 = (3,5-0,26 \varepsilon)(F_1-1)=17,36$

$$\text{d'où : } L_j \cong 226 \text{ cm}$$

- la hauteur relative du ressaut triangulaire à parois rugueuses $Y=h_2/h_1$ est:

selon l'approche expérimentale : $Y = (7,22-0,50 \varepsilon) \text{Ln}[(F_1+4)/5] - 0,61$

$$Y \cong 3,86 \text{ donc, } h_2 = 50,19 \text{ cm.}$$

cependant, selon l'approche semi-théorique : $Y = 1,055 F_1^{0,7} (1-0,101 \varepsilon)^{0,35} = 3,81$,
ainsi $h_2 = 49,50$ cm

d'où un écart relatif en les deux valeurs de : $\Delta Y/Y \cong 1,40\%$.

IV.5.CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'aborder, d'un point de vue théorique et expérimental, le ressaut hydraulique en canal triangulaire à parois rugueuses.

Un développement théorique nous a permis d'aboutir, dans un premier temps, à une relation de la forme $f(Y, F_1, C_r)=0$. Une relation approchée a été également proposée, en remplacement à la relation théorique très implicite en Y . Celle-ci a permis de trouver le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient C_r de résistance des parois du canal et du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

Dans un second temps, une analyse expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses a été effectuée. Quatre rugosités absolues ont alors été testées : $\varepsilon=4,53\text{mm}$, $\varepsilon=6,04\text{mm}$, $\varepsilon=7,11\text{mm}$ et $\varepsilon=8,73\text{mm}$. Pour chacune des rugosités étudiées,

l'expérimentation a été menée sous sept ouvertures de hauteurs : $1,8\text{cm} \leq h_1 \leq 5\text{cm}$ avec plusieurs seuils. Une large gamme de débit et nombre de Froude a été ainsi obtenue.

Dans tous nos essais, les débits volumiques Q sont mesurés par un déversoir à échancrure rectangulaire, sans hauteur de pelle avec contraction latérale.

L'étude s'est intéressée, en premier lieu, à la variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de nombre de Froude pour quatre valeurs de rugosité. Il ressort que la longueur relative L_j/h_1 augmente avec l'augmentation du nombre de Froude et diminue avec l'augmentation de la rugosité. En outre, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales montre qu'un ajustement de type linéaire est possible entre L_j/h_1 et F_1 .

L'étude expérimentale a analysé en second lieu la variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude incident, pour cinq valeurs différentes de rugosité. Nous constatons que le rapport des hauteurs conjuguées augmente également avec l'augmentation du nombre de Froude et diminue avec l'accroissement de la rugosité. L'analyse statistique des mesures expérimentales étudiées a montré en outre, qu'une relation de type logarithmique lie les paramètres Y , F_1 et ε .

L'étude expérimentale s'est intéressée, ensuite, à la dissipation d'énergie cinétique. En effet, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que le ressaut dans un canal triangulaire à parois rugueuses dissipe mieux l'énergie que son homologue à fond lisse.

Le dernier volet de cette étude expérimentale a abordé le profil généralisé du ressaut. En effet, pour les trois rugosités absolues $\varepsilon=6,04\text{mm}$, $\varepsilon=7,11\text{mm}$ et $\varepsilon=8,73\text{mm}$, la variation du rapport adimensionnel vertical y en fonction du rapport adimensionnel horizontal X montre que, pour le même X , la valeur de y augmente avec la réduction de la rugosité, par conséquent la profondeur du ressaut diminue avec l'augmentation de la rugosité.