

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie civil et Hydraulique
Réf :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية والري
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en Sciences

Spécialité: Sciences Hydrauliques

**LE RESSAUT HYDRAULIQUE DANS LES CANAUX
PRISMATIQUES A PAROIS RUGUEUSES**

Présentée par :
Ali GHOMRI

Soutenue publiquement le : 26/01/2012

Devant le jury composé de :

Pr. Bachir Achour.	Professeur.	Président.	Université de Biskra.
Pr. Mahmoud Debabeche.	Professeur.	Directeur de Thèse	Université de Biskra.
Pr. Abderrahmane Boudoukha.	Professeur.	Examineur	Université de Batna.
Pr. Boualem Remini .	Professeur.	Examineur	Université de Blida.
Pr. Ahmed Ouamane.	Professeur.	Examineur	Université de Biskra.
Dr. Larbi Houichi.	Docteur.	Examineur	Université de Batna.

I.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons examiner les travaux les plus intéressants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire. Deux types de ressaut seront alors étudiés :

- Le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons des travaux de HAGER et WANOSCHEK (1987) concernant le ressaut "triangulaire" du type A évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° . A travers une étude expérimentale assez particulière, les auteurs proposent, notamment, une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut L_r/h_2 et L_j/h_2 , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de m .

En fait, HAGER et WANOSCHEK (1987) extrapole les résultats issus d'un profil semi triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° .

- Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° . Nous examinerons en particulier l'approche de DEBABECHE et ACHOUR (2003), consacrée à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par seuil à paroi mince . L'étude concernera l'analyse des différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. Des relations simples à l'emploi, liant des paramètres adimensionnels, seront alors proposées.

I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

Le ressaut hydraulique est défini comme le passage de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial. Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur L_r appelée longueur du rouleau. Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal de section droite triangulaire de pente nulle ou faible.

Les caractéristiques du ressaut sont principalement :

Les longueurs L_r et L_j qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut

Les hauteurs h_1 et h_2 , appelées également hauteurs conjuguées .

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ses sections.

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

Il a été établi que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation $Y = \frac{h_2}{h_1}$ des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude incident F_1 .

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

1.2.1. Forme du ressaut classique

Selon la classification proposée par BRADLEY et PETERKA (1957), le ressaut classique peut se présenter sous quatre configurations distinctes. Cette classification se base principalement sur la valeur du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, en excluant les formes obtenues pour $F_1 < 1,7$. Ces dernières sont décrites par plusieurs auteurs tel que ANDERSON (1978) et ne répondent pas aux exigences d'un bassin de dissipation d'énergie ; les ressauts correspondants sont dits ondulés présentant tantôt une surface libre régulièrement perturbée et lisse ($1 < F_1 < 1,4$), tantôt une surface libre irrégulièrement ondulée ($1,4 < F_1 < 1,7$).

Selon la classification de BRADLEY et PETERKA (1957) on distingue quatre configurations de ressaut :

a. Le pré - ressaut

Il est obtenu pour la gamme $1,7 < F_1 < 2,5$ (Figure 1.1,a). La surface du ressaut est composée d'une série de petits rouleaux pour $F_1 = 1,7$; ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible.

b. Ressaut de transition

Le ressaut de transition est obtenu pour la gamme $2,5 < F_1 < 4,5$ (Figure 1.1,b). Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

c. Ressaut stable

Il est obtenu pour la gamme $4,5 < F_1 < 9$ (Figure 1.1,c). C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans les bassins de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

d. Ressaut agité ou clapoteux

Obtenu pour $F_1 > 9$ (Figure 1.1,d). Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très grande. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.

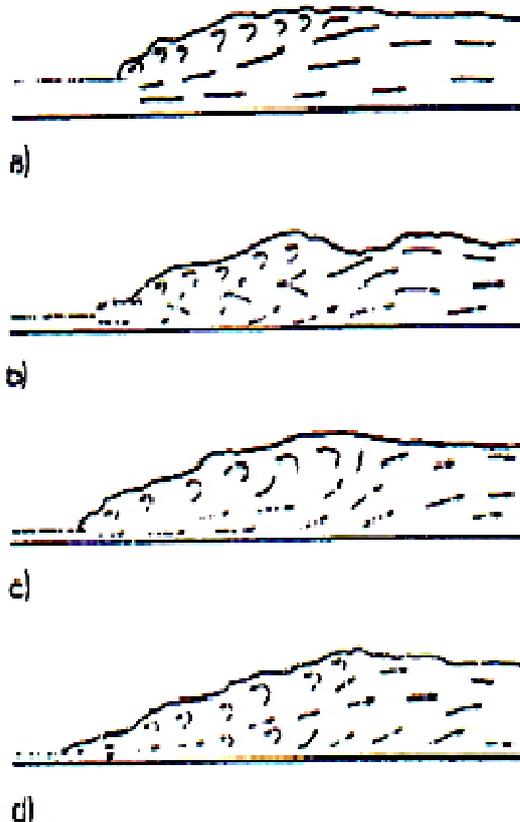


Figure 1.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de BRADLEY et PETERKA(1957). a) Pré-ressaut, b) Ressaut de transition, c) Ressaut stable, d) Ressaut agité.

I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

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

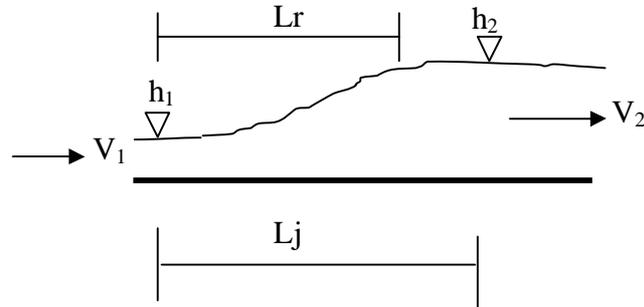


Figure 1.2 : Ressaut hydraulique classique.

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

$$V_1 = Q / A_1 \quad (1.1)$$

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

$$A_1 = m h_1^2 \quad (1.2)$$

m : cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal à section droite triangulaire symétrique par rapport à l'horizontal.

I.2.2.1. Longueurs caractéristiques du ressaut

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

I.2.2.2. Longueur du rouleau

En 1990 HAGER définit en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisant ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé.

La Figure (1.3) montre ces deux types de ressaut et les longueurs L_r qui leur correspondent.

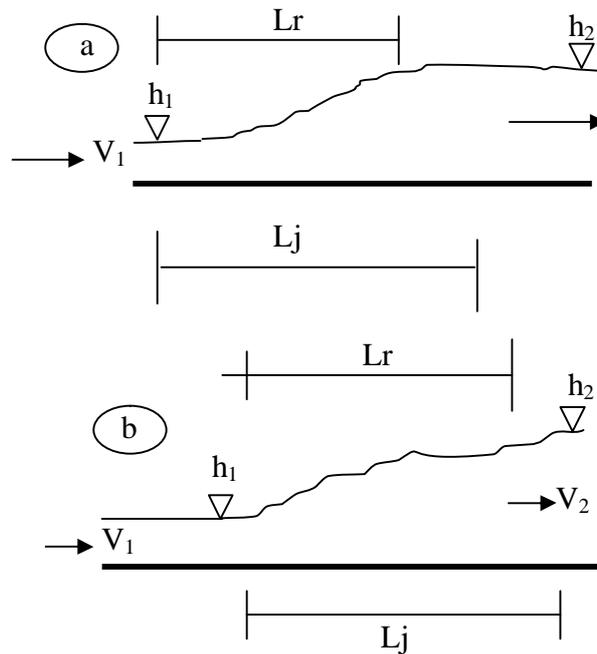


Figure 1.3 : Aspect du ressaut classique. a) Développé. b) Non développé.

Le rouleau non développé est caractérisé par une longueur plus courte que celle du rouleau développé et sa surface à l'aval se présente sous l'aspect de vagues. Au fond de la masse liquide en mouvement, on peut distinguer une zone de rouleau dite de séparation formant un tourbillon de fond. En raison de la présence de cette zone, le jet entrant dans la section initiale du ressaut est dévié vers la surface libre (Debabeche, 2003).

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

I.2.3. Approche de Hager et Wanoschek

Hager et Wanoschek (1987) ont étudié le ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal de forme triangulaire du type A évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 45° . A travers une étude expérimentale, les auteurs proposent, notamment, une relation générale pour le calcul des longueurs caractéristiques du ressaut L_r/h_2 et L_j/h_2 , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de m .

Hager et Wanoschek (1987) extrapolent les résultats issus d'un profil semi-triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° .

Les essais de Hager et Wanoschek (1987) sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire ont été réalisés dans un canal rectangulaire de largeur $b = 30$ cm dans lequel a été insérée une paroi en PVC inclinée d'un angle de 45° par rapport à l'horizontal. Le profil obtenu est devenu alors de forme semi-triangulaire comme l'indique la Figure (1.4).

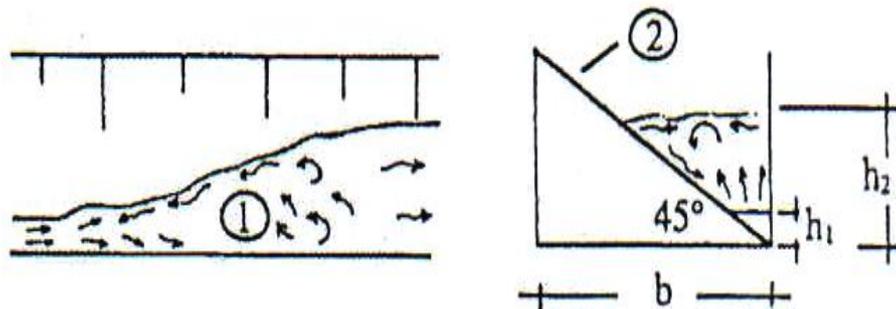


Figure 1.4: Ressaut hydraulique en canal semi-triangulaire selon Hager et Wanoschek(1987).

1) Vue en plan du ressaut. 2) Coupe transversale d'une paroi en PVC inclinée de 45° .

h_1 et h_2 : Hauteurs conjuguées du ressaut.

I.2.4. Analyse des résultats

I.2.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées

Sous l'hypothèse de l'uniformité des pressions et des vitesses, l'application de l'équation de la quantité de mouvement, entre les sections initiale et finale d'un ressaut évoluant dans un canal horizontal de section droite trapézoïdale, mène à écrire:

$$\frac{b.h_1^2}{2} + \frac{m.h_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b.h_1 + m.h_1^2)} = \frac{b.h_2^2}{2} + \frac{m.h_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b.h_2 + m.h_2^2)} \quad (1.3)$$

h_1 et h_2 sont respectivement les hauteurs initiale et finale du ressaut, b est la base du canal trapézoïdal, Q désigne le débit volume, m représente la cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontal et g est l'accélération de la pesanteur.

L'équation (1.1) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (1.4)$$

dans laquelle F_1 représente le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut et M désigne la hauteur relative initiale du ressaut :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b + 2mh_1)}{g(bh_1 + mh_1^2)^3}, \quad Y = \frac{h_2}{h_1}, \quad M = \frac{mh_1}{b} \quad (1.5)$$

La relation (1.4) exprime la variation du nombre de Froude à l'amont du ressaut en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées et de la hauteur relative M , dans un canal trapézoïdal. Les équations régissant les ressauts en canal de section rectangulaire et triangulaire peuvent être déduites de la relation (1.4). Le canal de section droite rectangulaire constante est un cas particulier du canal trapézoïdal pour lequel l'angle d'inclinaison du talus par rapport à l'horizontal est de 90° ; ceci correspond donc à $m = \cotg 90^\circ = 0$, ou bien à $M=0$. Par contre, le profil triangulaire correspond à un profil trapézoïdal de base $b=0$, soit $M \rightarrow \infty$, l'équation (1.4) s'écrit :

$$Y^* = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F - \frac{1}{2} \quad (1.6)$$

Sur la Figure (1.5) est représentée graphiquement, dans un système d'axes de coordonnées cartésiennes, la relation (1.4) :

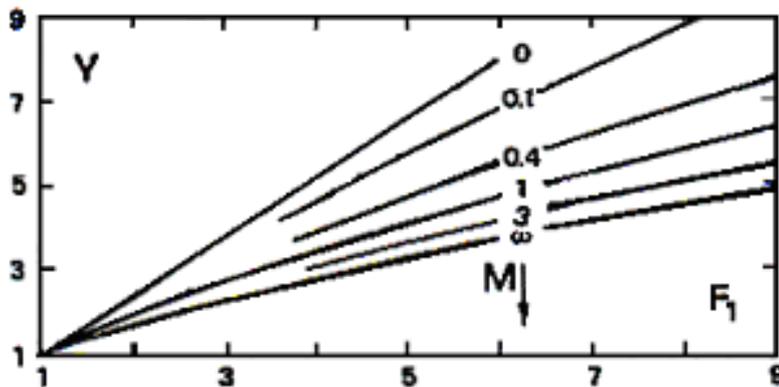


Figure 1.5 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de la hauteur relative M .

$M=0$: profil rectangulaire.

$M \rightarrow \infty$: profil triangulaire .

$0 < M < \infty$: profils trapézoïdaux.

La Figure 1.5 montre nettement que la plus faible valeur de rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut est obtenue dans le cas du profil triangulaire, pour une même valeur du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. L'équation de la courbe enveloppe inférieure de la Figure (1.5) traduit la variation du rapport Y du ressaut dans un canal de section droite triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 .

$$F_{1T}^2 = \frac{2Y_T^2(Y_T^2 + Y_T + 1)}{3(Y_T + 1)} \quad (1.7)$$

L'indice ' T ' indique le profil triangulaire. L'équation (1.7) montre que Y_T s'exprime de manière fortement implicite en fonction de F_{1T} . HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent alors la relation approchée :

$$Y_T = \left(\frac{3}{2} F_{1T}^2 - 1 \right)^{1/3} \quad (1.8)$$

I.2.4.2. Equation de la quantité de mouvement

Les essais effectués par HAGER et WANOSCHEK(1987) dans un canal semi-triangulaire d'angle d'ouverture de 45° , extrapolés ensuite au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° , ont montré que les rapports Y expérimentaux sont légèrement inférieurs aux rapports Y théoriques obtenus par application de la relation (1.8) ; cet écart est attribué à l'effet des frottements sur les parois du canal et les auteurs proposent alors de modifier l'équation de quantité de mouvement en tenant compte des pertes de charge le long des parois du canal. Le gradient de pertes de charge S_f est évalué par la formule de BLASIUS :

$$S_f = \frac{0,3164 \cdot V^2}{R_e^{0,35} \cdot 8 \cdot g \cdot R_h} \quad (1.9)$$

Avec :

$$R_e = \frac{4R_h \times V}{\nu} \quad : \text{Nombre de Reynolds.}$$

$$R_h = \frac{mh}{2\sqrt{1+m^2}} \quad : \text{Rayon hydraulique correspondant au profil semi triangulaire et } \nu \text{ la}$$

viscosité cinématique.

Le profil de surface du ressaut suit approximativement la loi $h(x) = h_1 + (h_2 - h_1) X^2$, dans laquelle x représente la coordonnée longitudinale comptée à partir du début du ressaut et X est la coordonnée x rapportée à la longueur L_j du ressaut, soit $X=x/ L_j$. La coordonnée x est telle que $0 \leq x \leq L_j$ et par suite $0 \leq X \leq 1$.

La force de frottement agissant sur le volume de contrôle correspondant à $0 \leq x \leq L_j$ par définition :

$$W_x = \varpi \int A(x) \cdot S_f \quad (1.10)$$

$\varpi = \rho \cdot g$ est le poids volumique du liquide, $A(x)$ l'aire de la section mouillée correspondant à x . Pour le cas du profil semi triangulaire d'angle d'ouverture de 45° ($m=1$), la relation (1.9) devient :

$$S_f = \left[\frac{2Q}{mh_1^2} \right]^{7/4} \frac{\nu^{1/4}}{5gh_1^2} \left[\frac{h(x)}{h_1} \right] \quad (1.11)$$

La relation (1.11) s'écrit alors :

$$W_x = (\varpi \cdot m \cdot h_1^2 / 2) \cdot L_j \cdot S_f \cdot I(Y) \quad (1.12)$$

$$I(Y) = \int \frac{dx}{[1+(Y-1)X^2]^{1/4}} \quad (1.13)$$

$$\text{Soient : } Y = \frac{h_2}{h_1} ; \quad X = \frac{x}{L_j}$$

$$S_f = S_f \cdot \left[\frac{h(x)}{h_1} = 1 \right] \quad (1.14)$$

L'intégration numérique de $I(Y)$ donne approximativement :

$$I(Y) = \frac{1}{7} \left(1 + \frac{6}{Y} \right) \quad (1.15)$$

Pour les nombres de Froude $F_1 < 15$, correspondant à des rapports $Y < 7$, l'application de la relation approchée (1.15) occasionne une erreur relative inférieure à 5% par rapport à la valeur exacte calculée par l'équation (1.13).

En tenant compte de la force W_x l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre les sections initiale et finale du ressaut évoluant dans un canal à section droite semi triangulaire s'écrit :

$$\frac{mh_1^3}{6} + \frac{Q^2}{g(mh_1^2)} = \frac{mh_2^3}{6} + \frac{Q^2}{g(mh_2^2)} + W_x \quad (1.16)$$

En désignant par :

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{gmh_1^5}, \quad A = \left[\frac{vmh_1}{2Q^2} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad S_f = A \left(\frac{F_1^2}{10} \right)$$

La relation (1.16) s'écrit en termes adimensionnels :

$$1 + \frac{3}{2} F_1^2 = Y^3 + \frac{3F_1^2}{2Y^2} + \frac{3AL_j}{70h_1} \left(1 + \frac{Y}{6} \right) F_1^2 \quad (1.17)$$

La longueur relative L_j/h_1 dans la relation (1.17) peut s'écrire : $L_j/h_1 = Y \cdot (L_j/h_2)$. HAGER et WANOSCHEK (1987) estiment que pour un canal triangulaire correspondant à $m=1$, $L_j/h_2 \approx 6$. Par suite, la relation (1.17) s'écrit en définitive :

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^3 - 1)}{3 \left[Y^2 - 1 - \frac{AY^2}{6}(6 + Y) \right]} \quad (1.18)$$

Cette relation finale explique donc la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut dans un canal de section droite triangulaire ($m = 1$) en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, en tenant compte de l'effet des frottements sur les parois du canal. Cet effet est traduit par le paramètre adimensionnel A . lorsque $A \rightarrow 0$, l'effet des frottements est négligeable et la relation (1.7) est reproduite. HAGER et WANOSCHEK (1987) ont montré que l'écart maximal observé entre les valeurs expérimentales des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut et celles obtenues de l'application de la relation (1.18) ne dépasse guère 3 %.

la Figure (1.6) montre les mesures expérimentales de HAGER et WANOSCHEK (1987) comparées à la fois aux valeurs théoriques obtenues par l'application de la relation (1.7) pour ($A \rightarrow 0$) et à celles issues de l'équation (1.16) pour $A > 0$.

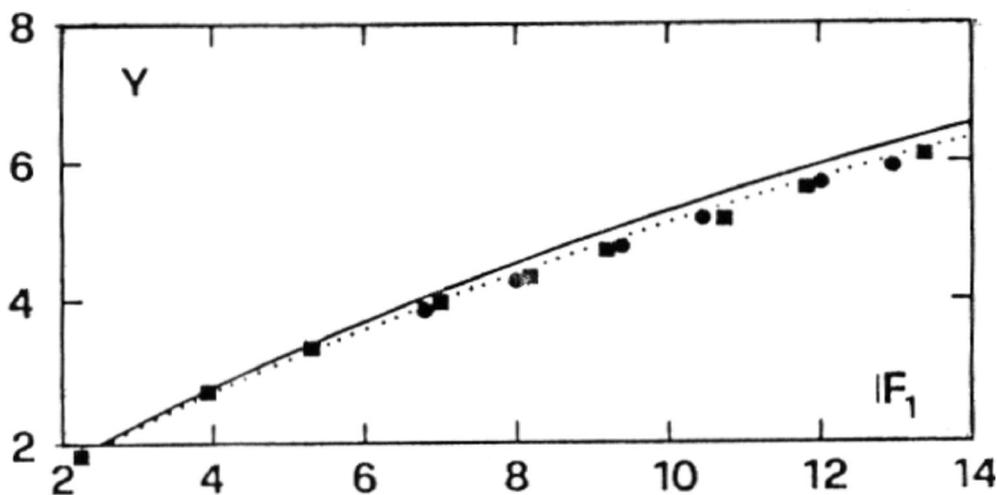


Figure 1.6 : Variation des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut triangulaire ($m=1$) en fonction du nombre de Froude F_1 , selon HAGER et WANOSCHEK (1987). (—) Courbe tracée selon la relation (1.7). $A=0$
(----) Courbe tracée selon la relation (1.18). $A>0$.

I.2.4.3 . Longueur caractéristique du ressaut

La longueur L_j du ressaut est définie comme étant la distance entre le pied du ressaut et la section à l'aval où la surface libre de l'écoulement est maximale et tend à devenir

parallèle au fond du canal. Par contre, la longueur L_r , est la longueur sur laquelle s'étend le rouleau de surface.

Sur la Figure (1.7) sont représentées les mesures expérimentales de RAJARATNAM (1964) ($m=0,58$) et celles de HAGER et WANOSCHEK (1987) ($m=1$), qui concernent la longueur relative L_r/h_2 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. Il apparaît ainsi que la longueur relative L_r/h_2 dépend uniquement de m et de F_1 . La Figure (1.7) montre également que la longueur relative L_r/h_2 croît au fur et à mesure que F_1 augmente et qu'elle décroît avec l'augmentation de m .

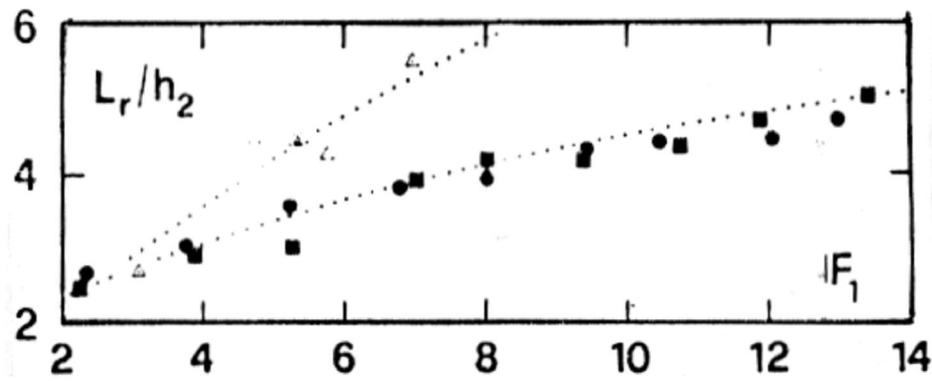


Figure 1.7 : Longueur relative L_r/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 selon HAGER et WANOSCHEK (1987) (●) ($m = 1$).
(Δ) : $m = 0,58$ selon Rajaratnam (1964).

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

$$\frac{L_r}{h_2} = 1,8(m)^{0,5} F_1^{\frac{0,4}{m}} \quad 0,4 < m < 1 \quad (1.19)$$

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

En ce qui concerne la longueur relative L_r/h_2 du ressaut dans un canal triangulaire, les mesures expérimentales de HAGER et WANOSCHEK (1987) ainsi que celles d'ARGYROPOULOS (1962) sont représentées sur la Figure (1.8), en fonction du nombre de

Froude F_1 . Nous pouvons alors remarquer, comme pour L_r/h_2 , que la longueur relative L_j/h_2 dépend à la fois du nombre de Froude F_1 et du paramètre m . La Figure (1.8) montre en outre que L_j/h_2 varie dans le même sens que F_1 et en sens inverse de m . En incluant les mesures d'ARGYROPOULOS (1962), HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent de calculer L_j/h_2 par application de la relation :

$$\frac{L_j}{h_2} = 2,4 \cdot (m)^{0,5} \cdot F_1^{\frac{0,4}{m}}, \quad 0,4 < m < 1 \quad (1.20)$$

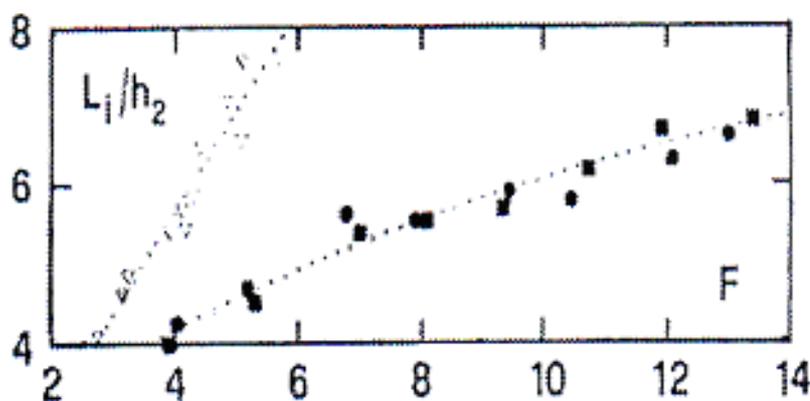


Figure 1.8 : Longueur relative L_j/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 , selon HAGER et WANOSCHEK (1987) (\bullet) ($m=1$). (∇) : $m = 0,44$ selon ARGYROPOULOS (1962).

I.2.4.4. Profil de surface généralisé du ressaut

L'introduction des variables $X=x/L_j$ et $y(x) = [h(x) - h_1] / (h_2 - h_1)$ permet de tracer le long de l'axe longitudinal du canal, le profil de surface du ressaut sous la forme adimensionnelle ; $h(x)$ désigne la hauteur du ressaut à la distance x comptée à partir du pied du ressaut. Pour $x=0$, correspondant à $X=0$, nous pouvons écrire que $h(x)=h_1$ et par suite $y=0$. Par contre, pour $x=L_j$, correspondant à $X=1$, nous pouvons écrire que $h(x)=h_2$ et $y=1$. Les variables adimensionnelles X et $y(x)$ décrivant le profil de surface du ressaut le long de l'axe longitudinal du canal sont telles que $0 \leq X \leq 1$ et $0 \leq y \leq 1$.

La Figure (1.9) représente les mesures expérimentales de HAGER et WANOSCHEK (1987) concernant le profil de surface généralisé du ressaut en canal triangulaire le long de l'axe longitudinal du canal.

Les points de mesures, obtenus pour $6,8 \leq F_1 \leq 11,8$; se situent ainsi sur une courbe d'équation approchée:

$$Y(X) = (1 + \alpha X) \cdot \tanh(\beta X) \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (1.21)$$

où '*tanh*' désigne la tangente hyperbolique.

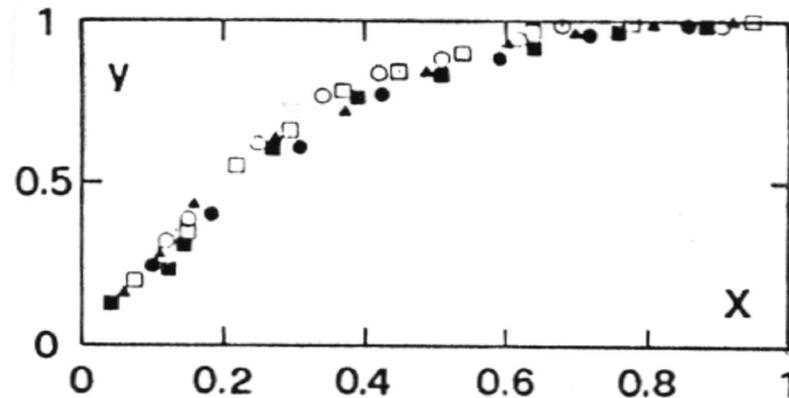


Figure 1.9 : Profil de surface généralisé $Y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ($m = 1$), selon HAGER et WANOSCHEK (1987).

La Figure (1.9) montre que le profil de surface généralisé est quasiment linéaire pour la gamme $0 \leq X \leq 0,2$. La droite, représente la partie linéaire du profil passe par le point de coordonnées $(0,0)$ et coupe approximativement l'axe parallèle à X au point de coordonnées $(0,4 ; 1)$; le paramètre β figurant dans la **relation (1.21)** a donc pour valeur : $\beta = (1-0)/(0,4-0) = 1/0,4$; soit $\beta = 2,5$. Ainsi, le paramètre α peut être déterminé en écrivant que $Y(X) = 1$, soit $1 = (1 + \alpha) \cdot \tanh(2,5)$, par suite $\alpha = 0,014$. Le profil de surface généralisé accepte ainsi pour équation :

$$Y(X) = (1 + 0,014 \cdot X) \cdot \tanh(2,5 \cdot X) \quad , \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (1.22)$$

I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL MINCE DANS UN CANAL TRIANGULAIRE.

I.3.1. Approche de Achour et Debabeche (2003)

I.3.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Lors du contrôle du ressaut, la mise en place du seuil à l'aval n'a théoriquement aucun effet réducteur sur le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut classique. Sous les mêmes conditions de l'écoulement amont, c'est à dire sous la condition de l'identité des débits volumes et des hauteurs initiales du ressaut, la hauteur finale h_2^* du ressaut classique est théoriquement égale à celle du ressaut contrôlé par un seuil.

La figure 1.10 montre à la fois la variation de Y^* et de Y_s en fonction du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement incident.

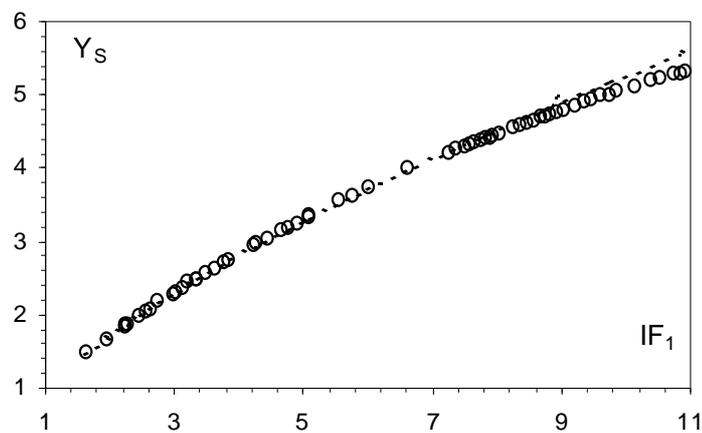


Figure 1.10 : Variation du rapport $Y_s = f(F_1)$ dans un canal triangulaire.

(---) Ressaut classique. (o) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

La figure 1.10 montre que l'égalité $Y^* = Y_s$ n'est vérifiée que pour une certaine gamme de valeurs du nombre de Froude F_1 . L'influence du seuil à paroi mince se manifeste à des valeurs du nombre de Froude F_1 supérieures à 7,5. Cette influence s'accroît au fur et à mesure que F_1 augmente, mais ne semble pas être significative. La représentation graphique des points expérimentaux des rapports Y_s en fonction de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil a abouti à une courbe unique, comme l'indique la figure 1.11. Celle-ci montre clairement que les points expérimentaux obtenus s'alignent suivant une droite passant par le point (0,1). Suite à un ajustement linéaire. Achour et Debabeche (2003) ont déterminé la relation suivante :

$$Y_s = 1 + 0,96 \cdot S \quad (1.23)$$

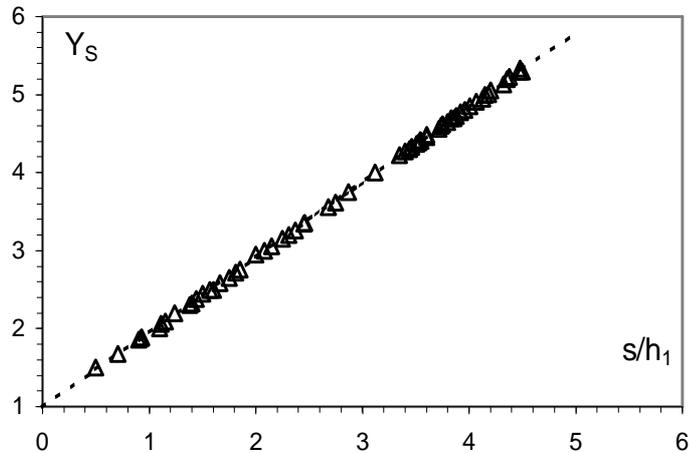


Figure 1.11 :Variation expérimentale de $Y_S = f(S)$ lors du contrôle d'un ressaut triangulaire.

(Δ) Points expérimentaux. (---) Courbe tracée selon la relation (1.23).

I.3.1.2. Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude

Achour et Debabeche (2003) ont montré précédemment que l'influence du seuil sur la hauteur finale du ressaut, et de même pour le rapport Y , n'était pas significative. Il a trouvé également qu'une relation unique existe entre la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil et le rapport Y_S des hauteurs conjuguées du ressaut. Ces considérations laissent l'auteur penser qu'une relation unique peut être obtenue entre la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil et le nombre de Froude F_1 .

La figure 1.12 montre en conséquence que les points de mesures expérimentaux obtenus suivent, dans leur totalité, la variation d'une courbe unique de type logarithmique

L'ajustement des couples de valeurs (F_1, S) , suivant la méthode des moindres carrés non linéaires, à donner la relation :

$$S=s/h_1 = 4,125 \cdot \text{Ln}[(F_1 + 4)/5] \quad (1.24)$$

« Ln » désigne le logarithme népérien.

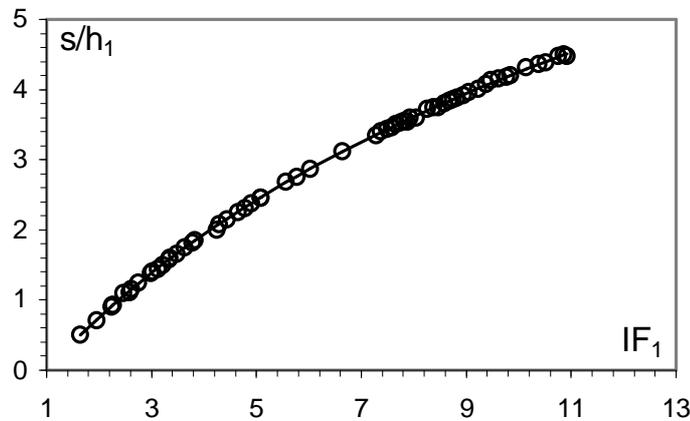


Figure 1.12 : Variation expérimentale de la hauteur relative S du seuil, en fonction du nombre de Froude F_1 . (o) Points expérimentaux
(---) relation d'ajustement

La relation ci-dessus, ainsi que la tendance des mesures expérimentales représentées par la figure 1.12, montre que pour $F_1 = 1$ la hauteur relative S du seuil est nulle.

Comparée à la courbe expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil mince dans un canal rectangulaire, la figure 1.12 indique que pour le cas du ressaut triangulaire la hauteur relative s/h_1 ne dépend nullement de la position x/h_2 du seuil.

En outre, le contrôle du ressaut rectangulaire nécessite des hauteurs relatives s/h_1 beaucoup plus importantes, pour un même nombre de Froude F_1 .

I.3.1.3. Relation générale régissant le contrôle du ressaut

Selon Achour et Debabeche (2003), l'analyse adimensionnelle montre qu'il existe une relation générale liant les paramètres F_1 , s/h_1 et x/h_1 . Cette dernière peut s'écrire sous la forme $f(s/h_1, F_1, x/h_1) = 0$. L'analyse des mesures expérimentales obtenues a montré que la meilleure représentation graphique adimensionnelle de la fonction f est celle indiquée par la figure 1.13. Les points expérimentaux se situent en fait, pour $x/h_1 \geq 4$ (condition largement réalisée dans la pratique), sur une droite d'équation : $(S + F_1^{0.4}) = a.(x/h_1) + b$. Les valeurs des constantes a et b ont été obtenues par un ajustement linéaire. Donc, la relation générale régissant le contrôle du ressaut triangulaire en présence d'un seuil à paroi mince s'écrit :

$$S + F_1^{0.4} = 0,127.(x/h_1) + 1,269 \quad , x/h_1 \geq 4 \quad (1.25)$$

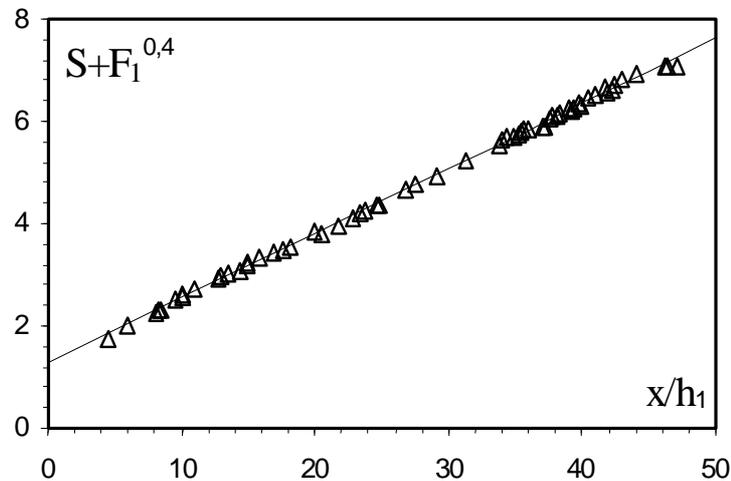


Figure 1.13 : Variation de $(S+F_1^{0,4})$ en fonction de la position relative x/h_1 du seuil
 (Δ) points expérimentaux (---) droite d'ajustement

I.3.1.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé, au premier lieu, les travaux de HAGER et WANOSCHEK (1987) ; ces études ont concerné le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture 90° . Les auteurs ont suivi une démarche expérimentale un peu particulière, car ils ont extrapolé les résultats issus d'un profil semi-triangulaire à angle d'ouverture de 45° à un canal symétrique à angle d'ouverture de 90° .

L'étude montre que les rapports Y expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs à ceux calculés par l'équation de la quantité de mouvement. Cette différence est attribuée à l'effet des frottements sur les parois du canal et l'équation de la quantité de mouvement est alors modifiée en tenant compte de ceux-ci. L'effet des frottements est traduit par le paramètre adimensionnel $A = [vmh_1/(2Q)]^{1/4}$. Lorsque $A = 0$, aucun effet des frottements n'est observé et l'équation de quantité de mouvement sous sa forme classique est applicable.

HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut L_r/h_2 et L_j/h_2 , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de m .

Enfin, L'étude aborde le profil de surface généralisé du ressaut. Une équation représentative du profil de surface généralisé le long de l'axe du canal est alors proposée.

Nous avons présenté par la suite l'approche de Achour et Debabeche (2003) qui a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° . Le ressaut est contrôlé de telle sorte que sa longueur L_j soit approximativement égale à la longueur du bassin, délimité à l'amont par le pied du ressaut et à l'aval par le seuil. L'expérimentation a eu pour objectif de corrélérer les différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. L'étude de Achour et Debabeche (2003) montre que ces paramètres sont en nombre de cinq, et pouvant former trois produits adimensionnels $S=s/h_1$, F_1 et x/h_1 ; S est la hauteur relative du seuil et x/h_1 sa position relative. L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a pu mener à l'établissement de relations simples à l'emploi, liant les trois variables adimensionnelles ci-dessus citées, **pour le type de seuil considéré.**

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre il sera question des travaux les plus importants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en “U”. Deux types de ressaut seront alors étudiés: le ressaut hydraulique classique, où l’on abordera l’approche de Hager (1987 et 1989) concernant le ressaut hydraulique classique d’une part; et le ressaut hydraulique contrôle par seuil, relatif aux travaux de Debabeche et Achour (2000).

II.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE EN CANAL PROFILE EN “U”

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 (Hager (1987)).

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.

II.2.1. APPROCHE DE HAGER (1987 et 1989)

II.2.1.1. 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 hauteurs : $y = h/D < 1/2$ 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 $y < 1/2$:

$$\begin{aligned} A/D^2 &= (\theta - \sin\theta \cos\theta) / 4 \\ U/D &= \theta \\ R/D &= (1 - \sin\theta \cos\theta) / \theta \\ W/D^3 &= (\sin\theta - \sin^3\theta / 3 - \theta \cos\theta) / 8 \end{aligned} \quad (2.1)$$

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

$$\begin{aligned} A/D^2 &= y + \pi/8 - 1/2 \\ U/D &= 2y + \pi/2 - 1 \\ R/D &= (y + \pi/8 - 1/2) / (2y + \pi/2 - 1) \\ W/D^3 &= (1/2)(y - 1/2)^2 + (\pi/8)(y - 1/2) + 1/12 \end{aligned} \quad (2.2)$$

A/D^2 , R/D et W/D^3 en fonction de la hauteur de remplissage y sont représentés à la figure 2.1

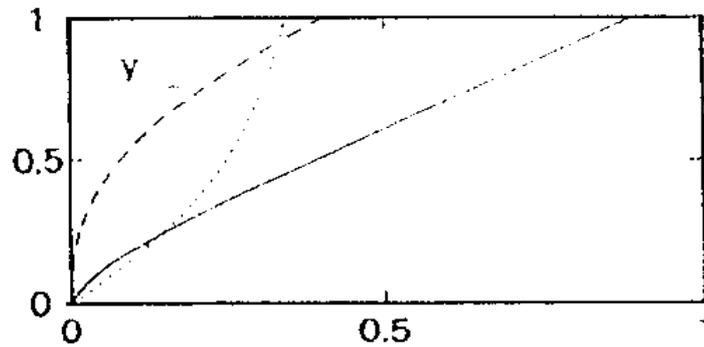


Figure 2.1 : géométrie de la section en forme de "U". (—) A/D^2 , (.....) R/D et (---) W/D^3 en fonction de la hauteur $y = h/d$.

L'inconvénient dans la description des sections en forme de "U" est la composition des caractéristiques de celles-ci d'après les équations (2.1, 2.2).

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

$$A/D^2 = (4/3) y^{3/2} (1 - (1/3) y) ;$$

$$R/D = (2/3) y (1 - (1/2) y) ; \quad 0 < y < 1 \quad (2.3)$$

$$W/D^3 = (8/15) y^{5/2} (1 - (1/4) y) ;$$

La figure 2.2 représente l'erreur relative $f = (\Delta_{\text{approché}} - \Delta_{\text{exact}}) / \Delta_{\text{exact}}$ de la dimension considérée Δ entre les fonctions approximatives (2.3) et les expressions géométriques exactes (2.1, 2.2). On relève des tolérances de moins de 4% pour $y < 1$, pour les équations (2.3).

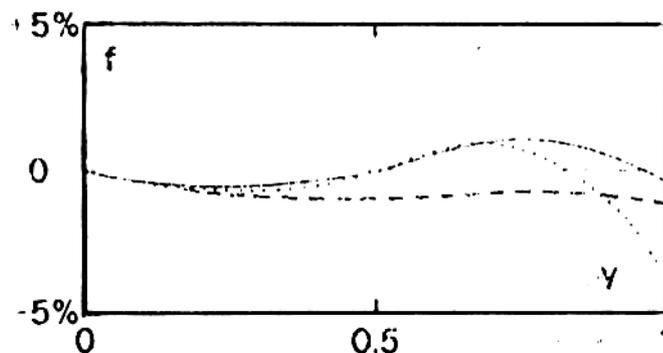


Figure 2.2 : erreur relative f entre les équations (2.1, 2.2) et (2.3). Mêmes notations que la figure 2.1.

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.

II.2.1.2. 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 (2.3)₁ et (2.3)₃, l'équation suivante :

$$\frac{8}{15}y_1^{5/2}\left(1-\frac{1}{4}y_1\right)+q^2\left[\frac{4}{3}y_1^{3/2}\left(1-\frac{1}{3}y_1\right)\right]^{-1}=\frac{8}{15}y_2^{5/2}\left(1-\frac{1}{4}y_2\right)+q^2\left[\frac{4}{3}y_2^{3/2}\left(1-\frac{1}{3}y_2\right)\right]^{-1} \quad (2.4)$$

Celle-ci peut également s'écrire comme suit :

$$q=\left[\frac{\frac{8}{15}y_2^{5/2}\left(1-\frac{1}{4}y_2\right)-\frac{8}{15}y_1^{5/2}\left(1-\frac{1}{4}y_1\right)}{\left[\frac{4}{3}y_1^{3/2}\left(1-\frac{1}{3}y_1\right)\right]^{-1}-\left[\frac{4}{3}y_2^{3/2}\left(1-\frac{1}{3}y_2\right)\right]^{-1}}\right]^{1/2} \quad (2.5)$$

On désigne par 1 et 2 la position immédiatement avant et après le ressaut. Soit $q^2=Q^2/(g.D^5)$ la relation liant q , y_1 et y_2 . Celle-ci est présentée dans la figure 2.3.

L'auteur fait remarquer qu'une relation peut aussi être établie entre F_1 , y_1 et y_2 .

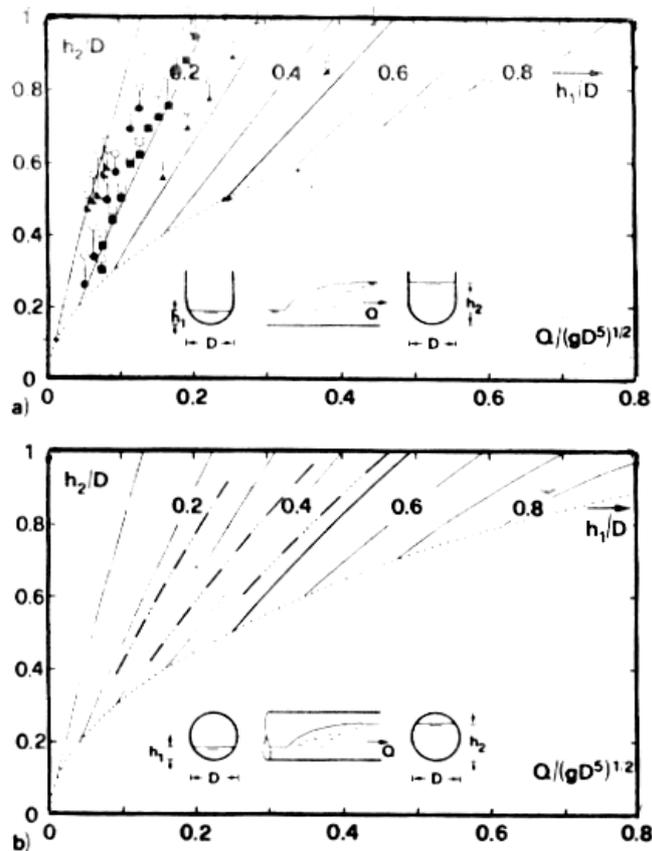


Figure 2.3 : Variation du rapport y_2 de hauteurs conjuguées en fonction du débit relatif q pour quelques valeurs de y_1 . a) canal en "U". b) conduite circulaire.

Il est remarquable que pour des valeurs fixes de q et y_1 , la hauteur conjuguée y_2 d'après l'expérience soit toujours plus petite que celle d'après l'équation (2.4). 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.2.3.b).

II.2.1.3. 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 F_1 est représenté dans la figure 2.4, 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 F_1 . L'effet de y_1 sur L_j/h_2 n'a pas été défini.

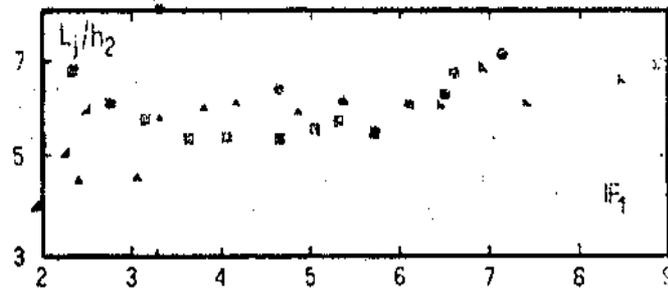


Figure 2.4 : longueur relative L_j/h_2 du ressaut, en fonction du Nombre de Froude F_1

II.2.1.4. Profils de surface du ressaut

Hager a représenté les profils axiaux de surface en fonction du nombre de Froude F_1 (figure 2.5), cependant il n'y a pas de généralisation du profil de surface.

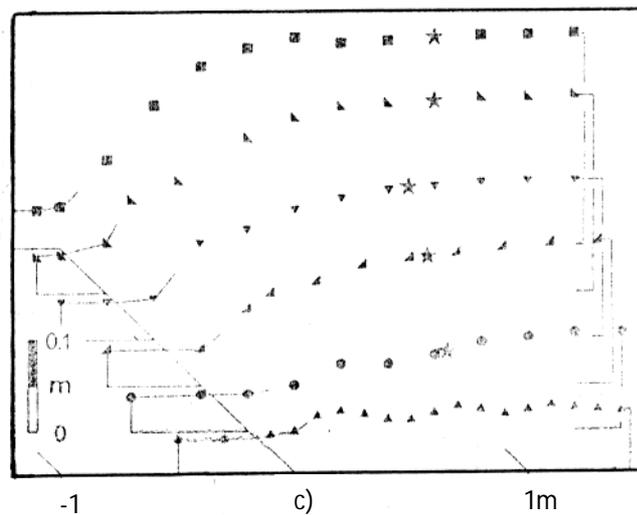


Figure 2.5 : Profils axiaux de surface. Q (l/s) : (\blacktriangle) = 7.9, (\bullet) 9.8, (\blacktriangleleft) 12.8, (\blacktriangledown) 14.8, (\blacktriangle) 17.8, (\blacksquare) 19.7. (*) Localisation de la fin du ressaut.

II.2.1.5. Description du ressaut

Selon Hager, le canal profilé en "U" présente un courant d'écoulement dominant tridimensionnel (figure 2.6). 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.

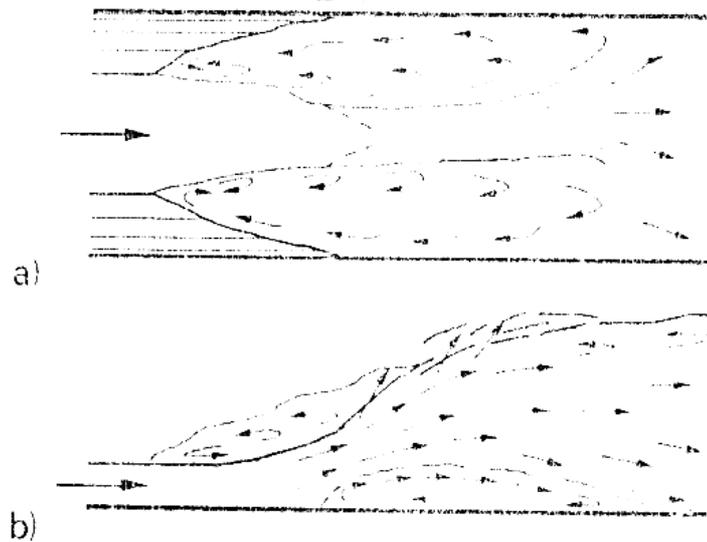


Figure 2.6 : Allure de l'écoulement pour de petit y_1 .
a) écoulement en surface b) écoulement à l'axe.

II.3. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLE EN CANAL PROFILE EN "U"

II.3.1. APPROCHE DE DEBABECHE ET ACHOUR (2000)

II.3.1.1. Hauteur relative du ressaut

L'étude bibliographique tient en compte l'effet 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 représente 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 indique nettement sept (07) nuages de points différents, correspondant chacun à une valeur bien fixée 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). Les 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.

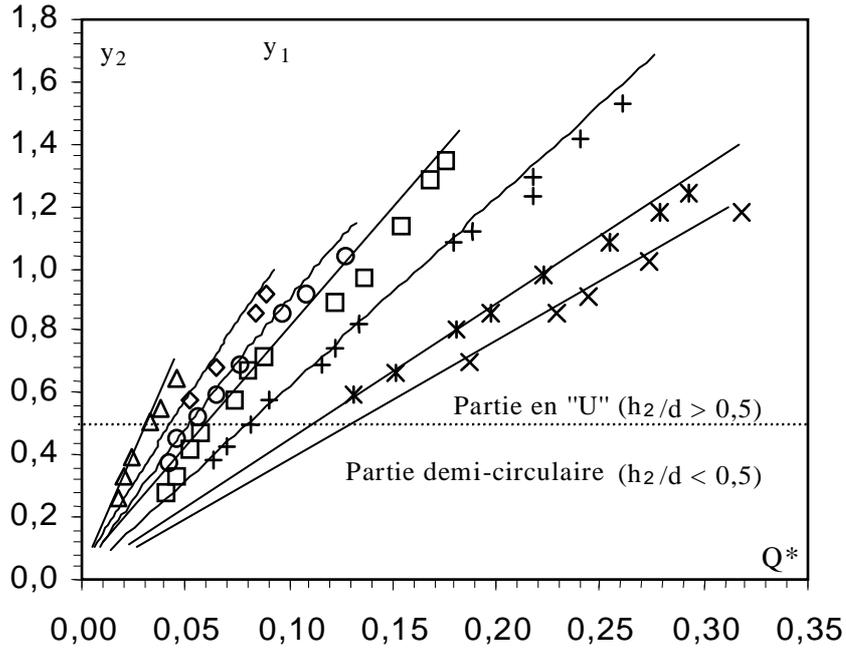


Figure 2.7 : Variation de la hauteur relative y_2 en fonction du débit relatif Q^* , pour différents valeurs de y_1 : (Δ) 0,0408 ; (\diamond) 0,0637 ; (\circ) 0,0816 ; (\square) 0,0947 ; (+) 0,1341 ; (*) 0,2041 ; (x) 0,2449. (—) Courbes théoriques selon Hager.

Une relation expliquant 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

$$y_2 - 0,5 = [0,27 \tanh (y_1) Q^*_1 - 1] [(Q^* / Q^*_1) - 1] \tag{2.6}$$

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

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

La Figure 2.8 montre la variation de la hauteur relative aval théorique y_2 , issue de l'équation 2.4, en fonction de y_2 approchée tirée de l'équation 2.6.

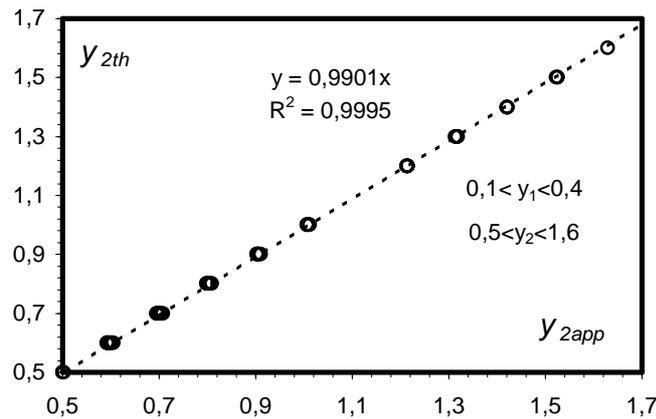


Figure 2.8 : Variation de y_{2th} en fonction de y_{2app} .
(o) points expérimentaux. (---) première bissectrice.

II.3.1.2. Longueur relative du ressaut

La longueur caractéristique L_j du ressaut n'a pu être mesurée 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 satisfaisant les conditions suivantes :

1. la surface libre est 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 de montrer 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 F_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 estimé la variation de cette même longueur relative L_j/h_2 en fonction de F_1 , en tenant préalablement compte de la hauteur relative amont y_1 .

La variation de L_j/h_2 en fonction de F_1 pour différentes valeurs de y_1 est représentée à la figure 2.9.

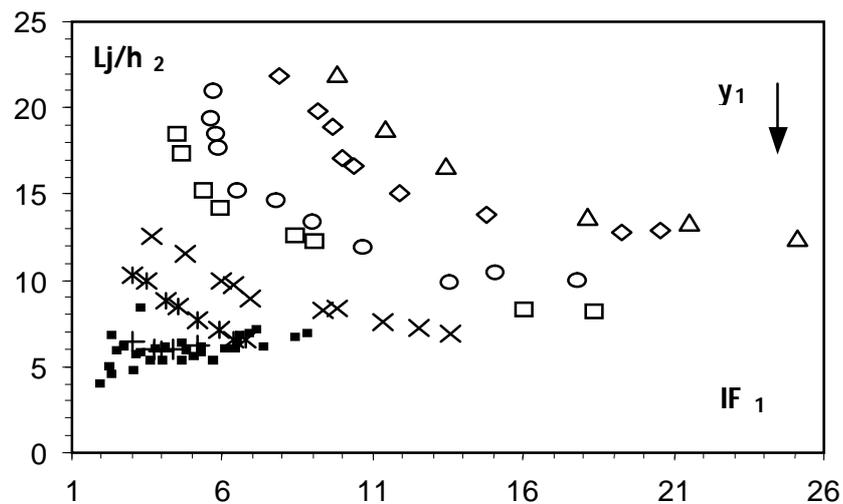


Figure 2.9 : Variation de la longueur relative L_j/h_2 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de la hauteur relative aval y_1 : (Δ) 0,0408 ; (\diamond) 0,0637 ; (\circ) 0,0816 ; (\square) 0,0947 ; (\times) 0,1341 ; ($*$) 0,2041 ; ($+$) 0,2449. (\blacksquare) Points expérimentaux de HAGER.

La figure 2.9 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 L_j/h_2 diminue.

Pour le ressaut évoluant dans la partie demi-circulaire du canal ($h_1/D \leq 0,5$), la longueur relative L_j/h_2 , pour une valeur constante de y_1 , diminue progressivement en fonction de F_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 L_j/h_2 du ressaut.

Le rapport $L_j/h_2 \cong 6$ 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 F_1 compris entre 1,93 et 8,85.

II.3.1.3. Hauteur relative du seuil

II.3.1.3.1. 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 2.10 montre que la relation qui existe entre ces deux rapports adimensionnels dépend de la hauteur relative amont y_1 .

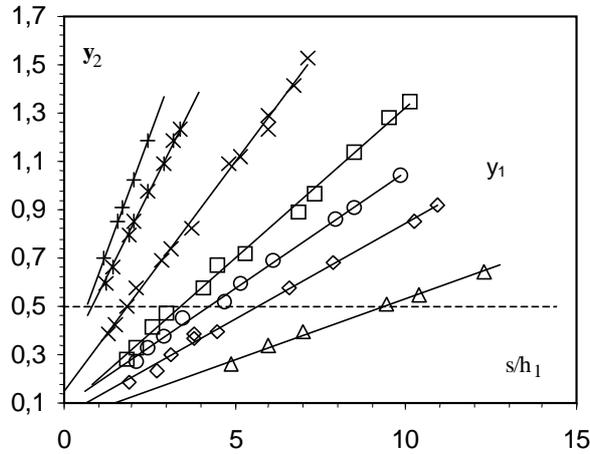


Figure 2.10 : Variation de la hauteur relative aval y_2 du ressaut en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil, pour sept valeurs de la hauteur relative amont y_1 : (Δ) 0,0408, (\diamond) 0,0637, (\circ) 0,0816, (\square) 0,0947, (\times) 0,1341, ($*$) 0,2041, ($+$) 0,2449. (---) ligne séparant la partie "U" ($y_2 > 1/2$) et la partie demi-circulaire ($y_2 < 1/2$).

En effet, sept (07) nuages de points différents 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 : $y_2 = y_1 (1,97 \cdot y_1^{0,17} S + 1)$ (2.7)

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

La figure 2.11 montre que la relation $y_2 = f(S, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et la droite d'ajustement représente bien la première bissectrice.

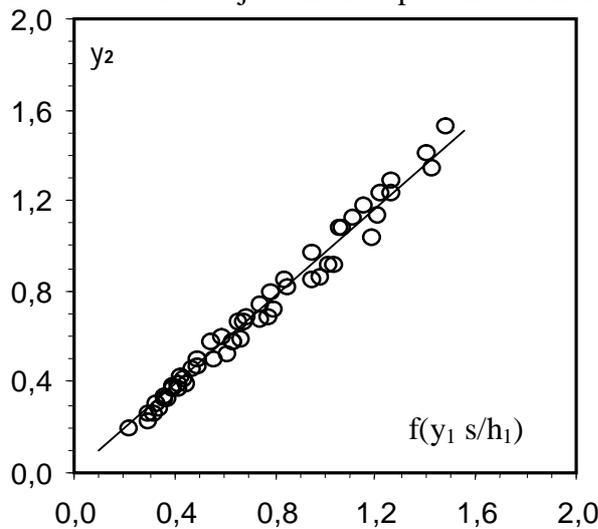


Figure 2.11 : Variation de la hauteur relative aval y_2 du ressaut en fonction de $f(y_1, s/h_1)$. (\circ) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice.

II.3.1.3.2. Variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude incident

Une relation unique entre la hauteur relative s/h_1 du seuil et le nombre de Froude F_1 a été également obtenue et se présente comme suit :

$$s/h_1 = 0,58.(F_1-1) \quad (2.8)$$

Cette relation indique que l'augmentation du nombre de Froude F_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 dans la figure 2.12.

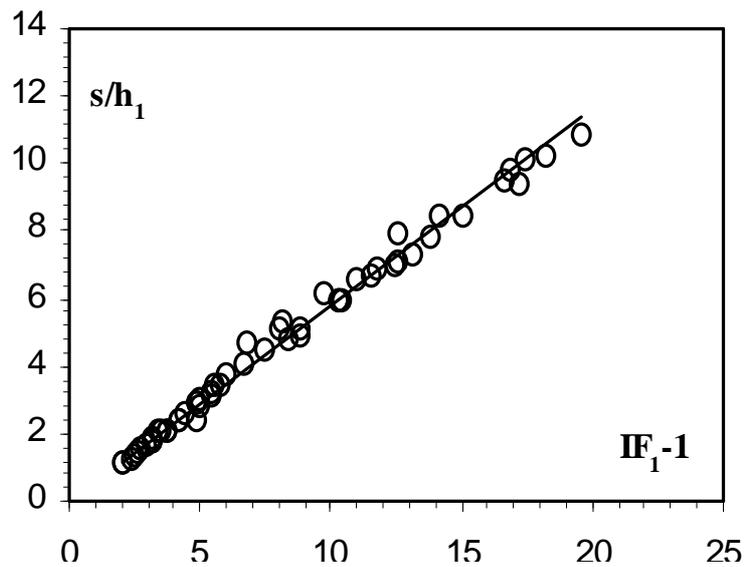


Figure 2.12 : Variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction de nombre de Froude ($F_1 - 1$). (o) points expérimentaux. (—) Droite d'ajustement.

II.3.1.4. Variation de la hauteur relative aval du ressaut en fonction de la position relative du seuil

Le ressaut étant complètement formé sur le radier du bassin d'amortissement qui correspond 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 2.13 représente la variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction de la position relative x/h_1 du seuil.

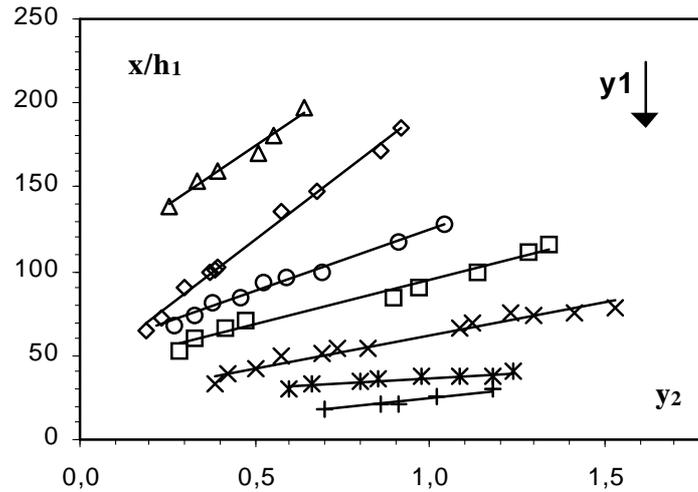


Figure 2.13 : Variation de la position relative x/h_1 du seuil, en fonction de la hauteur relative aval y_2 du ressaut contrôlé, pour différentes valeurs de la hauteur relative amont y_1 : (Δ) 0,0408, (\diamond) 0,0637, (O) 0,0816, (\square) 0,0947, (x) 0,1341, (*) 0,2041, (+) 0,2449. (—) Droites d’ajustement.

Pour chaque hauteur relative amont y_1 les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe unique d'équation :

$$x / h_1 = 5,65 \cdot \frac{y_2}{y_1} + \frac{2,27}{y_1^{1,21}} \tag{2.9}$$

II.3.1.5. Rendement du ressaut

L'avantage du ressaut hydraulique réside dans sa capacité de dissiper l'énergie cinétique qu'il permet de réaliser. L'équation généralisée de Bernoulli entre la section amont et aval du ressaut s'écrit :

$$H_1 = h_1 + Q^2 / (2 \cdot g \cdot A_1^2) = h_2 + Q^2 / (2 \cdot g \cdot A_2^2) + \Delta H \tag{2.10}$$

Le rendement η du ressaut hydraulique est défini par :

$$\eta = \Delta H / H_1, \Delta H = H_1 - H_2 \tag{2.11}$$

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

- l'aire 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 alors :

$$\eta = \frac{h_1 - h_2 + \frac{8.D.Q^{*2}}{\left[(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2 - (\theta_2 - \sin(\theta_2)\cos(\theta_2))^2 \right]}}{h_1 + \frac{8.D.Q^{*2}}{\left[(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2 \right]}} \quad (2.12)$$

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

$$\eta = \frac{h_1 - h_2 + \frac{.D.Q^{*2}}{2} \left[\frac{16}{(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2} - \frac{1}{(\pi/8 + y_2 - 1/2)^2} \right]}{h_1 + \frac{8.D.Q^{*2}}{\left[(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2 \right]}} \quad (2.13)$$

La figure 2.14 illustre la variation du rendement du ressaut en fonction du nombre de Froude incident :

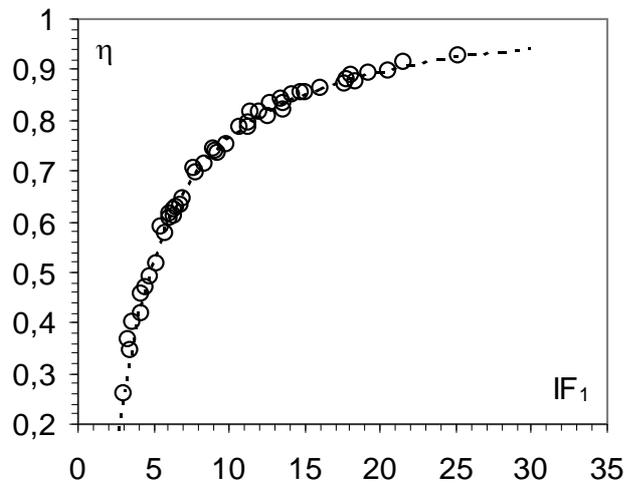


Figure 2.14 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 .

(o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement d'équation $\eta = 1,04 \cdot (1 - \sqrt{2}/F_1)^2$.

La figure 2.14 montre que les points expérimentaux s'ajustent parfaitement autour de la courbe théorique. Une relation unique de type puissance a été obtenue :

$$\eta = 1,04 \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right)^2 \quad (2.14)$$

La figure (2.15) montre la variation du rendement du ressaut en fonction du débit relatif.

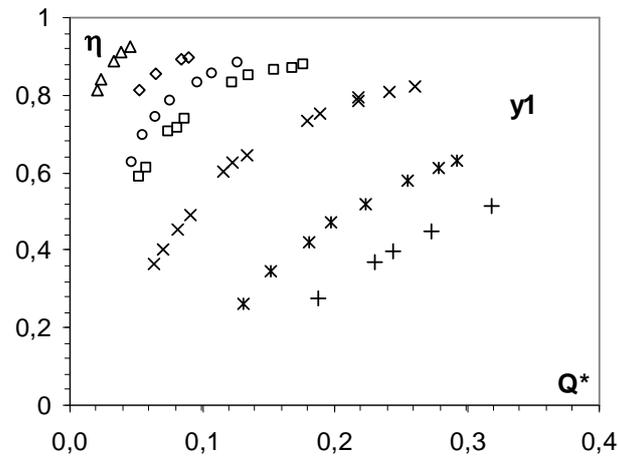


Figure 2.15 : Variation du rendement η en fonction du débit relatif Q^* , pour différentes valeurs de la hauteur relative amont y_1 : (Δ) 0,0408, (\diamond) 0,0637, (O) 0,0816, (\square) 0,0947, (x) 0,1341, (*) 0,2041, (+) 0,2449.

La figure 2.15 montre clairement que le rendement du ressaut dépend du débit relatif Q^* et de la hauteur relative amont y_1 . En outre, cette figure montre que le rendement est important pour les petits y_1 et faible pour les grands y_1 . Par ailleurs pour le même débit relatif Q^* , le ressaut dans un canal profilé en "U", dissipe mieux l'énergie pour les petites ouvertures que pour les grandes.

II.3.1.6. Profil de surface généralisé du ressaut

L'expérimentation a permis de définir le profil de la surface libre du ressaut à partir de son origine jusqu'à sa section finale dans un canal profilé en "U".

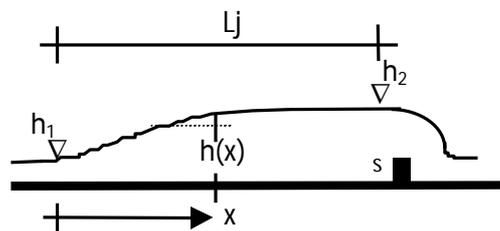


Figure 2.16 : Schéma de définition du Profil de surface du ressaut.

Comme le montre le schéma simplifié de la figure 2.16, 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 2.16. Cette figure montre à la fois les points de mesures expérimentales et la courbe tracée par application de la relation :

$$y = \sin(1,5.X) \quad (2.15)$$

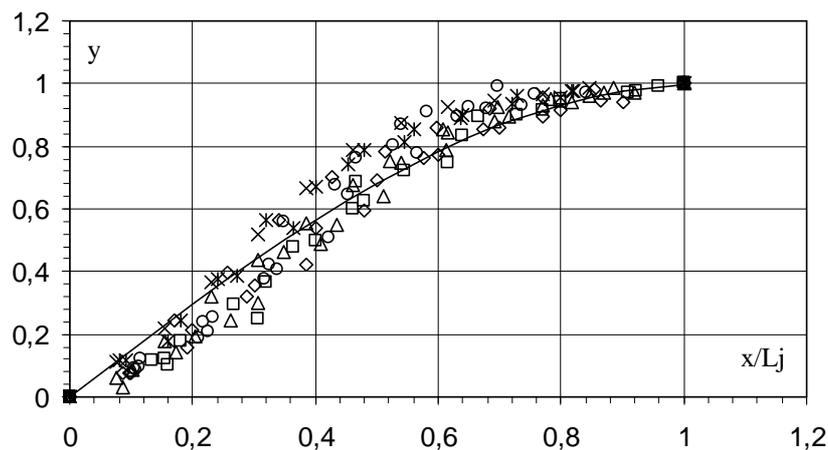


Figure 2.16 : Profil de surface généralisé du ressaut contrôlé dans un canal profilé en "U", pour différentes hauteurs initiales h_1 : (\diamond) 2, (Δ) 2.32, (\times) 3.3, (\circ) 5, (\square) 6. (—) courbe selon l'équation $y = \sin(1,5.X)$.

II.3.1.7. 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 .

III.1. INTRODUCTION

Ce chapitre traitera des travaux les plus importants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond rugueux. Les études les plus connues dans ce domaine sont certainement celles de Rajaratnam de 1968 et 2002 correspondant respectivement au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond rugueux et le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond ondulé.

III.2. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A FOND RUGUEUX

III.2.1. APPROCHE de RAJARATNAM (1968)

III.2.1.1. Description des essais

Les essais ont été réalisés dans un canal rectangulaire de largeur 0,311 m, de profondeur 0,61 m et de longueur 4,877 m avec des côtés lisses en plexiglas et un fond rugueux. Cinq valeurs de rugosité ont été testées : $\varepsilon(\text{mm}) = 0,975 ; 2,225 ; 2,256 ; 2,469$ et 9,144. ε a été définie comme la rugosité équivalente des particules étendues uniformément sur le lit.

En tout, 37 essais ont été réalisés. Le profil moyen de surface d'eau, la longueur du rouleau de surface L_r et la longueur du ressaut L_j ont été mesurés. Selon Rajaratnam (1968), les mesures de rouleau sont très fiables, tandis que les mesures de la longueur de ressaut ont donné quelques erreurs (de manipulations) dans la fixation de la fin du ressaut.

III.2.1.2. Analyse des résultats

III.2.1.2.1. Hauteur finale h_2

Pour un ressaut sur un fond rugueux de rugosité absolue ε , avec un écoulement torrentiel de hauteur initiale h_1 et de vitesse moyenne U_1 , la hauteur finale h_2 s'écrit comme suit :

$$h_2 = f_1(h_1, U_1, g, \rho, \nu, \varepsilon) \quad (3.1)$$

où ρ est la masse spécifique et ν est la viscosité cinématique du liquide. En utilisant le principe d'analyse adimensionnelle, nous pouvons montrer, que l'équation (3.1) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_2 \left[F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{g h_1}}, R = \frac{U_1 h_1}{\nu}, \frac{\varepsilon}{h_1} \right] \quad (3.2)$$

où R est le nombre de Reynolds. Quand la valeur de R est très grande, l'effet de la viscosité du liquide sur la diffusion turbulente est négligé et l'équation (3.2) se réduit sous la forme suivante :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_3 \left[F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{g h_1}}, \frac{\varepsilon}{h_1} \right] \quad (3.3)$$

La Figure (3.1) indique la variation de h_2/h_1 en fonction de F_1 pour différents valeurs de la rugosité relative ε/h_1 .

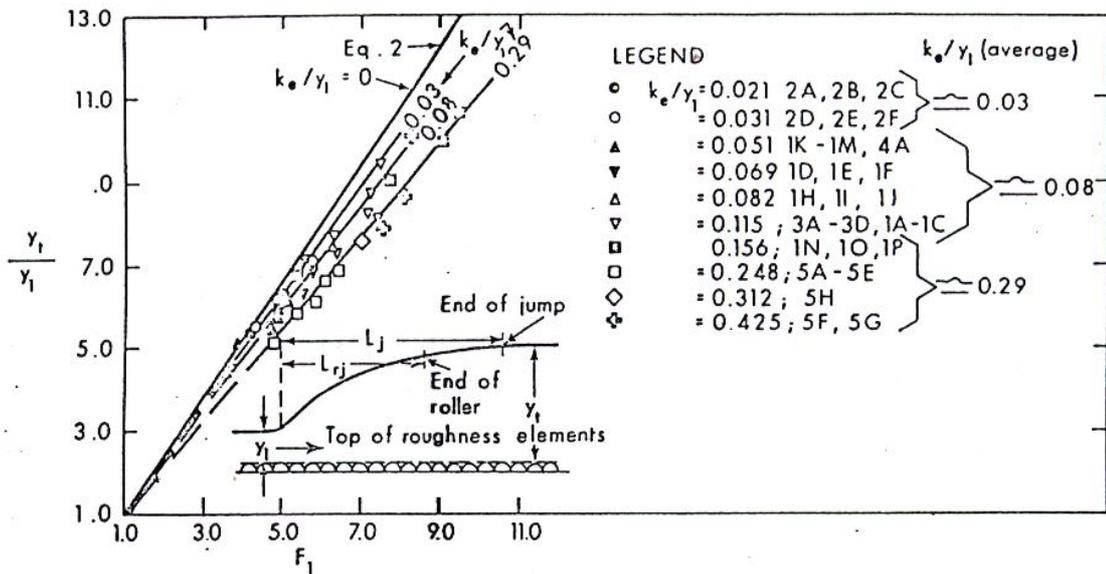


Figure 3.1 : Variation de h_2/h_1 en fonction de F_1 .

La courbe de l'équation (3.3) représentée dans la Figure (3.1), peut être considérée comme limite de la rugosité relative égale à zéro. Trois droites sont dessinées pour $\varepsilon/h_1 = 0,03 ; 0,08$ et $0,29$; Il se déduit les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
h_2/h_1 &= 1,30 F_1 - 0,3 \quad \text{pour} \quad \varepsilon/h_1 = 0,03 \\
h_2/h_1 &= 1,22 F_1 - 0,24 \quad \text{pour} \quad \varepsilon/h_1 = 0,08 \\
h_2/h_1 &= 1,10 F_1 - 0,10 \quad \text{pour} \quad \varepsilon/h_1 = 0,29
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Selon Rajaratnam (1968), il serait plus pratique de reformuler l'équation de Belanger sous la forme approximative suivante :

$$h_2/h_1 = 1,41 F_1 - 0,5 \tag{3.5}$$

Lorsqu'on élimine les constantes du coté droit des équations (3.4) et (3.5), l'erreur n'étant pas significative pour les grandes valeurs de F_1 , on pourrait écrire ainsi :

$$\frac{h_2}{h_2^*} = \lambda \left[\frac{\varepsilon}{h_1} \right] \tag{3.6}$$

où λ est fonction seulement de la rugosité relative. Pour les trois valeurs de ε/h_1 dans l'équation 3.4, λ devient égal respectivement à 0,92 ; 0,864 et 0,78. Les résultats expérimentaux sont retracés dans la Figure (3.2) avec h_2/h_1 en fonction de ε/h_1 et une courbe moyenne pourrait en effet être tracée comme résultat préliminaire. Les trois valeurs moyennes mentionnées précédemment sont montrées aussi sur la Figure (3.2).

On observe que l'augmentation de la rugosité relative, h_2/h_2^* diminue de l'unité à $\varepsilon/h_1 = 0$ jusqu'à environ 0,783 à $\varepsilon/h_1 = 0,5$. Ainsi la réduction de la hauteur finale h_2 est tout à fait appréciable comparée à la hauteur finale classique, quand la rugosité est grande.

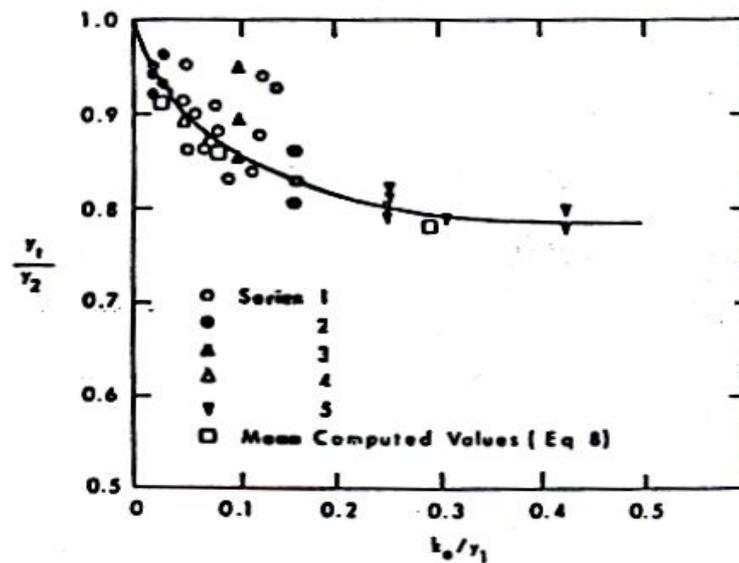


Figure 3.2 : Variation de h_2/h_2^* en fonction de ε/h_1

III.2.1.2.2. Longueur caractéristique

Les résultats expérimentaux de la longueur relative du rouleau de surface (par rapport à la hauteur conjuguée aval h_2 du ressaut classique) sont indiqués dans la Figure (3.3, a) avec la courbe du ressaut classique. Une observation immédiate consiste à ce que pour ε/h_1 plus grand que 0,05 environ, la longueur du rouleau du surface à fond rugueux est réduite de moitié environ comparée à son homologue lisse. Des conclusions semblables pourraient être déduites quand à la longueur du ressaut représentée à la Figure (3.3.b). Selon Rajaratnam (1968), les ressauts obtenus sont en accord au moins qualitativement avec les observations antérieures de Vyzgo et Kuzminov.

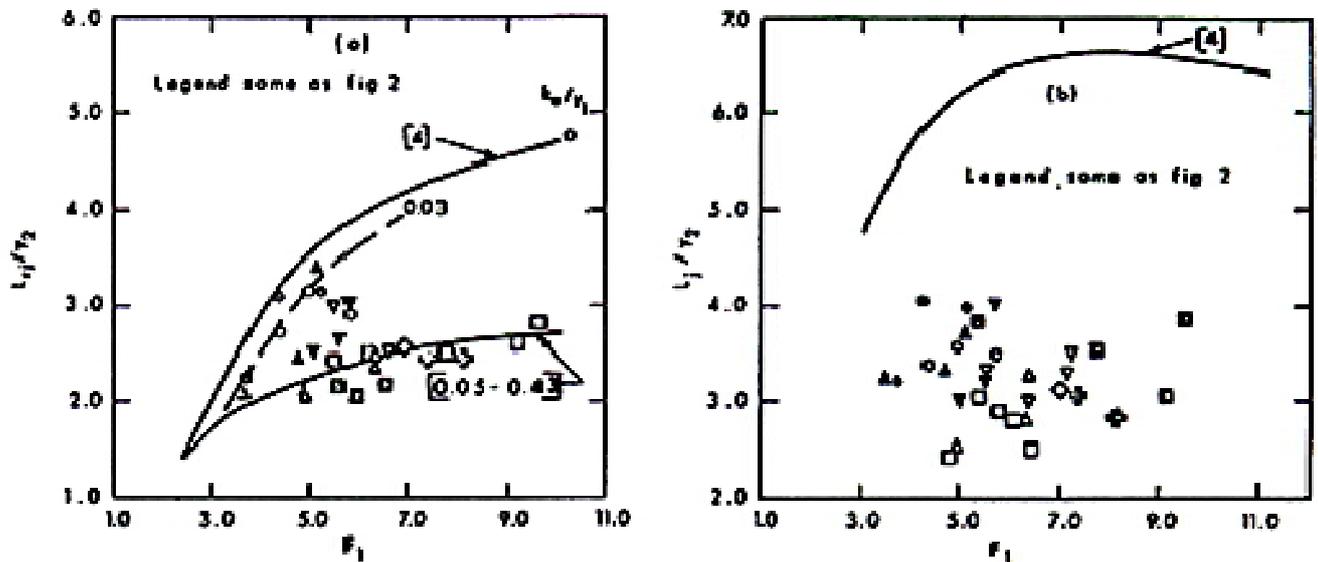


Figure 3.3 : Variation de la longueur relative : (a) L_r/h^*_2 en fonction de F_1 ; (b) L_r/h^*_2 en fonction de F_1 .

III.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

A FOND ONDULE

III.3.1. Approche de RAJARATNAM (2002)

III.3.1.1. Description des essais

Le ressaut hydraulique est produit dans un canal de 0.446 m de largeur, 0.60 cm de profondeur et de longueur égale 7.6 m avec des parois en plexiglas. L'ondulation du fond du canal est réalisée par du métal en aluminium (Figure 3.4). Le lit ondulé crée des remous turbulents. La distance "s" entre les deux ondulations métalliques sinusoïdales est égale à 68 mm, et l'épaisseur "t" est de 13 à 22 mm. Trois pompes alimentent le réservoir lié au canal, et les débits sont mesurés par un débitmètre magnétique. L'eau entre dans le canal où un écoulement torrentiel uniforme est produit avec une profondeur h_1 . Un obstacle est utilisé pour contrôler la profondeur amont de l'écoulement dans le canal.

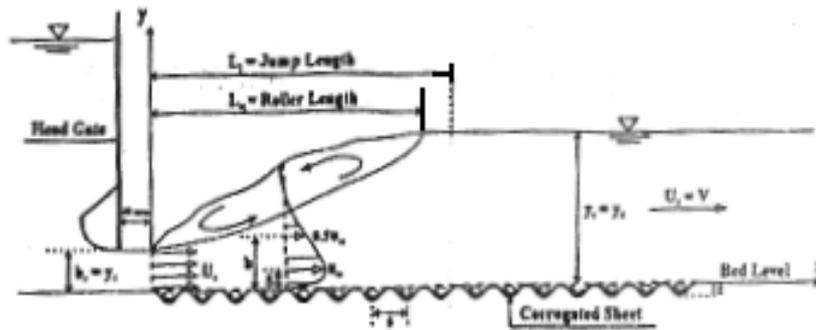


Figure 3.4 : Schéma de définition du ressaut hydraulique à fond ondulé

Le tube de Prandtl de diamètre extérieur 3.0 mm, est connecté au manomètre vertical, pour la mesure du temps moyen des vitesses longitudinales U . Les profils de vitesse sont mesurés dans plusieurs sections verticales à l'intérieur du ressaut, souvent à l'axe du canal au-dessus des crêtes de l'ondulation. Le nombre de Reynolds $R_e = \frac{U_1 \times h_1}{\nu}$ est en suite entre 50800 et 206756.

Trois valeurs de la rugosité relative, définie comme le rapport entre l'épaisseur de l'ondulation " t " et de la profondeur h_1 de l'amont du ressaut de valeurs 0,50 ; 0,43 et 0,25 sont testées.

La profondeur relative $y_{2*} = \frac{h_{2*}}{h_1}$ est donnée par l'équation de Belanger pour le canal rectangulaire à fond lisse :

$$\frac{h_{2*}}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (3.7)$$

III.3.1.2. Résultats expérimentaux

La Figure 3.5 (a) montre les profils de surface du ressaut à fond ondulé pour onze expériences effectuées, avec une précision des mesures de 0,01 mm.

Ces profils de surfaces permettent la détermination de la profondeur h_2 à l'aval du surface du ressaut hydraulique et qui sont indiqués dans la Figure 3.5 (b) où le rapport $\frac{[h(x) - h_1]}{(h_2 - h_1)}$ est fonction de $\frac{x}{L_j}$, telle que : $h(x)$ est la profondeur de l'écoulement dans une section quelconque x .

La Figure 3.5 (b) montre aussi les profils de surface du ressaut qui sont approximativement semblables et peuvent être représentés par une courbe moyenne.

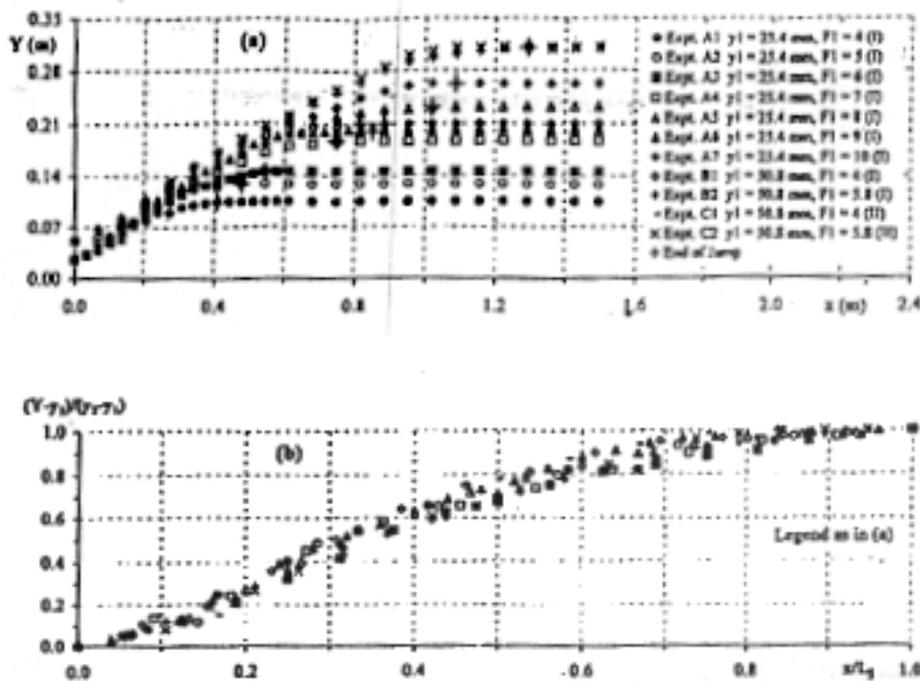


Figure 3.5 : (a) Profils de surface du ressaut ; (b) Profil généralisé de surface du ressaut

Pour un ressaut à fond ondulé, de rugosité d'épaisseur " t ", avec un écoulement torrentiel de profondeur amont h_1 , de vitesse moyenne U_1 , la profondeur aval h_2 peut être écrite comme suit :

$$h_2 = f_2 (h_1, U_1, g, \rho, \nu, t) \quad (3.8)$$

Où : ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) : masse volumique du liquide et ν ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) : viscosité cinématique.

La relation (3.8) peut être également reformulée comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_2 \left(F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, \text{Re} = \frac{U_1 h_1}{\nu}, \frac{t}{h_1} \right) \quad (3.9)$$

Pour de grandes valeurs du nombre de Reynolds, la viscosité cinématique peut être négligée.

(Voir Rajaratnam 1976 ; Hager et Bremen 1989), l'équation (3.9) peut s'écrire comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_2 \left(F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, \frac{t}{h_1} \right) \quad (3.10)$$

Les résultats expérimentaux sont alors illustrés par la Figure 3.6, représentant la variation de $\frac{h_2}{h_1}$ en fonction de F_1 , en tenant compte de la rugosité relative $\frac{t}{h_1}$. L'équation (3.7) est également montrée dans la même figure. La Figure 3.6 montre aussi que la rugosité relative $\frac{t}{h_1}$ n'a pas un effet significatif sur le rapport $\frac{h_2}{h_1}$.

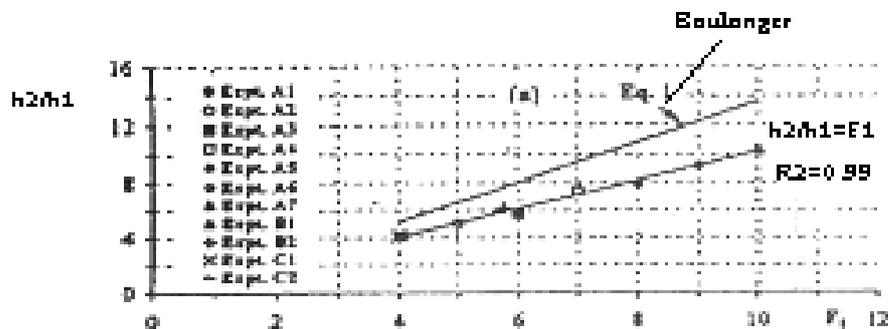


Figure 3.6 : Variation de $\frac{h_2}{h_1}$ en fonction du nombre de Froude F_1 .

Il a été trouvé aussi que le rapport des hauteurs conjuguées $\frac{h_2}{h_1}$ est approximativement égal au nombre de Froude incident F_1 . Selon Hence l'équation 3.10 peut être réécrite comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} \cong F_1 \quad (R^2 = 0,99) \quad (3.11)$$

Par contre, pour les expériences effectuées par Rajaratnam (1968), pour le cas du canal rectangulaire à fond rugueux, la rugosité relative s'avère un paramètre important.

Par ailleurs, pour des valeurs relativement grandes du nombre de Froude incident, le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique peut être écrit comme suit :

$$\frac{h_2^*}{h_1} = \sqrt{2}F_1 - 1 \cong \sqrt{2}F_1 \quad (3.12)$$

Les résultats expérimentaux pour la longueur de rouleau de surface L_r et la profondeur aval h_2^* du ressaut hydraulique classique sont montrés dans la Figure 3.7 (a) où il a été montré que le rapport L_r/h_2^* est approximativement égal à 2,6.

La Figure 3.7 (b) illustre la variation de la longueur relative L_j/h_2^* du ressaut hydraulique avec le nombre de Froude incident F_1 où on voit que L_j/h_2^* est presque égal 3,0.

Il est intéressant d'observer que la longueur du ressaut avec un lit ondulé est approximativement la moitié que son homologue du ressaut classique.

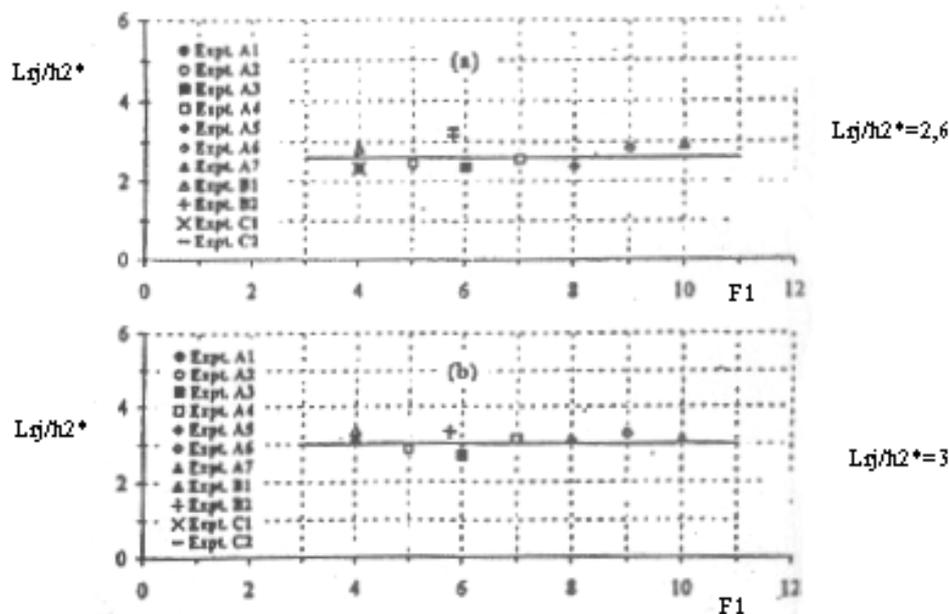


Figure 3.7 : Variation de la longueur relative en fonction du nombre de Froude F_1 .
(a) du rouleau de surface ; (b) du ressaut.

III.4. CONCLUSION

En se basant sur les résultats expérimentaux obtenus par Rajaratnam (1968) pour les ressauts formés dans un canal rectangulaire horizontal avec un lit rugueux, dans lequel la rugosité relative ε/h_1 a été variée de 0,02 à 0,43 et le nombre de Froude incident de 3 à 10, quelques conclusions sont alors déduites. En effet, pour un ressaut formé sur un lit rugueux, le rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 est fonction du nombre de Froude incident F_1 et de la rugosité relative ε/h_1 . En considérant h_2^* comme la hauteur conjuguée aval du ressaut correspondant au ressaut sur un fond lisse alors h_2/h_2^* a été trouvé comme étant fonction seulement de la rugosité relative. Il a été trouvé également que la longueur du ressaut rugueux est environ la moitié relativement au fond lisse, pour des rugosités relatives supérieures à 0.10, cela semble un avantage significatif du ressaut à fond rugueux.

Par ailleurs, des expérimentations ont été faites par Rajaratnam (2002) au niveau du laboratoire sur le ressaut hydraulique à fond ondulé pour une gamme de nombre de Froude variant entre 4 et 10 et trois valeurs de la rugosité relative t/h_1 : 0,25 au 0,50. Il a été montré que le rapport h_2/h_1 des profondeurs du ressaut à fond ondulé pour une gamme de nombre de Froude, est plus petit que son homologue à fond lisse. Ceci montre que le fond ondulé paraît une idée attirante qui pourrait être très utile aux recherches de future. La raison de la réduction de la profondeur du ressaut est due à l'interaction de l'écoulement torrentiel avec le lit ondulé.

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.

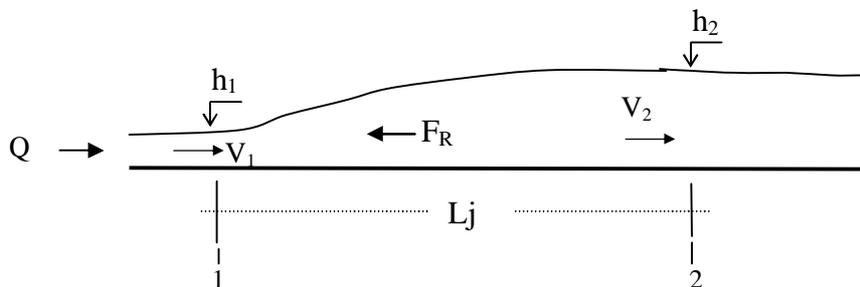


Figure 4.1 : Ressaut contrôlé par un seuil dans un canal triangulaire à parois rugueux .Schéma de définition.

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 $8,73$.

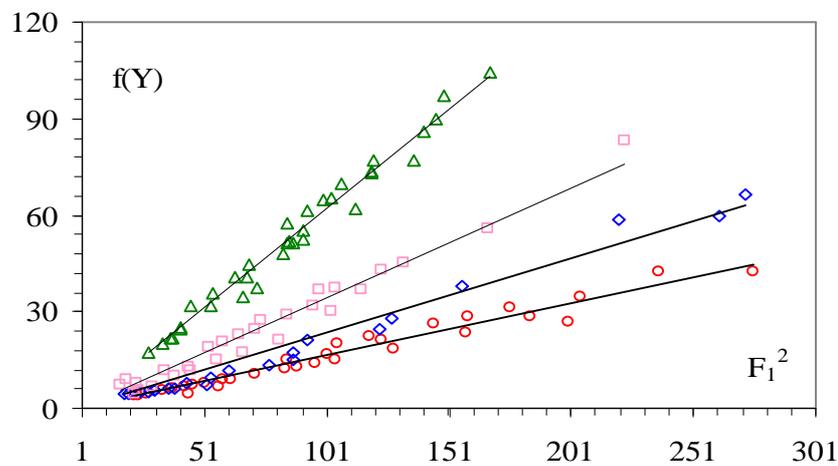


Figure 4.2 : Variation de $f(Y)$ en fonction de F_1^2 , pour quatre rugosités absolues : $\varepsilon(\text{mm}) = (\Delta) 4,53 ; (\diamond) 6,04 ; (\square) 7,11$ et $(\circ) 8,73$. (—) Courbe d'ajustement.

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.

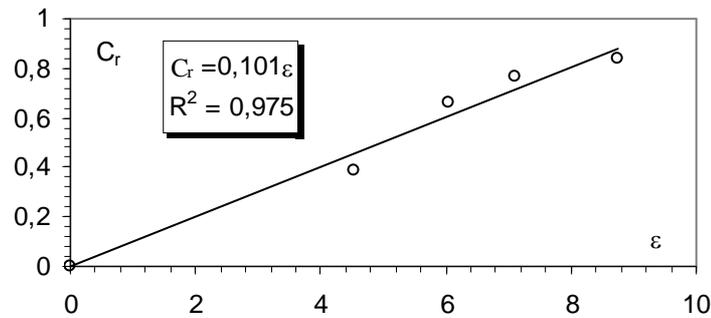


Figure 4.3 : Variation du coefficient C_r en fonction de la rugosité absolue ε

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).

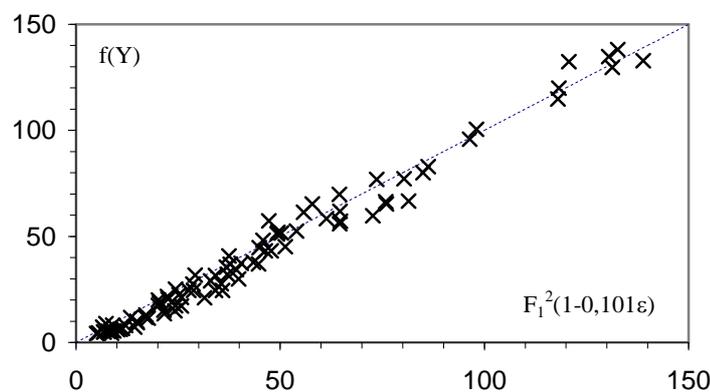


Figure 4.4 : Variation de $f(Y)$ en fonction de la relation $F_1^2(1-0,101\varepsilon)$

(×) 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 :

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

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

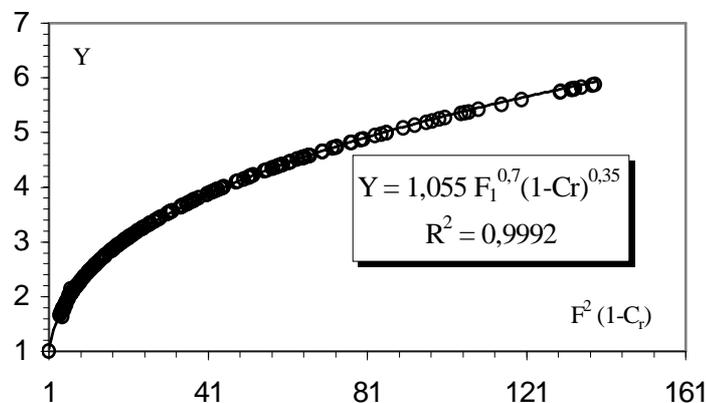


Figure 4. 5 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de F²(1-C_r).
 (o) points de mesures expérimentales. (—) Courbe d'ajustement.

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.

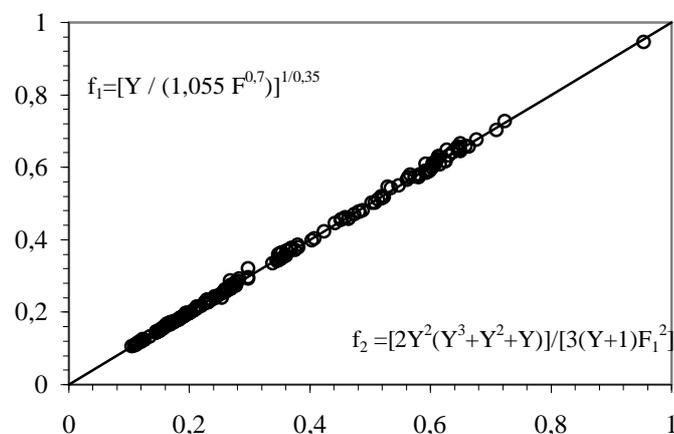


Figure 4. 6 : Comparaison (1-C_r) issue de la relation approchée f₁ avec celui de la relation semi théorique f₂.
 (o) points de mesures expérimentales. (—) Première bissectrice.

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).

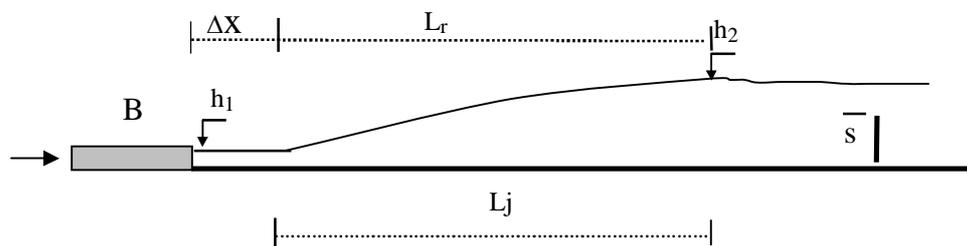


Figure 4.7 : Ressaut contrôlé par seuil mince, h_1 hauteur d'eau amont ; h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, L_r longueur du rouleau de surface, L_j la longueur du ressaut, ΔX distance séparant la boîte en charge B et le pied du ressaut, B boîte en charge.

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.

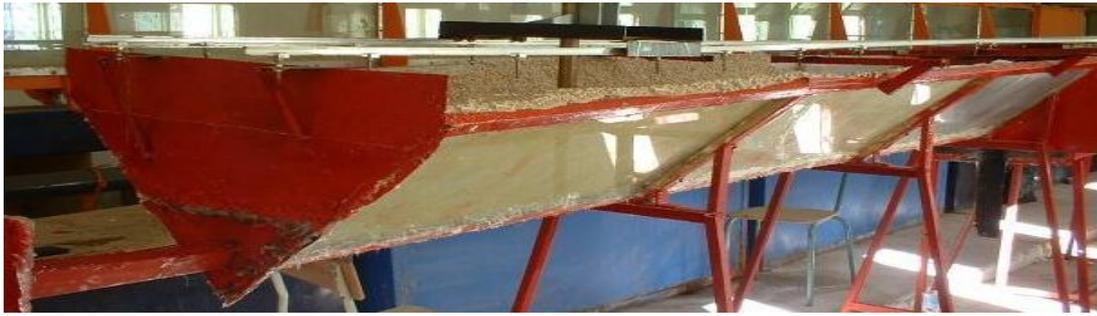


Photo 4.1 : Photographie du canal de section droite triangulaire ayant servi à l'expérimentation.



(b)



(a)

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

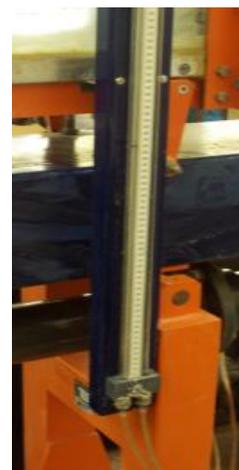


Photo 4.3 : Photographie de débitmètre à diaphragme **Photo 4.4** : Photographie de manomètre différentiel.

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 $\varepsilon = 4,53 \text{ mm}$; $\varepsilon = 6,04$; $\varepsilon = 7,11 \text{ mm}$ et $\varepsilon = 8,73 \text{ mm}$, 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).

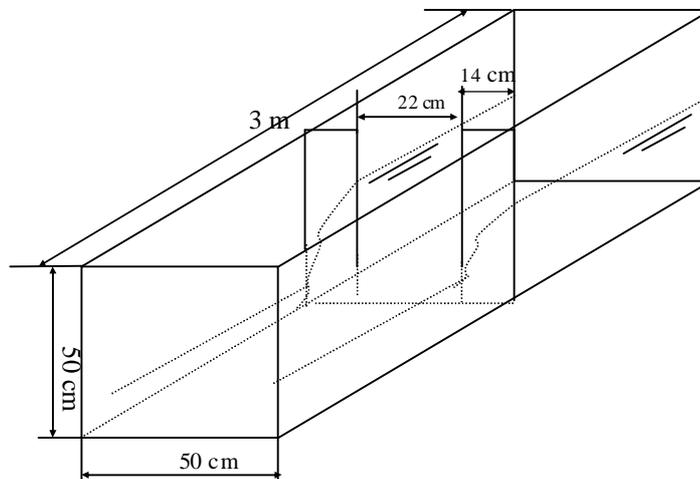


Figure 4.8 : Schéma de définition de la deuxième partie du canal avec déversoir.

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 (m^3/s);

B : la largeur du canal en (m) ;

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

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

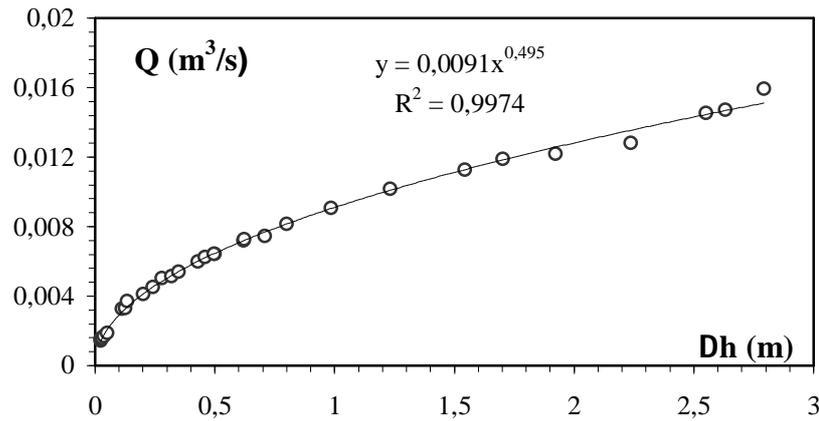


Figure 4.9 : Courbe expérimentale de la relation $Q = f(\Delta h)$.

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).

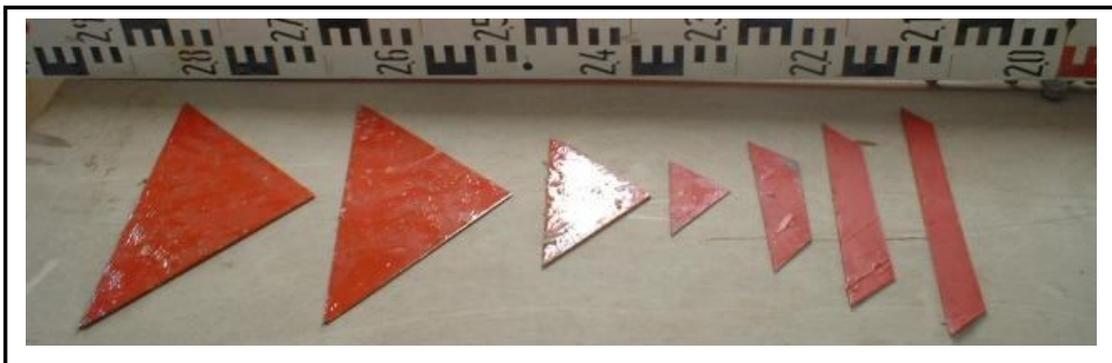


Photo 4.8 : Série de seuils.

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.

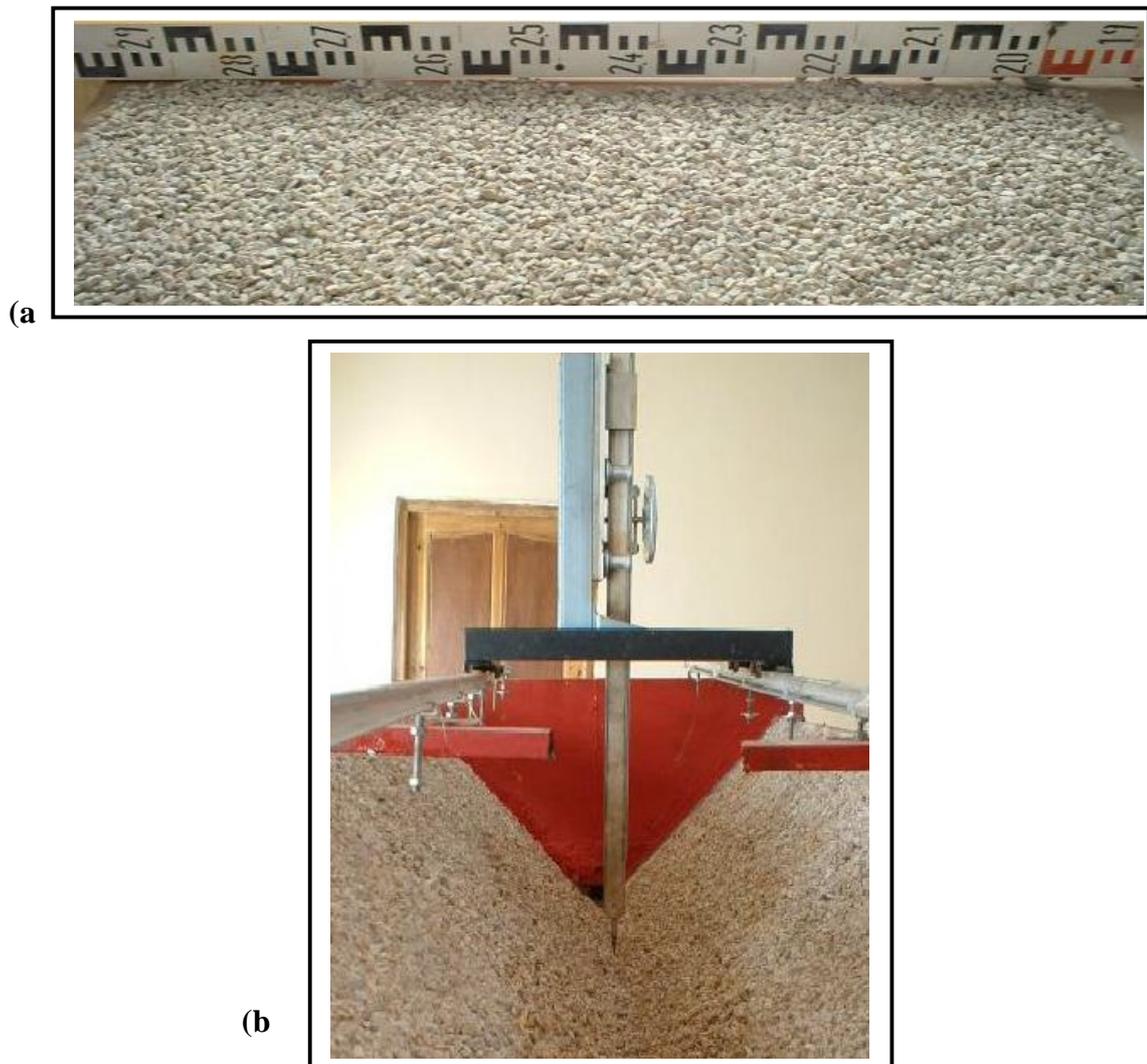


Photo 4.9 : a) Echantillon de grains de gravier de rugosité équivalente $\varepsilon=8,73$ mm.
 b) Grain de gravier répartis uniformément sur les parois du canal triangulaire.

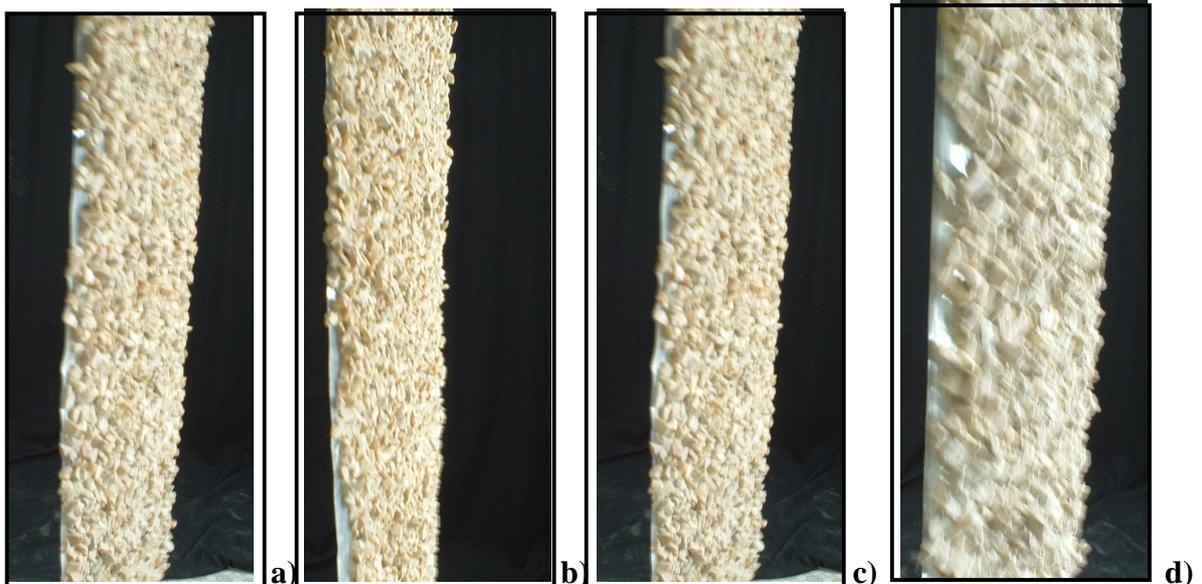


Photo 4.10 : Echantillons de grains de gravier de rugosités :
 a) $\varepsilon=4,53$ mm, b) $\varepsilon=6,04$ mm, c) $\varepsilon=7,11$ mm, d) $\varepsilon=8,73$ mm.

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

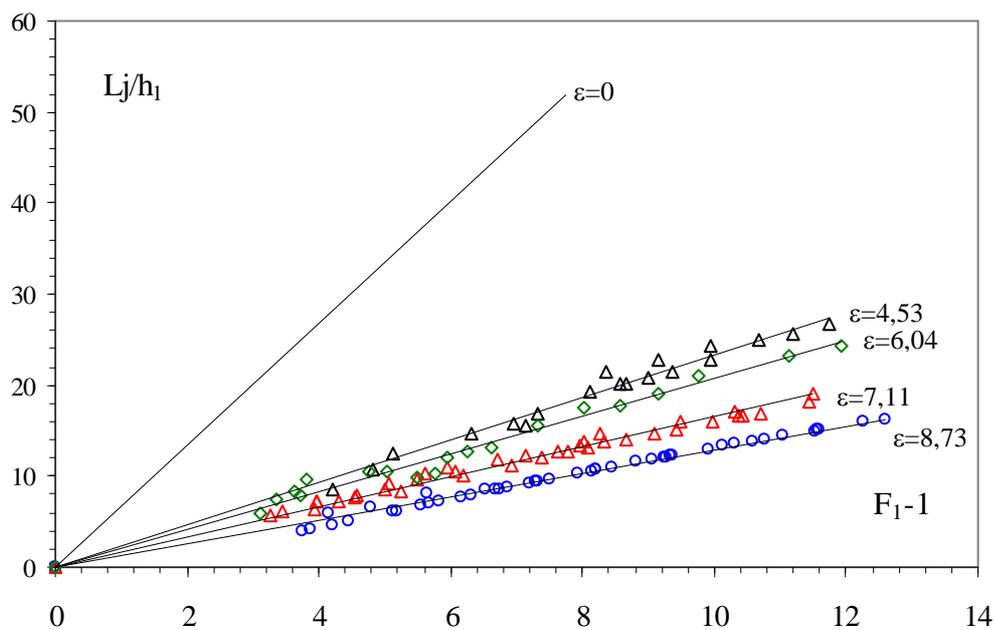


Figure 4.10 : Ressaut contrôlé dans un canal triangulaire à parois rugueuses. Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de nombre Froude, pour quatre valeurs différentes de " ε ": (Δ) 4,53mm (\square) 6,04mm (Δ) 7,11mm et (\circ) 8,73mm. (—) Courbes d'ajustements.

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.

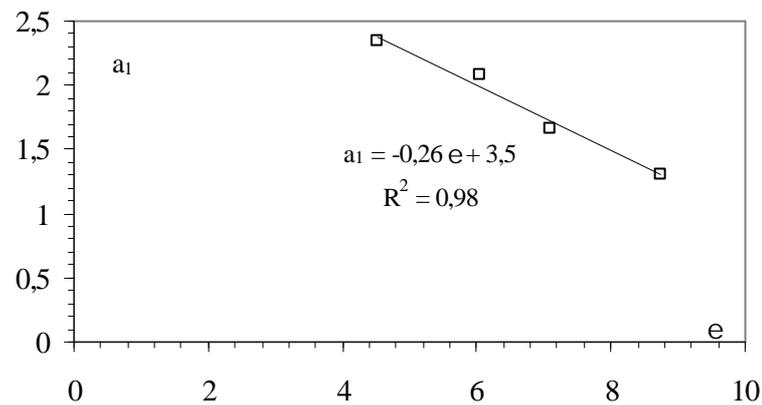


Figure 4.11 : Variation du coefficient "a₁" en fonction de la rugosité ε .

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).

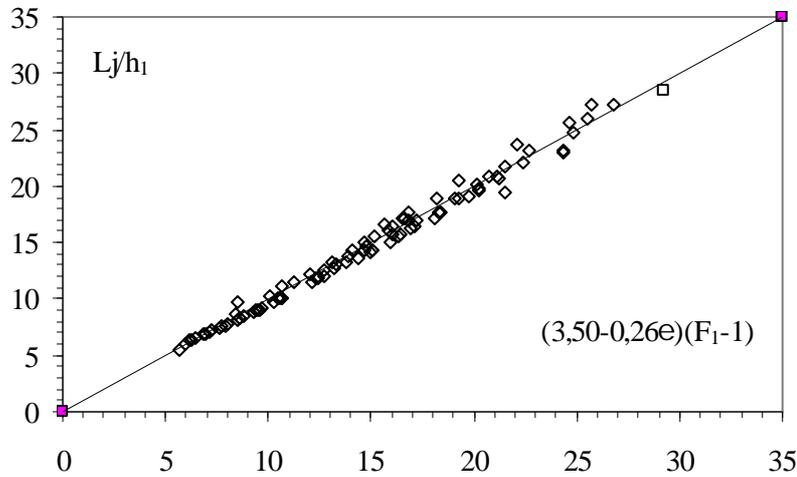


Figure 4.12 : Variation de la longueur relative Lj/h_1 en fonction de $f(\varepsilon, F_1)$.
 (○) Les points expérimentaux du ressaut contrôlé à parois rugueuses.
 (—) Première bissectrice.

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.

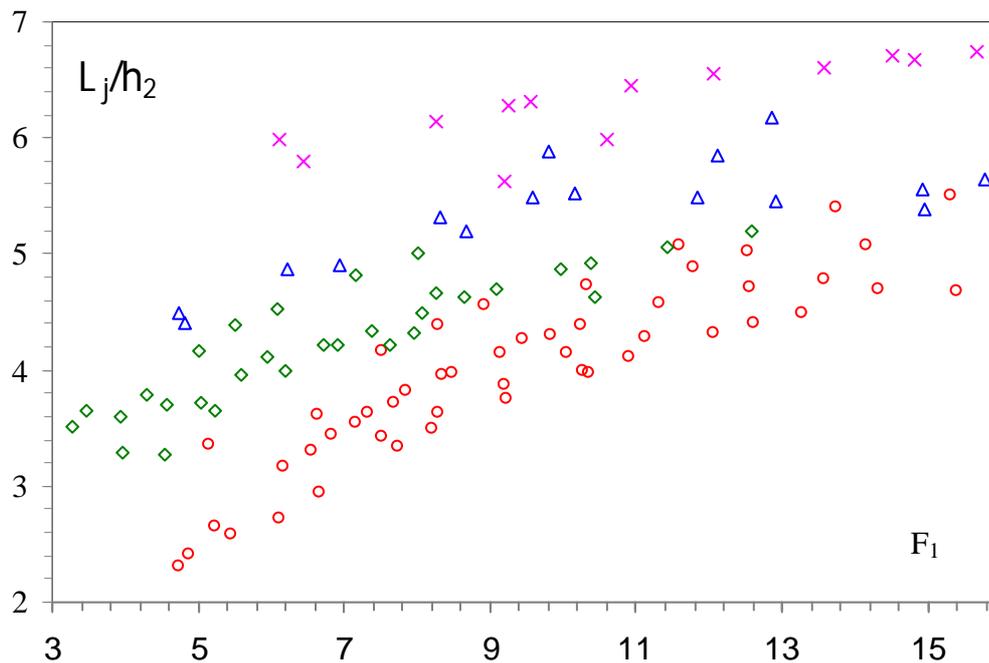


Figure 4.13 : Variation de la longueur relative L_j/h_2 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 Pour différentes valeur de rugosités " ε ": (○) 8,73mm ; (□) 7,11 mm ; (△) 6,04mm et (×) 4,53mm.

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.

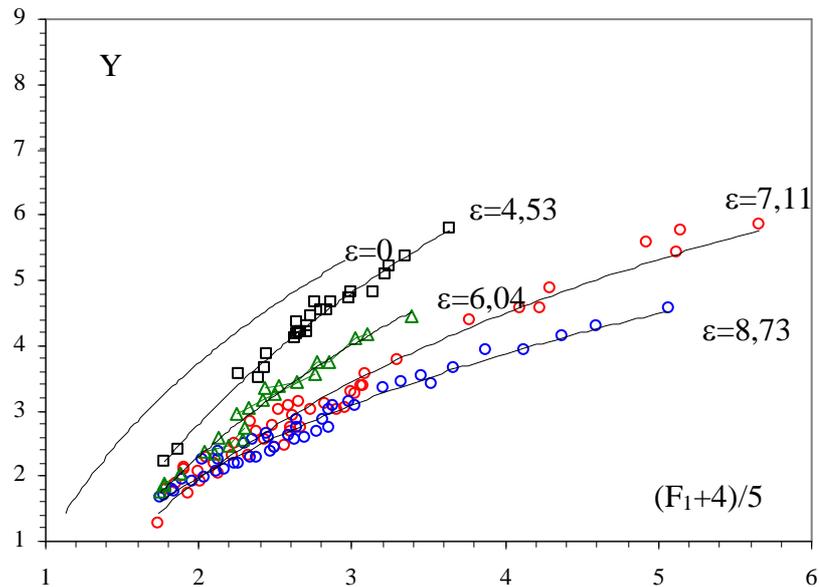


Figure 4.14 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude, Pour quatre valeurs différentes de " ε ": (\square) 4,53mm (Δ) 6,04mm (\circ) 7,11mm et (\circ) 8,73mm. (—) Courbes d'ajustements. (....) Courbe selon Debabeche (2003)

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

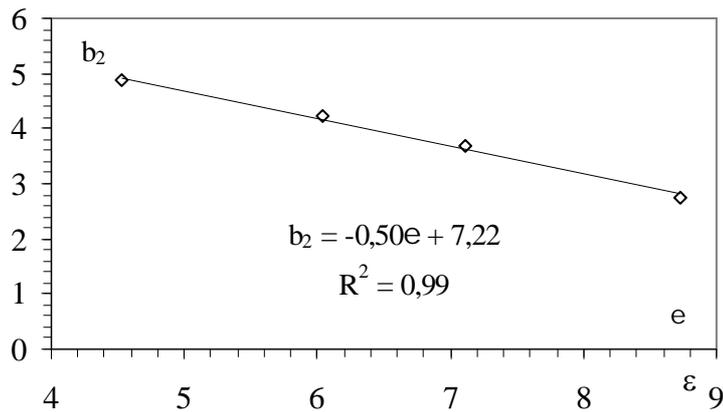


Figure 4.15: Variation du coefficient "b₂" en fonction de la rugosité absolue "ε".

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 :

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

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

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.

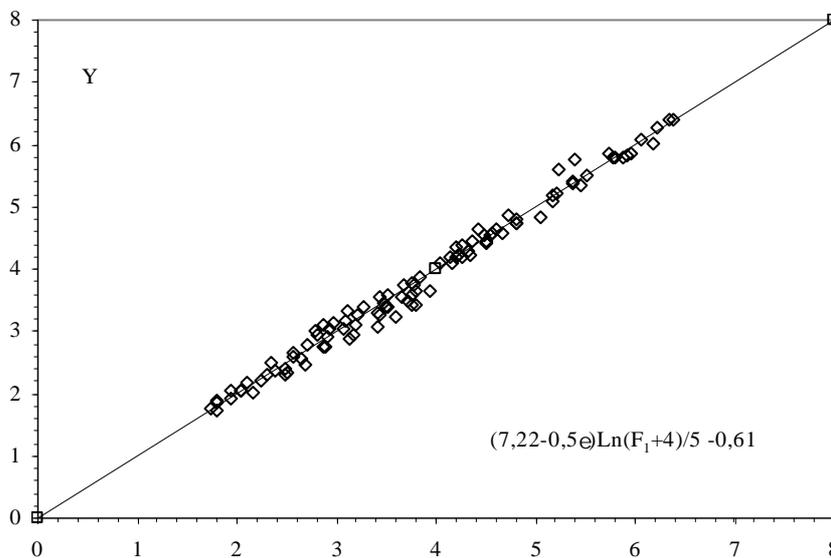


Figure 4.16 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de $f(\varepsilon, F_1)$.

(□) 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

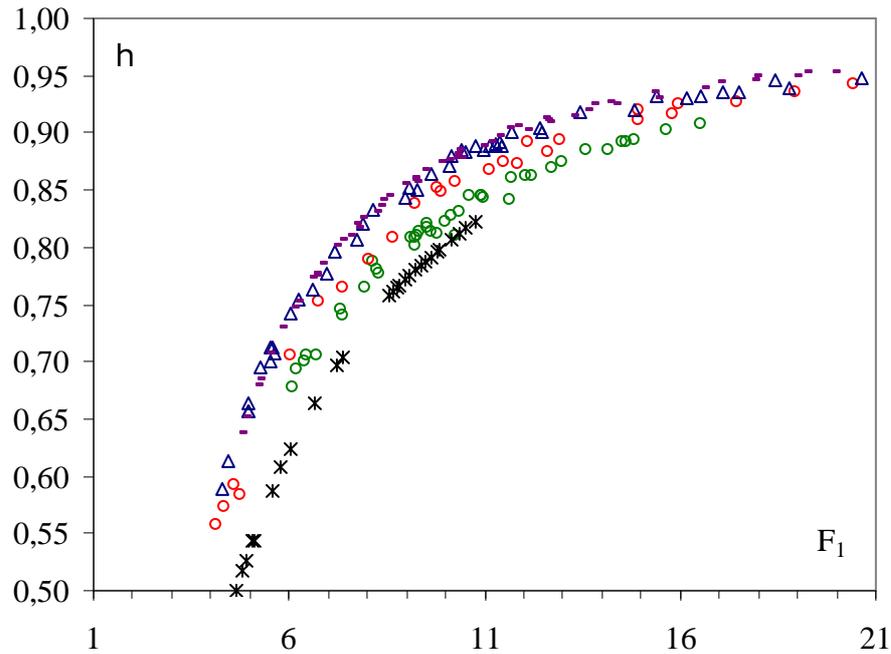


Figure 4.17 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour cinq valeurs différentes de ε (*) 0,00mm (o) 4,53mm (o) 6,04mm (Δ) 7,11mm et (-) 8,73mm.

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 croît 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.

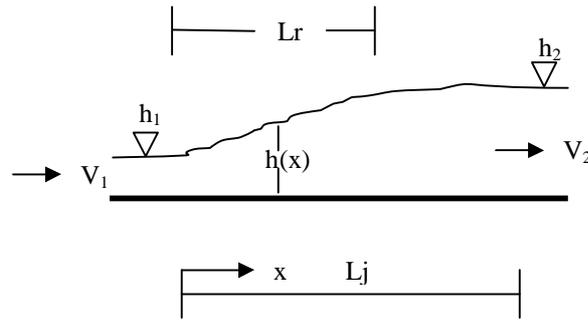


Figure (4.18) : Profil de surface du ressaut.

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.

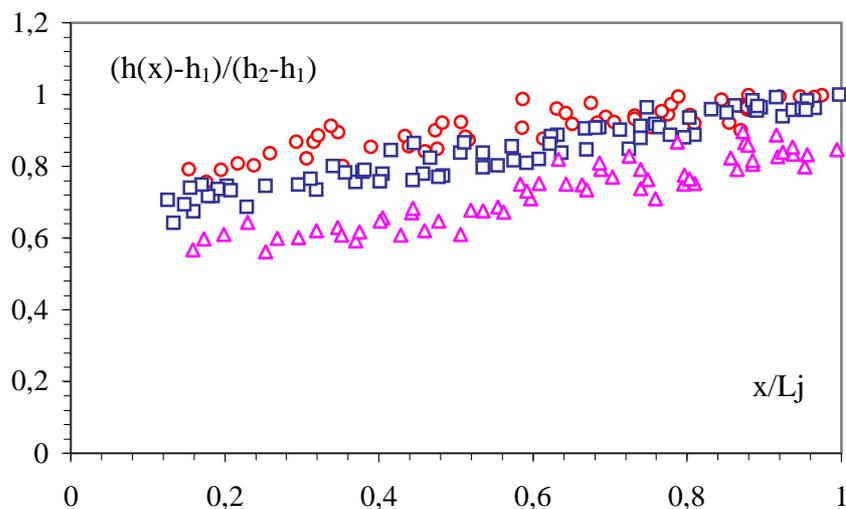


Figure 4.19: Profil de surface généralisé du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses pour trois rugosités distinctes
(\circ) 6,04mm (\square) 7,11mm et (\triangle) 8,73mm.

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 :

$$F_1 = \frac{2 \cdot Q}{\sqrt{g \cdot m \cdot h_1^3}}, \text{ soit } F_1 \cong 8,9$$

- 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 : $Y = (7,22 - 0,50 \varepsilon) \ln[(F_1 + 4)/5] - 0,61$

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

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

V.1. INTRODUCTION

L'étude bibliographique montre que les caractéristiques adimensionnelles intervenant au phénomène du ressaut sont : le nombre de Froude F_1 ou le débit relatif q , la hauteur relative amont $y_1=h_1/D$ (h_1 est la hauteur au pied du ressaut, D est la largeur 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.

Comme il a été signalé dans la partie bibliographique, à l'exception des travaux de Hager (1987, 1989) et ceux plus récemment Achour et Debabeche (2000), très peu d'étude ont été entreprises dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en "U". Quand au ressaut en canal à fond rugueux, à notre connaissance l'étude la plus connue est celle de Rajaratnam (1968), qui a expérimenté le ressaut hydraulique en canal rectangulaire à fond rugueux et celle aussi de Rajaratnam (2002), relative au ressaut hydraulique en canal rectangulaire à fond ondulé. A notre connaissance, le canal profilé en "U" à fond rugueux, n'a jamais fait l'objet d'étude de ce genre. C'est dans le but de combler cette lacune que cette étude pour ce type de ressaut a été proposée.

Nous voulons par cette étude, examiner le contrôle du ressaut par un seuil à parois mince dans un canal profilé en "U" à fond rugueux d'un point de vue expérimental et théorique. En effet, le développement théorique, vise à trouver une relation de la forme $f(Y, F_1, C_r)=0$, tels que Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, F_1 est le nombre de Froude incident et C_r est le rapport (ou coefficient) de résistance, qui exprime l'effet de la rugosité du fond du canal en "U" sur le ressaut hydraulique.

V.2. ANALYSE THEORIQUE

La figure 5.1 montre un ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince de hauteur géométrique 's' dans un canal profilé en "U" à fond rugueux de diamètre D . Le seuil est placé à une distance x quasi égale à la longueur L_j du ressaut dont les hauteurs conjuguées à l'amont et à l'aval sont respectivement h_1 et h_2 . L'écoulement étant en régime torrentiel à l'amont et fluvial à l'aval.

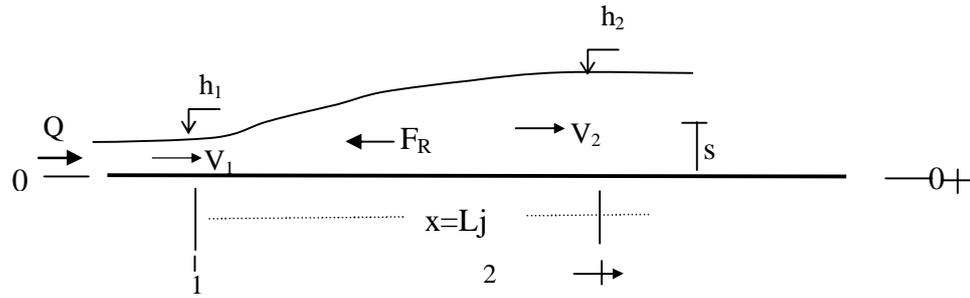


Figure 5.1 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal Profilé en "U" à fond rugueux .Schéma de définition.

Appliquant l'équation de la quantité de mouvement sous sa forme classique entre les sections 1-1 et 2-2 (figure 5.1), en tenant compte de la force de résistance F_R due à la rugosité appliquée au fond du canal. Cette équation est : $\bar{h}_1 A_1 + Q^2 / (gA_1) = \bar{h}_2 A_2 + Q^2 / (gA_2) + F_R / \rho g$ où $\bar{h}_1 = (D^3 / 12A_1) \sin^3 \theta_1 - (D/2) \cos \theta_1$ est la position du centre de gravité de la section amont A_1 , $\bar{h}_2 = (D/2)[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_o) + 1/6] / (y_2 - C_o)$ est la position du centre de gravité de la section aval A_2 , $\theta_1 = \cos^{-1}(1 - 2y_1)$.

$F_R = \rho g L_j C(V_1^2 / 2g) p$, avec p : périmètre du demi circulaire du canal.

Comme il a été signalé précédemment les hypothèses prises en considération pour l'application de l'équation de quantité de mouvement sont les suivantes :

- La pression est hydrostatique pour les sections amont et aval.
- La pente du canal est presque nulle ou horizontale.
- La résistance de l'air est négligeable, l'écoulement est permanent et uniforme à l'amont du canal.

L_j : la longueur du ressaut (m),

C : coefficient de la force de résistance.

ρ : la masse volumique du liquide (kg/m^3)

on a :

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{Q}{\frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)}$$

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g(A_1)^2} = \frac{8Q^2 D}{gD^5 [(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)]^2} = \frac{8q^2 D}{[(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)]^2}$$

$$\text{avec } F_1^2 = \frac{Q^2 D \sin \theta_1}{g \left[\frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]^3} = \frac{64 q^2 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^3} \quad \text{et } q^2 = \frac{Q^2}{g D^5}$$

$$\text{D'ou: } \frac{V_1^2}{2g} = F_1^2 \frac{D(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)}{8 \sin \theta_1}$$

$$A_1 = \frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1); A_2 = \frac{\pi D^2}{8} + \left(h_2 - \frac{D}{2} \right) D = \frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} ; \quad P = \frac{\pi D}{2}$$

L'équation de quantité de mouvement s'écrit comme suit :

$$\frac{Q^2}{g A_1} - \frac{Q^2}{g A_2} - C \frac{V_1^2}{2g} L_j P = h_2 A_2 - h_1 A_1 \quad (5.1)$$

Remplaçant $V_1^2/2g$ par son expression dans l'équation (5.1) on obtient :

$$\frac{Q^2}{g} \left(\frac{A_2 - A_1}{A_2 A_1} \right) - C F_1^2 \frac{D(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)}{8 \sin \theta_1} L_j P = h_2 A_2 - h_1 A_1 \quad (5.2)$$

On multiplie les deux membres de l'équation (5.2) par $\frac{A_2 A_1}{A_2 - A_1}$ il vient :

$$\frac{Q^2}{g} - C F_1^2 \frac{D(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)}{8 \sin \theta_1} L_j \frac{\pi D}{2} \frac{A_2 A_1}{A_2 - A_1} = h_2 A_2 \frac{A_2 A_1}{A_2 - A_1} - h_1 A_1 \frac{A_2 A_1}{A_2 - A_1} \quad (5.3)$$

En remplaçant A_1, A_2, \hat{h}_1 et \hat{h}_2 par leurs expressions respectives dans la relation (5.3) et en divisant les deux membres par D^5 il s'en suit :

$$\begin{aligned}
q^2 &= \frac{CD(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1)F_1^2 L_j \pi (D/2) \frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \left(\frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right)}{8D^5 \sin\theta_1 \left[\left(\frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right) - \left(\frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right) \right]} \\
&= \left(\frac{D}{2(y_2 - C_0)} \right) \frac{\left[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6 \right] \left[\left(\frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right)^2 \left(\frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right) \right]}{D^5 \left[\left(\frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right) - \left(\frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right) \right]} \\
&= \frac{\frac{D^3 \sin^3 \theta_1}{12 \left(\frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right)} \left(\frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right)^2 \left(\frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right) + (D/2) \left(\frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right)^2 \left(\frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right)}{D^5 \left[\left(\frac{\pi D^2}{8} + h_2 D - \frac{D^2}{2} \right) - \frac{D^2}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right]}
\end{aligned}$$

en faisant sortir D^7 comme facteur commun entre les deux membres avec $L_j^* = L_j/D$

on obtient :

$$\begin{aligned}
q^2 &= \frac{CF_1^2 L_j^* (\pi/2) \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1)^2 \left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{8 \sin\theta_1 \left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \left(\frac{1}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right) \right]} \\
&= \frac{\left[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6 \right] \left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)^2 \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right]}{2(y_2 - C_0) \left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right]} \quad (5.4) \\
&= \frac{-\frac{\sin^3 \theta_1}{12} \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) + \frac{\cos\theta_1}{2} \left(\frac{\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1}{4} \right)^2 \left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1)}
\end{aligned}$$

en faisant sortir également pour le deuxième membre comme facteur commun le rapport

suivant : $\frac{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right]}{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right]}$ il vient :

$$q^2 - \frac{CF_1^2 L_j^* (\pi/2) \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2 \left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{8 \sin \theta_1 \left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \left(\frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right) \right]} = \frac{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]} \quad (5.5)$$

$$\left[\frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{2(y_2 - C_0)} \left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{\sin^3 \theta_1}{12} + \frac{\cos \theta_1}{2} \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]$$

On multiplie les deux membres de l'équation (5.5) par l'expression : $\frac{64 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^3}$

L'équation (5.5) devient alors :

$$F_1^2 - \frac{CF_1^2 L_j^* (\pi/2) \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2 \left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{8 \sin \theta_1 \left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \left(\frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right) \right]} \frac{64 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^3} =$$

$$\frac{64 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^3} \frac{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]} \quad (5.6)$$

$$\left[\frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{2(y_2 - C_0)} \left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{\sin^3 \theta_1}{12} + \frac{\cos \theta_1}{2} \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]$$

Après simplification on obtient finalement la relation suivante :

$$F_1^2 \left(1 - \frac{CL_j^* \pi \left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \left(\frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right) \right]} \frac{1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)} \right) =$$

$$\frac{8 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2} \frac{\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}$$

$$\left[\frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{(y_2 - C_0)} \left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{\sin^3 \theta_1}{6} + \frac{\cos \theta_1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right] \quad (5.7)$$

L'équation (5.7) est sous la forme $F_1^2 (1 - C_r) = f(y_1, y_2)$

$$\text{Avec } C_r = \frac{CL_j^* \pi \left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \left(\frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right) \right] (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)}$$

d'où l'expression finale (5.8):

$$F_1^2 (1 - C_r) = \frac{8 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2} \frac{\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]} \quad (5.8)$$

$$\left[\frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{6} - \frac{\sin^3 \theta_1}{6} + \frac{\cos \theta_1}{4} \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]$$

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

Il est clair que pour un coefficient C_r égale à zéro, l'expression (5.8) revient à l'équation théorique de Debabeche (2003) d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en "U" à fond parfaitement lisse.

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

V.3.1. Variation du coefficient C_r de résistance en fonction de la rugosité relative ε/D

Pour trouver l'expression du coefficient C_r de résistance en fonction de la rugosité relative ε/D , nous allons représenter sur la figure 5.2, la variation du terme

$$\frac{8 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2} \frac{\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]}$$

$$\left[\frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{6} - \frac{\sin^3 \theta_1}{6} + \frac{\cos \theta_1}{4} \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]$$

en fonction de F_1^2 pour les quatre rugosités absolues : $\varepsilon(\text{mm}) = 4,30; 5,63; 7,14$ et $9,11$.

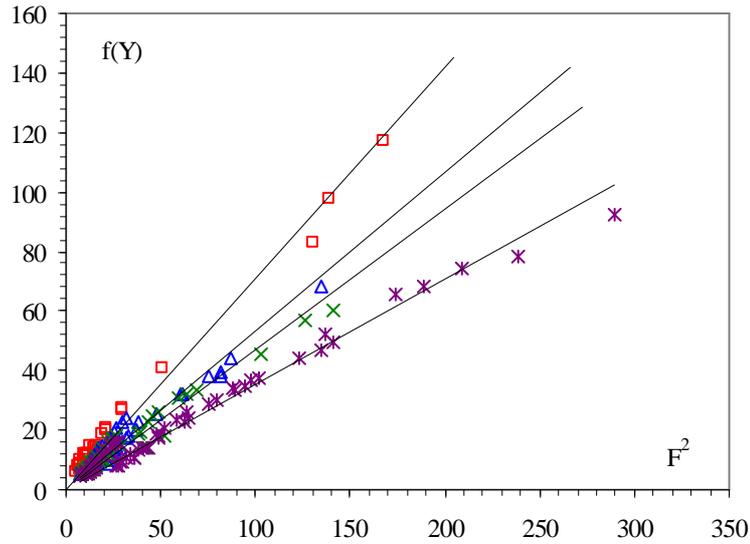


Figure 5.2 : Variation de $f(Y)$ en fonction de F_1^2 , pour quatre rugosités absolues : $\epsilon(\text{mm}) = (\square) 4,3 ; (\triangle) 5,63 ; (\times) 7,14$ et $(*) 9,11$. (—) Courbe d’ajustement.

La figure 5.2 montre quatre nuages de points différents, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la rugosité relative ϵ/D .

L'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut, montre que chaque nuage de points peut s’ajuster avec une relation de la forme :

$$\frac{8 \sin \theta_1}{(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1)^2} \left[\frac{\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right)}{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]} \right] = d F_1^2$$

$$\left[\frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{6} - \frac{\sin^3 \theta_1}{6} + \frac{\cos \theta_1}{4} \frac{1}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \right]$$

En comparant avec la relation (5.8), on constate que le terme ‘d’ représente le facteur $(1-C_r)$.

Le Tableau 5.3 regroupe les valeurs des coefficients C_r .

Tableau 5.3: Coefficients C_r des courbes d'ajustement

ϵ/D	Coefficient C_r	R^2
0,0175	0,29	0,98
0,0229	0,48	0,98
0,0291	0,53	0,96
0,0371	0,65	0,98

Le tableau 5.3 montre que le coefficient C_r augmente avec l’augmentation de la rugosité relative ϵ/D . L’ajustement statistique des couples des valeurs $(\epsilon/D, C_r)$ par la méthode des

moindres carrés donne une relation de type linéaire d'équation : $C_r = 18,14(\varepsilon/D)$. Celle-ci est indiquée dans la figure 5.3.

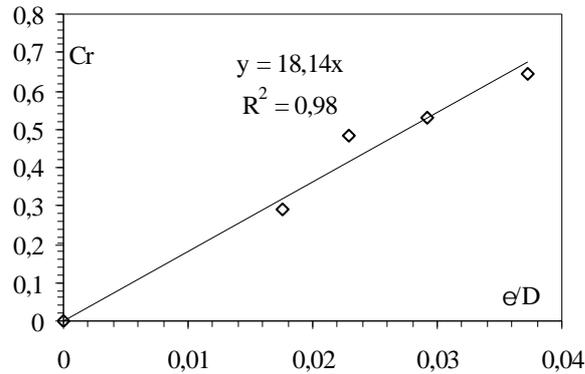


Figure 5.3 : Variation du coefficient C_r en fonction de la rugosité relative ε/D

En remplaçant le coefficient $(1-C_r)$ par son expression dans la relation :

$$\frac{8\sin\theta_1}{(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1)^2} \left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4}(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right] \left[\frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{6} - \frac{\sin^3\theta_1}{4} + \frac{\cos\theta_1}{4}(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right] = (1-C_r)F_1^2$$

L'équation (5.8) peut s'écrire alors :

$$(1-18,14(\varepsilon/D))F_1^2 = \frac{8\sin\theta_1}{(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1)^2} \left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4}(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right] \left[\frac{[(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_0) + 1/6]}{6} - \frac{\sin^3\theta_1}{4} + \frac{\cos\theta_1}{4}(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right] \quad (5.9)$$

$$0 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$$

La figure 5.4 montre que la relation $f(y_1, y_2) = \xi(\varepsilon/D, F_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ces derniers suivent exactement la première bissectrice, montrant par conséquent la fiabilité de la relation (5.9).

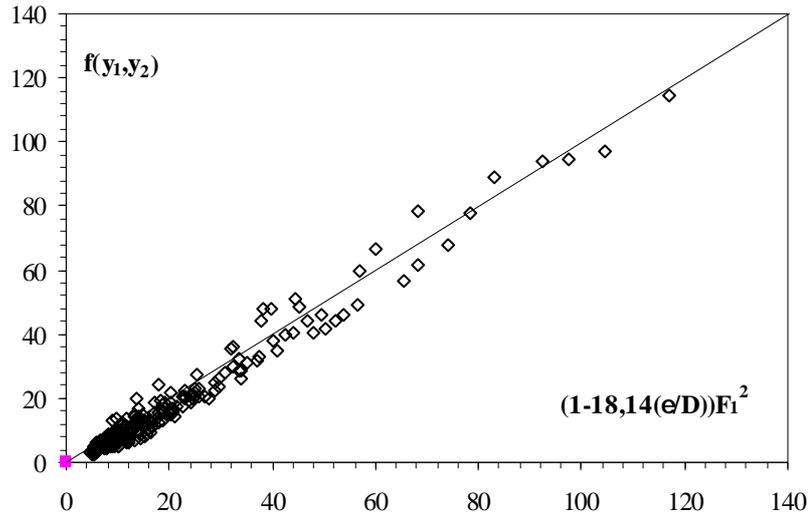


Figure 5.4 : Variation de $f(y_1, y_2)$ en fonction de la relation $(1-18,14(\epsilon/D)) F_1^2$
 (—) première bissectrice

V.3.2. 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 (5.9) étant implicite en y_2 , nous avons trouvé une relation approchée qui permet de trouver aisément le rapport $Y = y_2/y_1$ en fonction du coefficient C_r de résistance du fond du canal et du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

La figure (5.5) montre un nuage de points qui suit parfaitement 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 :

$$Y = 1,38 F_1^{0,76} \left(1 - 18,14 \frac{\epsilon}{D}\right)^{0,38} \tag{5.10}$$

$$0,0144 \leq \epsilon/D \leq 0,0371$$

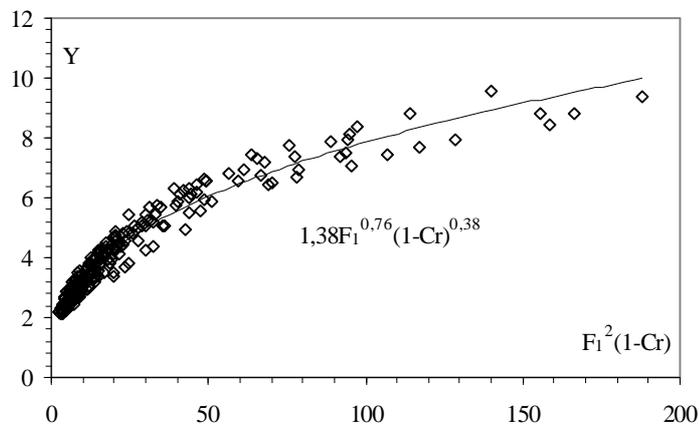


Figure 5.5 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de $F^2(1-C_r)$.
 (o) Points de mesures expérimentales. (—) Courbe d'ajustement.

La figure 5.6 montre la comparaison de la relation approchée (5.10) avec les mesures expérimentales Y . On remarque que le nuage de points suit parfaitement la première bissectrice, montrant ainsi que la relation approchée représente bien les mesures expérimentales.

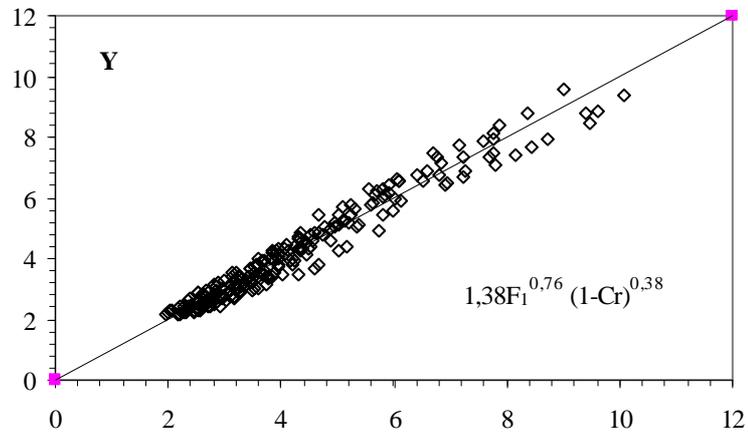


Figure 2.6 : Comparaison de la relation approchée ($F_1, \varepsilon/D$) obtenue avec les mesures expérimentales Y .
 (□) Points de mesures expérimentales. (—) la première bissectrice.

Par ailleurs, les écarts relatifs entre les valeurs des mesures expérimentales Y avec les mesures issues de l'équation semi théorique (5.10) sont calculés et indiqués au tableau 5.4, afin d'examiner la validité de la relation semi théorique (5.10). Le tableau 4.4, montre clairement que les écarts relatifs sont en majorité inférieur à 5%.

Tableau 5.4 : Ecart relatifs en (%) entre Y semi- Théorique et Y expérimentale.

Y(approche)	Y(exp)	$\Delta Y/Y$	Y(approche)	Y(exp)	$\Delta Y/Y$
3,94	4,02	-2,02	6,14	5,88	4,20
4,53	4,41	2,68	2,45	2,31	5,66
4,79	5,07	-5,78	2,55	2,42	4,85
3,72	3,49	6,19	2,58	2,45	4,89
4,30	4,34	-0,78	2,65	2,56	3,32
4,51	4,81	-6,56	2,69	2,60	3,36
4,60	4,87	-5,88	2,82	2,79	1,27
5,58	5,75	-2,96	2,84	2,83	0,47
2,32	2,22	4,06	2,95	3,02	-2,28
2,41	2,41	-0,22	3,09	3,15	-2,21
2,79	2,76	1,18	3,17	3,27	-3,08
3,27	3,09	5,55	3,27	3,44	-5,22
3,36	3,24	3,49	3,46	3,67	-6,10
3,43	3,39	0,94	3,69	3,94	-6,75
3,53	3,72	-5,55	3,09	2,95	4,60
3,59	3,82	-6,35	3,20	3,00	6,29
2,63	2,81	-6,96	3,23	3,16	2,03
3,20	3,37	-5,23	6,90	6,43	6,80
3,24	3,42	-5,61	3,22	3,00	6,75
3,66	3,91	-6,96	3,25	3,03	6,76
3,87	4,12	-6,53	3,34	3,09	7,66
3,96	4,16	-4,90	3,38	3,26	3,29
3,48	3,33	4,10	3,53	3,53	0,07
3,83	4,03	-5,33	3,69	3,59	2,66
4,13	4,25	-2,85	4,15	3,94	5,07
7,78	8,12	-4,36	4,20	4,00	4,67
8,36	8,81	-5,47	4,36	4,32	0,76
5,32	5,67	-6,52	4,44	4,50	-1,27
7,60	7,87	-3,61	4,56	4,59	-0,66
9,02	9,55	-5,87	4,88	4,97	-1,77
2,59	2,55	1,54	5,01	5,09	-1,57
2,82	2,73	3,43	5,19	5,18	0,25
3,45	3,65	-5,64	6,03	5,94	1,54
2,27	2,40	-6,02	6,53	6,59	-0,96
6,95	6,48	6,78	6,80	6,76	0,59
7,25	6,91	4,63	2,17	2,13	1,68
7,69	7,35	4,47	2,19	2,15	1,49
7,75	7,48	3,50	2,22	2,19	1,46
9,39	8,78	6,46	2,26	2,27	-0,27
4,49	4,35	2,95	2,37	2,44	-3,10
4,86	4,56	6,29	2,43	2,46	-1,36
5,34	5,06	5,28	2,62	2,73	-4,24
5,39	5,09	5,53	2,72	2,90	-6,72
5,82	5,47	5,99	2,84	2,98	-5,14
6,00	5,59	6,79	2,86	3,06	-7,05
			2,71	2,54	6,37
			2,76	2,61	5,60
			2,87	2,70	5,59
			2,93	2,79	4,96

Tableau 5.4 (suite et fin) : Ecart relatifs en (%) entre Y semi- théorique et Y expérimentale

Y(approche)	Y(exp)	$\Delta Y/Y$
3,12	2,97	4,75
3,17	3,07	3,16
3,94	3,74	5,09
3,94	3,83	2,88
4,34	4,26	1,78
4,39	4,35	0,96
4,75	4,78	-0,68
4,95	5,04	-1,84
5,13	5,26	-2,61
5,83	6,13	-5,12
6,40	6,78	-6,05
6,60	6,91	-4,70
6,85	7,17	-4,68
7,21	7,35	-1,87
7,76	7,91	-1,93
3,58	3,41	4,73
3,68	3,50	4,98
3,90	3,94	-1,11
4,05	4,15	-2,48
4,23	4,41	-4,28
4,36	4,59	-5,14
4,66	4,82	-3,45
4,94	5,21	-5,31
5,08	5,26	-3,60
5,22	5,44	-4,25
5,61	5,85	-4,27
5,81	6,03	-3,72
5,91	6,18	-4,48
2,25	2,23	0,72
2,27	2,26	0,52
2,33	2,36	-1,10
2,34	2,39	-2,10
2,42	2,48	-2,16
2,48	2,54	-2,34
2,58	2,64	-2,36

V.4. Etude expérimentale

L'objectif principal de cette étude est d'examiner l'effet de la rugosité du fond du canal profilé en "U", sur les caractéristiques géométriques du ressaut hydraulique.

En effet, des relations fonctionnelles, en terme adimensionnels, liant les différentes caractéristiques du ressaut pour cinq rugosités absolues du fond du canal ($\varepsilon = 3,55\text{mm}$; $\varepsilon = 4,3\text{mm}$; $\varepsilon = 5,63\text{mm}$; $\varepsilon = 7,14\text{mm}$ et $\varepsilon = 9,11\text{mm}$) seront proposées.

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

V.4.1. Description du modèle

Le canal de mesure qui nous a servi de banc d'essai (photo 5.1) est constitué essentiellement d'une rigole demi-circulaire en 'pvc' de 5,67 m de longueur sur laquelle est fixée latéralement, d'un coté une tôle en aluminium de 0,50 m de hauteur et de l'autre coté 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 du silicone.



Photo 5.1 : 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 110 mm de diamètre. Celle-ci est reliée à une boîte en charge (Photo 5.2a) métallique fermée, sur laquelle est insérée une ouverture à paroi plane (photo 5.2b) en tôle de largeur déterminée débouchant dans le canal (figure 5.8).

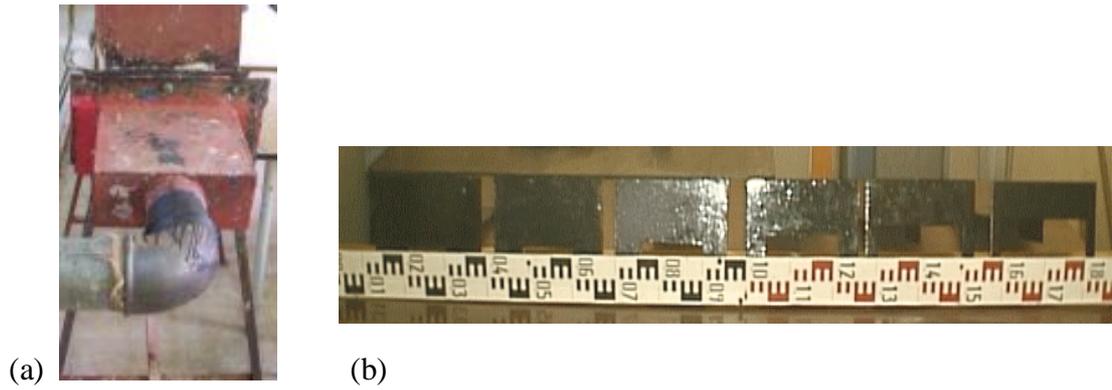


Photo. 5.2 (a) boîte en charge (b) série d'ouvertures

Le rôle de cette ouverture 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 d'une 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 5.2c) débitant jusqu'à 44 l/s.



Photo 5.2(c) : Pompe

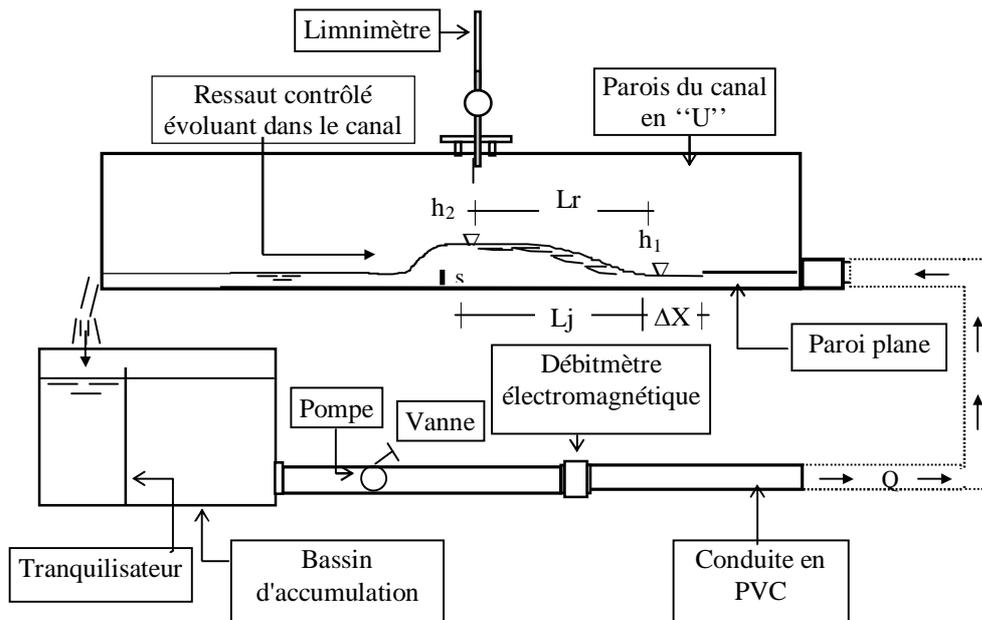


Figure 5.8 : Schéma de l'installation ayant servi à l'expérimentation.

V.4.2.Appareillages de mesure

V.4.2.1. Débitmètre électromagnétique

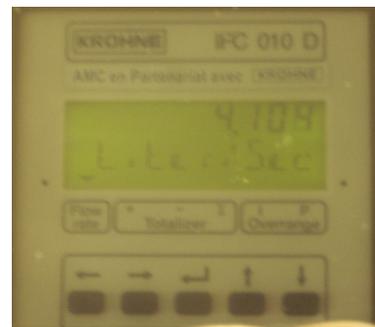
Le débitmètre électromagnétique est un dispositif destiné à la mesure des débits. Il est composé d'un capteur de mesures (photo 5.3) placé au travers de l'écoulement, raccordé par un câble électrique à un convertisseur de mesures à affichage digital (photo 5.4). Selon le diamètre de la conduite, cet appareil admet un débit minimal et un débit maximal. Pour notre cas le capteur de mesures présente un diamètre nominale $D = 110\text{mm}$, pour cela le débit volume mesuré est inscrit dans l'intervalle : $2 \text{ l/s} \leq Q \leq 44 \text{ l/s}$.



Photo 5.3 : Photographie du capteur de mesures du débitmètre électromagnétique.



a)



b)

Photo 5.4. : a) Photographie du convertisseur de mesures du débitmètre électromagnétique.
b) Photographie de l'écran d'affichage des débits.

Le principe de fonctionnement de cet appareil est fondé sur la loi d'induction de Faraday. Le liquide qui traverse le débitmètre constitue un élément conducteur qui génère une tension induite par le champ magnétique créé par les bobines d'induction de cet appareil électromagnétique (figure 5.9). Cette tension est linéairement proportionnelle à la vitesse de passage du liquide.

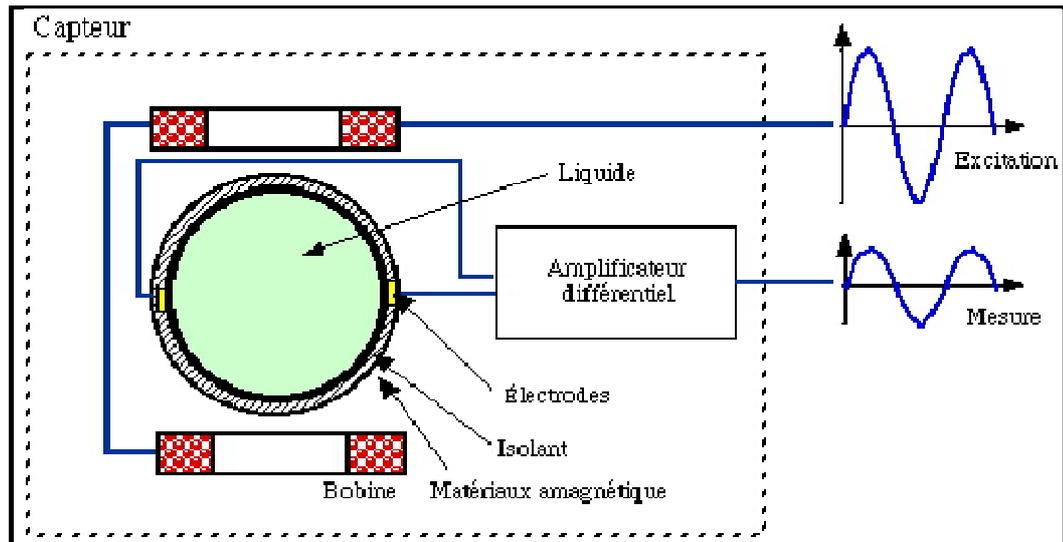


Figure 5.9 : Schéma électrique du capteur du débitmètre électromagnétique

L'induction magnétique, est produite par deux bobines placées de part et d'autre de la conduite de mesure. La conduite est en matériaux amagnétique et est revêtue sur sa surface intérieure d'une couche isolante. Deux électrodes de mesure sont placées aux extrémités du diamètre perpendiculaire au champ. Les bobines sont alimentées par une tension alternative, afin d'éviter une polarisation des électrodes.

V.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 5.5).

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'effleurer 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 5.5 : Limnimètre



Photo 5.6 : Une série de tamis placés sur un vibreur.



Photo 5.7: Palmer numérique

V.4.2.3.Tamiseuse

Afin d'obtenir les cinq rugosités absolues : 3,55 mm ; 4,30 mm ; 5,63 mm ; 7,14 mm et 9,11mm, nous avons procédé au tamisage du sable de concassage au moyen d'une tamiseuse (photo 5.6).

V.4.2.4.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 5.7)

V.4.3. Description des essais

V.4.3.1. Procédure expérimentale 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 5.10).

L'expérimentation a été menée sous quatre hauteurs initiales (h_1 (cm) = 2,3 ; 3,40 ; 5,20 ; 6,10). Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue ($2 < F_1 < 20$).

Des seuils de différentes hauteurs 's' ont été testés (Photo 5.8), afin d'observer leur influence sur le contrôle du ressaut ; treize seuils ont ainsi été confectionnés, dont la hauteur s varie entre 3,2 cm et 13,5 cm.

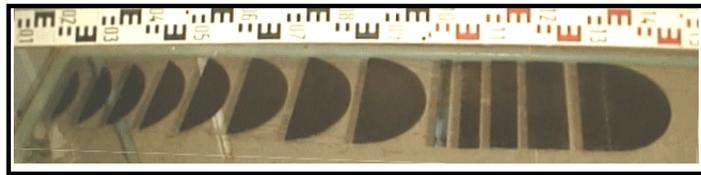


Photo 5.8 : Série de seuils minces ayant servi au contrôle du ressaut.

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 F_1 de l'écoulement incident. L'accroissement de F_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 F_1 correspond une valeur de la longueur L_j du 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 :

- le débit relatif q ou le nombre de Froude incident F_1 ,

$$F_1 = \frac{Q^2 D \sin \alpha}{\sqrt{g \left[\frac{D^2}{4} (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) \right]^3}}$$

$$F_1 = \frac{8q\sqrt{\sin \alpha}}{(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)^{3/2}}$$

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

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

- la hauteur relative amont $y_1 = h_1/D$,
- la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$,
- le rapport $y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut.
- la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil,
- la longueur relative L_j/h_1 du ressaut,
- la longueur relative L_j/h_2 du ressaut.
- la rugosité relative ε/D du fond du canal.



Photo 5.9 : 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

V.4.3.2. 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 différents diamètres normalisés variant entre 3 et 12,5 mm (photo 5.11), avec des temps de tamisage bien fixés en relation avec la gamme de gravier à tamisé (moins de 5 minutes).
- Après l'obtention de la gamme de gravier voulue, ce dernier est lavé puis séché.
- La gamme choisie, varie entre 3 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 évaluons la valeur de la rugosité équivalente par un appareil de mesure dit : "PALMER NUMERIQUE ", de précision 1/1000.
- Enfin, les rugosités équivalentes obtenues sont : $\varepsilon = 3,55\text{mm}$; $\varepsilon = 4,3\text{mm}$; $\varepsilon = 5,63\text{mm}$; $\varepsilon = 7,14\text{mm}$ et $\varepsilon = 9,11\text{mm}$.



Photo 2.10 : Echantillon de grains de gravier de rugosité absolue $\varepsilon=4,30\text{ mm}$.

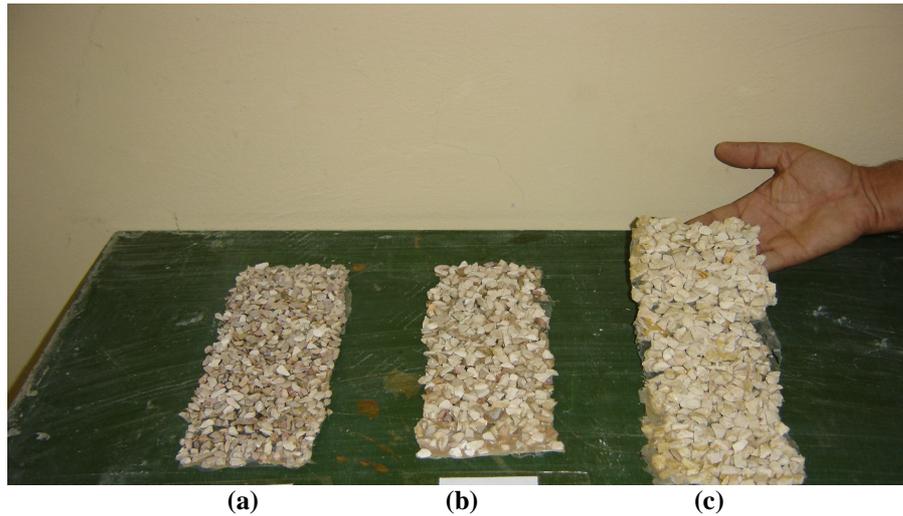


Photo 5.11 : Echantillons de grains de gravier de rugosité absolue :
a) $\varepsilon = 5,63$ mm ; b) $\varepsilon = 7,14$ mm ; c) $\varepsilon = 9,11$ mm.

V.4.4. Résultats expérimentaux

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

La Figure (5.10) montre la représentation graphique de la variation de L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude pour quatre valeurs de rugosités absolues $\varepsilon = 4,30$ mm; $\varepsilon = 5,63$ mm; $\varepsilon = 7,14$ mm et $\varepsilon = 9,11$ mm.

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

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

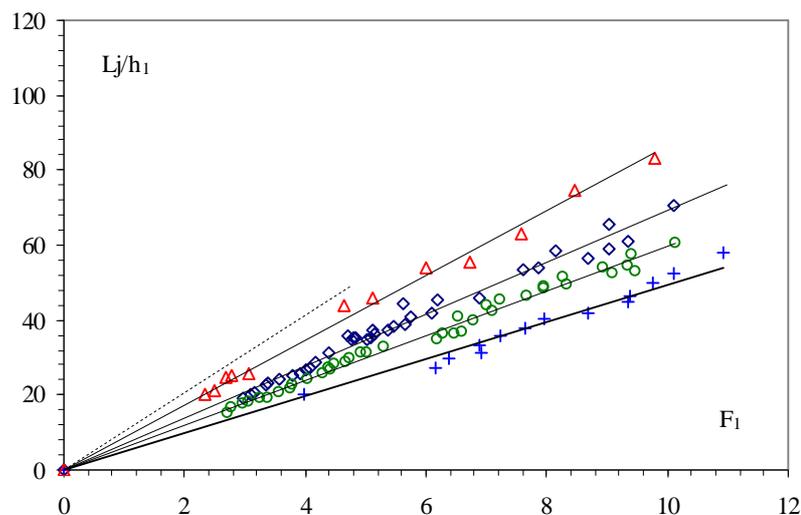


Figure 5.10 : Ressaut contrôlé dans un canal en U à fond rugueux. Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour quatre rugosités différentes " ε ": (Δ) 4,30mm ; (\circ) 5,63mm ; (\square) 7,14mm et (\times) 9,11mm. (---) courbe du ressaut contrôlé lisse selon Debabeche (2003). (—) Courbes d'ajustements.

L'analyse de ces courbes 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. En outre, la rugosité ε augmente avec la diminution du rapport de la longueur relative L_j/h_1 , ceci est dû à la rugosité du fond du canal, qui provoque une dissipation d'énergie.

Le tableau 5.5 regroupe les valeurs du coefficient a_1 .

Tableau 5.5: coefficients a_1 des courbes d'ajustements.

ε/D	Coefficients a_1	R^2
0,0176	8,66	0,99
0,0229	6,93	0,98
0,0291	5,98	0,99
0,0371	4,96	0,98

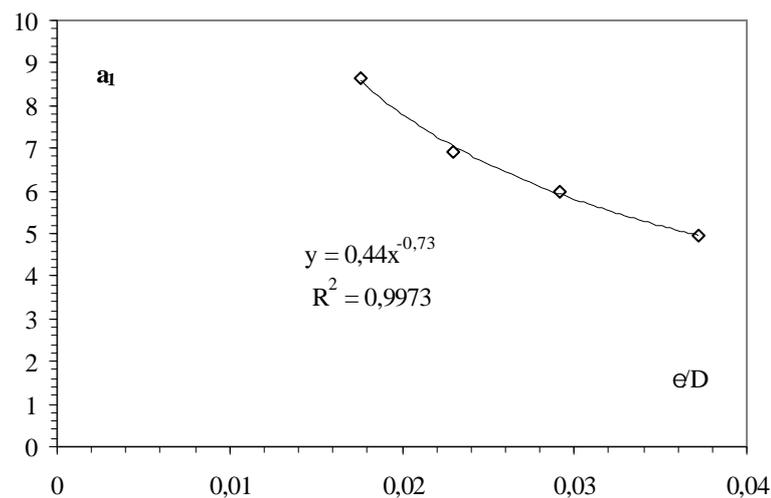


Figure 5.11 : Variation du coefficient " a_1 " en fonction de la rugosité relative ε/D

L'ajustement des couples de valeurs (a_1 , ε/D) du tableau 5.5 a permis d'aboutir avec une bonne corrélation à la relation puissance suivante : $a_1 = 0,44\varepsilon/D^{-0,73}$. Cette équation est présentée à la figure 5.11.

L'équation liant la longueur relative amont $\frac{L_j}{h_1}$, le nombre de Froude F_1 et la rugosité relative ε/D s'écrit alors :

$$\frac{L_j}{h_1} = 0,44 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{-0,73} F_1 \quad (5.11)$$

pour $0,0175 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$

La Figure (5.12) montre aussi que la relation $Lj/h_1 = f(\varepsilon/D, F_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice.

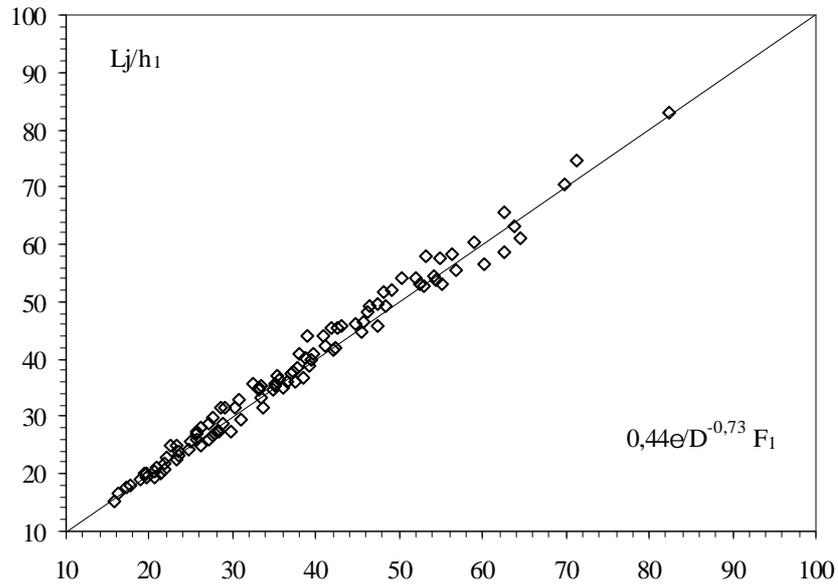


Figure (5.12) : Variation de la longueur relative Lj/h_1 en fonction de $f(\varepsilon/D, F_1)$.

(□) Les points expérimentaux du ressaut contrôlé à fond rugueux. (—) Première bissectrice.

Par ailleurs, les écarts relatifs entre les valeurs des mesures expérimentales Lj/h_1 avec les mesures issues de l'équation globale d'ajustement (5.11) sont évalués et montrés au tableau 5.5, dans but de justifier la fiabilité de l'équation empirique. Le tableau 5.5, montre nettement que les écarts relatifs sont dans la plus part inférieur à 5%.

Tableau 5.5 : Ecart relatifs entre L_j/h_1 expérimentale et L_j/h_1 d'ajustement

L_j/h_1 exp.	L_j/h_1 relation.	$\Delta L_j/L_j$ (%)	L_j/h_1 exp.	L_j/h_1 relation.	$\Delta L_j/L_j$ (%)
45,87	43,13	5,97	35,50	33,47	5,71
54,13	50,38	6,93	35,38	35,08	0,86
55,65	56,72	-1,91	37,47	37,08	1,04
63,04	63,76	-1,13	37,21	35,28	5,18
74,78	71,30	4,66	38,97	39,09	-0,30
83,04	82,35	0,83	40,88	39,69	2,92
25,00	23,36	6,55	41,68	42,09	-1,00
20,25	19,60	3,18	45,41	42,69	5,98
21,23	20,96	1,27	45,88	47,50	-3,54
25,90	25,68	0,86	56,50	60,13	-6,43
27,05	27,74	-2,56	58,76	62,54	-6,42
27,38	28,40	-3,72	61,15	64,54	-5,55
53,26	52,52	1,40	20,19	21,31	-5,56
58,26	56,42	3,16	20,71	21,75	-5,01
65,43	62,50	4,49	22,50	23,23	-3,24
70,43	69,88	0,79	23,08	23,40	-1,41
35,15	33,27	5,33	24,29	24,62	-1,37

Tableau 5.5 (suite) : Ecart relatifs entre L_j/h_1 expérimentale et L_j/h_1 d'ajustement

L_j/h_1 exp.	L_j/h_1 relation	$\Delta L_j/L_j$ (%)	L_j/h_1 exp.	L_j/h_1 relation	$\Delta L_j/L_j$ (%)
25,00	26,10	-4,40	48,24	46,18	4,27
25,87	27,06	-4,61	49,41	48,37	2,12
27,42	28,19	-2,79	54,12	51,91	4,09
28,92	28,80	0,44	54,41	54,26	0,27
31,44	30,36	3,43	57,65	54,77	4,99
34,77	33,06	4,92	60,29	58,98	2,17
34,75	34,80	-0,14	15,29	15,87	-3,81
36,38	35,67	1,97	16,75	16,23	3,10
38,37	37,67	1,81	17,52	17,24	1,62
26,80	27,71	-3,38	17,98	17,81	0,95
36,09	37,58	-4,15	19,08	18,96	0,62
40,78	37,95	6,95	19,29	19,68	-2,02
42,17	41,23	2,23	20,58	20,68	-0,51
45,43	41,96	7,64	21,73	21,83	-0,46
49,13	46,34	5,67	22,69	22,05	2,84
51,65	48,17	6,75	23,96	23,56	1,70
52,61	52,91	-0,57	25,58	24,92	2,57

Tableau 5.5 (suite et fin) : Ecart relatif entre L_j/h_1 expérimentale et L_j/h_1 d'ajustement

L_j/h_1 exp.	L_j/h_1 relation	$\Delta L_j/L_j$ (%)	L_j/h_1 exp.	L_j/h_1 relation	$\Delta L_j/L_j$ (%)
53,04	55,10	-3,88	29,50	31,03	-5,20
26,88	25,78	4,09	31,47	33,57	-6,68
28,24	26,12	7,49	33,41	33,43	-0,06
28,88	27,13	6,06	35,88	35,12	2,11
31,47	29,15	7,36	37,94	37,24	1,85
32,94	30,84	6,38	40,29	38,79	3,73
35,00	36,06	-3,04	42,06	42,32	-0,62
36,18	36,57	-1,09	44,71	45,42	-1,60
36,76	38,42	-4,51	46,32	45,70	1,34
39,76	39,43	0,83	49,71	47,40	4,64
44,12	40,78	7,56	52,21	49,09	5,97
46,18	44,66	3,29	20,00	19,41	2,94

V.4.4.2. Longueur relative de rouleau L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

La Figure (5.13) présente la variation de la longueur du rouleau de surface L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude incident pour les quatre valeurs de rugosités absolues testées : $\varepsilon = 4,30$ mm ; $\varepsilon = 5,63$; $\varepsilon = 7,14$ mm et $\varepsilon = 9,11$ mm. L'analyse des points de mesures expérimentales, montre que chaque valeur de rugosité " ε " correspond une courbe de type

linéaire de la forme : $\frac{L_r}{h_1} = a_2(F_1)$.

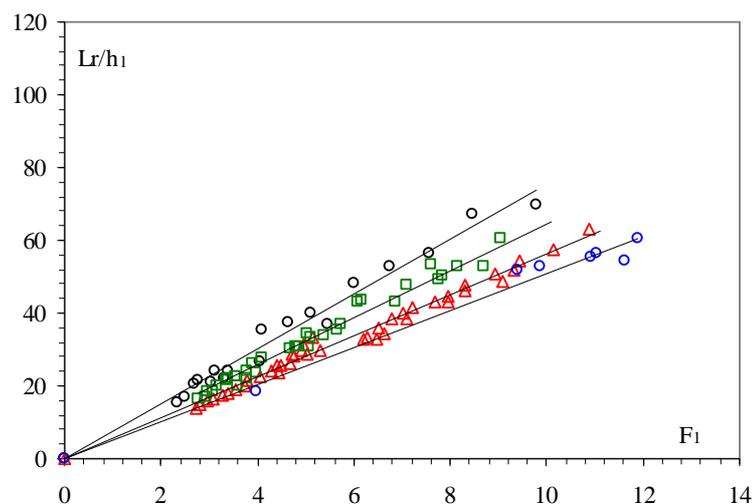


Figure 5.13 : Variation de la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 en fonction de nombre Froude, pour quatre rugosités différentes " ε ": (o) 4,30mm ; (□) 5,63mm ; (△) 7,14mm et (○) 9,11mm.

(—) Courbes d'ajustements.

Pour chaque allure de nuage de points on remarque que la longueur relative du rouleau de surface Lr/h_1 augmente au fur et à mesure que le nombre de Froude augmente et ceci pour toutes les rugosités testées. Cependant, la rugosité augmente avec la diminution de la longueur relative. Le tableau 5.6 regroupe les valeurs du coefficient a_2 .

Tableau 5.6: Coefficients a_2 des courbes d'ajustements.

ε/D	Coefficients a_2	R^2
0,0176	7,52	0,98
0,0229	6,47	0,98
0,0291	5,61	0,98
0,0371	5,09	0,98

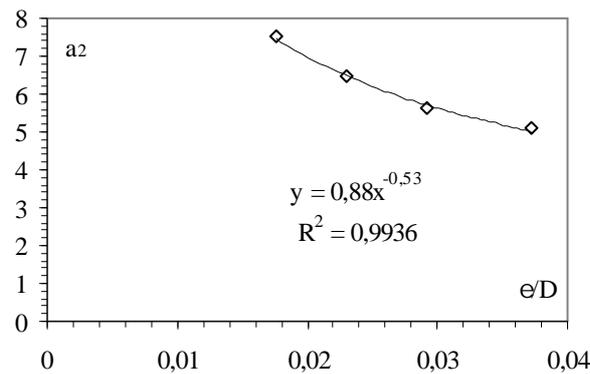


Figure 5.14 : Variation du coefficient " a_2 " en fonction de la rugosité relative ε/D

L'ajustement des couples de valeurs (a_2 , ε/D) du tableau 5.6 par une relation de type puissance est : $a_2 = 0,88 \varepsilon/D^{-0,53}$. Cette relation est illustrée à la Figure (5.14).

La relation définitive représentant la longueur du rouleau de surface en fonction de la rugosité relative et le nombre de Froude incident est la suivante :

$$\frac{Lr}{h_1} = 0,88 \frac{\varepsilon}{D}^{-0,53} F_1 \quad (5.12)$$

pour $0,0175 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$

La figure (5.15) présente clairement la relation $L_r/h_1 = f(\varepsilon/D, F_1)$ qui ajuste les points de mesures expérimentales avec une très bonne corrélation. Ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice.

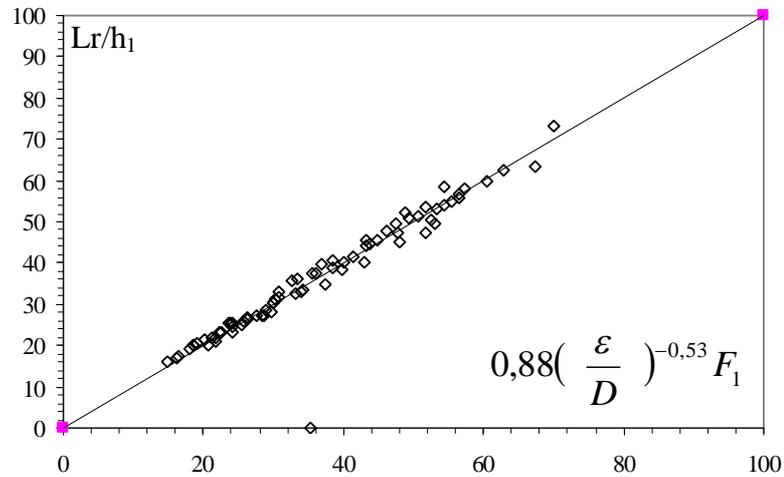


Figure 5.15 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction de $f(\varepsilon/D, F_1)$.

(□) Points expérimentaux du ressaut contrôlé à fond rugueux. (—) Première bissectrice.

En effet, les écarts relatifs entre les mesures expérimentales L_r/h_1 avec celles issues de la relation générale d'ajustement (5.13) sont estimés et indiqués au tableau 5.7, dans le but de montrer la fiabilité de cette dernière. Le tableau 5.7, montre nettement que les écarts relatifs sont en majorité inférieur à 5%.

Tableau 5.7 : Ecart relatifs entre L_r/h_1 expérimentale et L_r/h_1 relation d'ajustement

L_r/h_1 exp.	L_r/h_1 relation	$\Delta L_r/L_r$ (%)	L_r/h_1 exp.	L_r/h_1 relation	$\Delta L_r/L_r$
39,78	38,43	3,40	43,03	40,15	6,70
48,04	44,89	6,56	43,74	44,67	-2,14
52,61	50,54	3,94	49,35	51,08	-3,50
56,52	56,81	-0,51	21,63	22,01	-1,72
67,39	63,53	5,73	22,25	23,15	-4,06
70,00	73,38	-4,83	24,00	25,44	-6,01
21,73	20,82	4,21	26,15	26,51	-1,35
24,23	23,28	3,93	27,50	27,08	1,53
20,74	20,17	2,72	33,21	32,72	1,47
24,10	25,30	-4,99	34,12	33,54	1,68
47,61	49,38	-3,73	36,00	37,42	-3,95
53,39	53,06	0,63	38,48	40,66	-5,68
30,00	30,54	-1,78	41,30	41,38	-0,19
30,29	31,29	-3,29	43,17	45,70	-5,85
30,74	31,48	-2,42	47,74	47,50	0,50
33,82	33,17	1,92	48,91	52,18	-6,67
35,44	37,32	-5,30	25,65	25,76	-0,44

Tableau 5.7 (suite et fin) : Ecart relatifs entre L_r/h_1 expérimentale et L_r/h_1 de la relation d'ajustement.

L_r/h_1 exp.	L_r/h_1 relation	$\Delta L_r/L_r$ (%)
26,18	26,76	-2,21
28,53	27,09	5,05
28,82	28,75	0,25
30,00	30,41	-1,37
38,53	38,89	-0,93
40,00	40,22	-0,54
43,24	44,04	-1,86
44,71	45,54	-1,86
46,18	47,70	-3,29
50,59	51,19	-1,18
51,76	53,51	-3,38
54,41	54,01	0,74
57,21	58,17	-1,68
62,94	62,32	0,99
16,06	17,00	-5,85
16,56	17,56	-6,07
20,19	21,53	-6,62
21,35	21,74	-1,85
22,58	23,23	-2,89
24,15	24,57	-1,74
25,58	25,21	1,43
28,46	27,19	4,45
29,71	28,26	4,90
53,04	49,65	6,40
55,43	55,03	0,74
56,52	55,66	1,53
60,44	59,88	0,92

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

La Figure (5.16) montre la représentation graphique de la variation de Y en fonction du nombre de Froude F_1 incident pour quatre valeurs de rugosités absolues : $\varepsilon = 4,3$ mm ; $\varepsilon = 5,63$; $\varepsilon = 7,14$ mm, et $\varepsilon = 9,11$ mm.

On remarque quatre nuages de points distincts, correspondant chacun à une rugosité fixée. Par ailleurs, l'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut à fond rugueux, montre qu'à chaque rugosité " ε ", correspond une courbe de type linéaire de la forme : $Y = a_3 F_1$

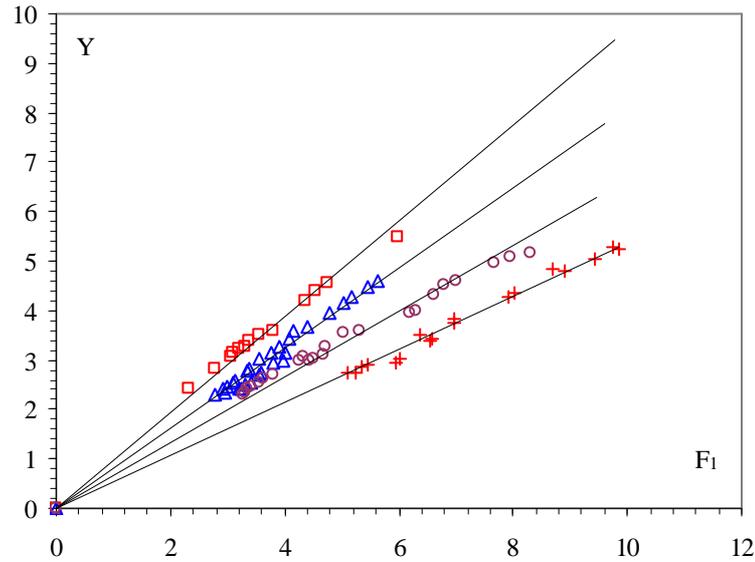


Figure 5.16 : Ressaut contrôlé dans un canal en "U" à fond rugueux. Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour quatre valeurs différentes de " ε ": (\square) 4,3mm ; (Δ) 5,63mm ; (\circ) 7,14mm et (\times) 9,1mm. (—) Courbes d'ajustements.

Le tableau 5.8 regroupe les valeurs du coefficient a_3 .

Tableau 5.8: coefficient a_3 des courbes d'ajustement.

ε / D	Coefficient a_3	R^2
0,0175	0,97	0,99
0,0229	0,81	0,98
0,0291	0,66	0,98
0,0371	0,53	0,99

Un ajustement des couples de valeurs ($a_3, \varepsilon/D$) du tableau 5.7, donne avec une bonne corrélation, la relation linéaire suivante : $a_3 = -22,31 \varepsilon/D + 1,34$. Cette équation est issue de la figure (5.17).

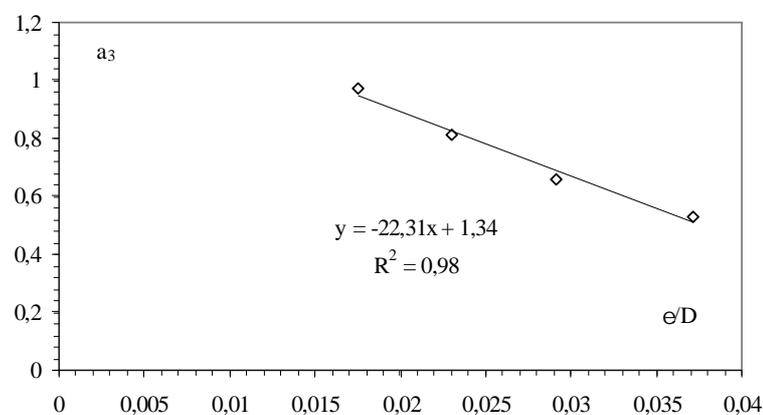


Figure 5.17: Variation du coefficient " a_3 " en fonction de la rugosité " ε/D ".

En remplaçant le coefficient a_3 par son expression dans la relation : $Y = a_3 F_1$, l'équation liant le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre Froude F_1 et la rugosité relative ε/D s'écrit alors comme suit :

$$Y = (-22,31 \varepsilon/D + 1,34) F_1 \quad (5.13)$$

pour $0,0175 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$

La Figure (5.18) illustre aussi que la relation $Y=f(\varepsilon/D, F_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ces derniers suivent également la première bissectrice.

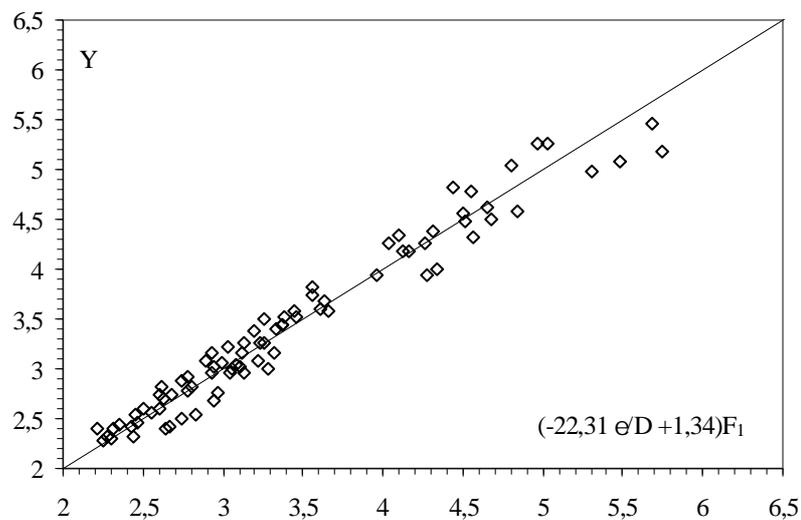


Figure (5.18) : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre Froude F_1 incident pour quatre valeurs de rugosité relative " ε/D ". (◇) Points expérimentaux du ressaut contrôlé en canal profilé en "U" à fond rugueux. (—) Première bissectrice .

En outre, les écarts relatifs entre les valeurs des mesures expérimentales $Y_{exp.}$ avec celles obtenues par la relation d'ajustement (5.13) sont estimés et présentés au tableau 5.6. Le tableau 5.6, montre que les écarts relatifs sont en majorité inférieur à 5%, ce qui justifie la fiabilité de la relation 5.13.

Tableau 5.6 : Ecart relatifs entre Y de la relation d'ajustement et Y expérimentale

Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y(\%)$	Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y(\%)$
5,68	5,47	3,74	3,46	3,53	-2,00
3,03	3,23	-6,53	3,66	3,59	1,97
3,39	3,52	-3,95	4,28	3,94	7,92
2,89	3,08	-6,33	4,34	4,00	7,84
3,13	3,26	-4,19	4,56	4,32	5,19
3,20	3,39	-5,89	4,68	4,50	3,85
3,61	3,60	0,26	4,84	4,59	5,21
4,12	4,18	-1,25	5,30	4,97	6,22
4,32	4,39	-1,65	2,25	2,28	-1,42
4,50	4,55	-1,10	2,28	2,33	-2,19
2,30	2,31	-0,29	2,32	2,41	-4,08
2,43	2,42	0,12	2,35	2,44	-4,09
2,47	2,45	0,57	2,45	2,54	-3,86
2,55	2,56	-0,27	2,50	2,61	-4,15
2,60	2,60	0,26	2,63	2,70	-2,95
2,78	2,79	-0,31	2,93	2,97	-1,16
2,80	2,83	-0,94	3,00	3,07	-2,33
2,95	3,02	-2,47	3,04	2,96	2,88
3,12	3,15	-0,97	3,08	3,04	1,07
3,24	3,27	-0,96	3,33	3,39	-1,76
3,37	3,44	-2,04	3,36	3,43	-2,08
3,45	3,58	-3,79	3,56	3,74	-5,12
3,63	3,67	-1,09	4,04	4,26	-5,53
3,96	3,94	0,36	4,10	4,35	-6,00
4,16	4,17	-0,20	4,55	4,78	-5,10
4,27	4,27	-0,01	4,81	5,04	-4,92
4,51	4,48	0,61	5,03	5,26	-4,57
4,65	4,62	0,83	2,60	2,74	-5,01
2,44	2,33	4,58	2,68	2,74	-2,11
3,13	2,95	5,82	2,74	2,88	-5,27
3,28	3,00	8,48	2,78	2,91	-4,65
			4,97	5,26	-5,87

V.4.4.4. Rendement du ressaut hydraulique dans un canal en "U" à fond rugueux

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 amont et aval immédiats du ressaut impose :

$$H_1 = h_1 + Q^2 / (2.g.A_1^2) = h_2 + Q^2 / (2.g.A_2^2) + \Delta H \quad (5.14)$$

Le rendement η du ressaut hydraulique est défini par :

$$\eta = \Delta H / H_1, \quad \Delta H = H_1 - H_2 \quad (5.15)$$

avec H_1 : la charge amont , H_2 : la charge aval Le rendement varie entre les limites 0 et 1 ($0 < \eta < 1$).

- l'aire de la section amont est : $A_1 = D^2/4(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1)$

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

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

$$\eta = \frac{h_1 - h_2 + \left[\frac{8.D.q^2}{[(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2 - (\theta_2 - \sin(\theta_2)\cos(\theta_2))^2]} \right]}{h_1 + \left[\frac{8.D.q^2}{[(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2]} \right]} \quad (5.16)$$

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

$$\eta = \frac{h_1 - h_2 + \frac{D.q^2}{2} \left[\frac{16}{(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2} - \frac{1}{(\pi/8 + y_2 - 1/2)^2} \right]}{h_1 + \left[\frac{8.D.q^2}{[(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2]} \right]} \quad (5.17)$$

La variation du rendement du ressaut en fonction du nombre de Froude incident est représentée par la figure 5.19.

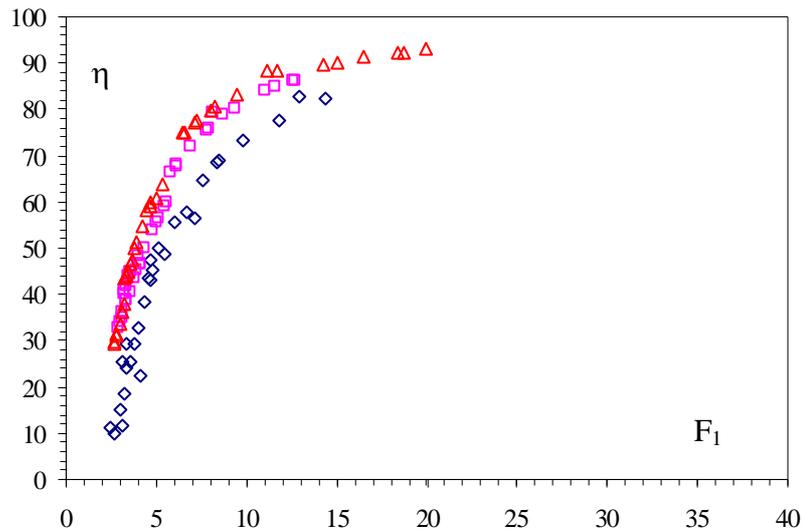


Figure 5.19 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . Les motifs représentent les points expérimentaux du ressaut en canal profilé en "U", à fond rugueux, de rugosité relative ε/D : (\square)= 0,0175 ; (\square)= 0,0229 et (Δ)=0,0291.

La figure 5.19 montre que pour l'augmentation du nombre du Froude incident entraîne l'augmentation du rendement, par ailleurs pour le même nombre du Froude incident, le rendement augmente avec l'augmentation de la rugosité, ainsi la dissipation de l'énergie est importante avec l'augmentation de la rugosité équivalente.

V.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 en "U", à fond rugueux.

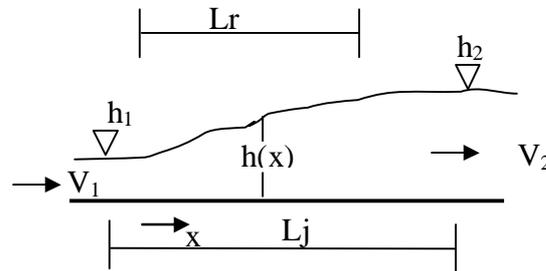


Figure 5.20 : Profil de surface du ressaut

Comme le montre le schéma simplifié de la Figure (5.20), 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 (5.21), cette figure montre les points de mesure expérimentales pour différentes rugosités.

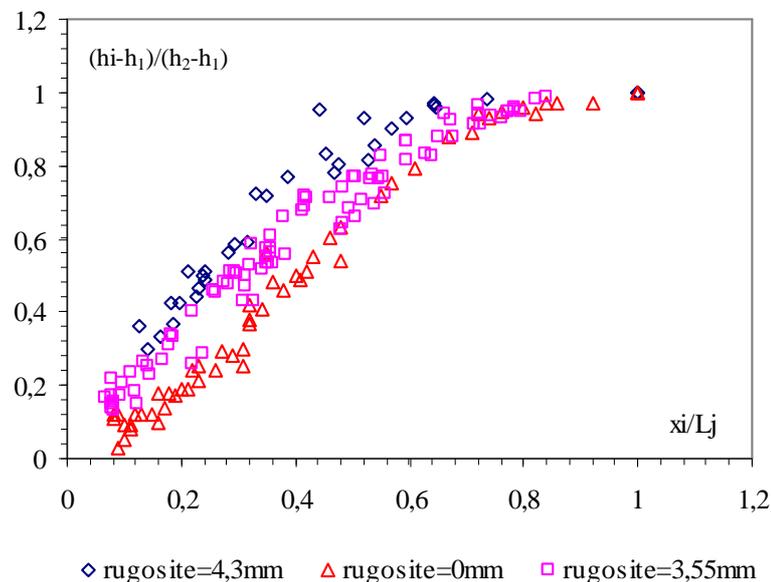


Figure 5.21 : Profil du surface généralisé du ressaut hydraulique dans un canal profilé en "U" à fond rugueux pour trois rugosités différentes : (○) 4,3mm ; (□) 3,55mm et (△) 0,00mm.

D'après la Figure (5.21) on constate trois nuages de points distincts correspondant aux trois rugosités étudiées. Ainsi, pour le même rapport x/L_j , la valeur y augmente avec

l'augmentation de la rugosité absolue, ce qui montre clairement l'influence de la rugosité sur la diminution de la profondeur h_2 .

V.4.4.6. Exemple d'application

Une application de calcul des relations obtenues, pour le cas du ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en "U" à fond rugueux.

Exemple de calcul

- $Q=110$ l/s, le débit volume passant par le bassin d'amortissement de section droite profilé en "U" à fond rugueux.

- $h_1=12$ cm la hauteur initiale du ressaut. $D=24,5$ cm et $\varepsilon/D=0,03$

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

$$F_1^2 = Q^2 \cdot D \cdot \sin(\theta) / [9.81 \cdot (D^2/4(\theta_1 - \sin(\theta_1)) \cdot \cos(\theta_1))]^3 \text{ soit } F_1 \cong 5$$

- La longueur relative du ressaut est $L_j/h_1 \cong 28,43$, ainsi $L_j=341,2$ cm.
- La longueur relative du rouleau du surface est $L_r/h_1 \cong 28,20$ donc $L_r=338,41$ cm.
- Le rapport des hauteurs conjuguées expérimental du ressaut est : $Y = ((-23,57 \cdot \varepsilon/D + 1,37)) \cdot F_1 \cong 3,35$ par conséquent $h_2 \cong 40,21$ cm.
- Selon l'approche semi théorique $Y=1,38 \cdot F_1^{0,76} (1-18,14 \cdot \varepsilon/D)^{0,38} \cong 3,46$ donc $h_2=41,73$ cm
- Ecart relatif entre Y_{exp} et Y théorique : $\Delta Y/Y \cong 3,61\%$.

V.5. CONCLUSION

Nous avons abordé dans ce chapitre une étude semi-théorique et une étude expérimentale.

Pour l'étude théorique on a tenté de trouver une relation approchée en remplacement à la relation semi théorique très implicite en Y . Celle-ci permet de trouver le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient C_r de résistance du fond du canal profilé en "U" et du nombre de Froude F_1 incident de l'écoulement. D'autre part, nous avons pu évaluer la relation liant le coefficient C_r de résistance à la rugosité équivalente ε/D et l'expression semi théorique $f(Y, F_1, C_r)$ devient de la forme $f(Y, F_1, \varepsilon/D)$.

Pour l'étude expérimentale on a entamé l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal profilé en "U" à fond rugueux. Cinq rugosités équivalentes ont alors été testées : $\varepsilon=3,55$ mm ; $\varepsilon=4,50$ mm ; $\varepsilon=5,63$ mm ; $\varepsilon=7,14$ mm et $\varepsilon=9,11$ mm. Pour chacune des rugosités équivalentes étudiées, l'expérimentation a été menée sous quatre ouvertures de hauteurs : $2,3\text{cm} \leq h_1 \leq 6,1\text{cm}$ avec plusieurs seuils minces. Une large gamme de débit et nombre de Froude a été ainsi obtenue.

Dans tous nos essais, les débits volumiques Q sont mesurés directement par un débitmètre à affichage numérique.

Dans un premier temps nous sommes intéressés à la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction de nombre de Froude F_1 incident pour quatre valeurs de rugosité. On remarque quatre nuages de points différents correspond chacun à une valeurs bien déterminée de la rugosité. Par ailleurs, la longueur relative L_j/h_1 augmente avec l'accroissement de nombre de Froude et réduit avec l'augmentation de la rugosité imposée.

D'autre part, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal profilé en "U" à fond rugueux, montre qu'un ajustement de type puissance est possible entre L_j/h_1 et F_1 .

En plus, nous avons aussi analysé expérimentalement les mesures des longueurs relatives du rouleau L_r/h_1 de surface en fonction du nombre de Froude F_1 incident de l'écoulement, ainsi cette analyse nous a permis d'obtenir une relation de type puissance entre la longueur relative du rouleau et du nombre de Froude de l'écoulement.

Dans un second temps, nous avons analysé la variation du rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 du ressaut en fonction de nombre de Froude F_1 incident pour quatre valeurs différentes de rugosité : $\varepsilon= 4,3\text{mm}$; $\varepsilon=5,63\text{mm}$; $\varepsilon= 7,14\text{mm}$ et $\varepsilon=9,11\text{mm}$. Quatre nuages de points distincts, correspond chacun à une rugosité bien déterminée. Par ailleurs, le rapport des hauteurs conjuguées augmente proportionnellement avec le nombre de Froude incident et démunie avec l'augmentation de la rugosité imposée.

En plus, l'ajustement statistique des points de mesures du ressaut contrôlé à fond rugueux, de type linéaire, a permis d'aboutir, avec une assez bonne corrélation, à une équation de type linéaire liant Y , F_1 et ε/D .

Aussi, l'étude expérimentale s'est intéressée à la dissipation d'énergie cinétique. Celle-ci étant représentée par le rendement. En conséquence, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que le ressaut dans un canal profilé en "U" à fond rugueux dissipe mieux l'énergie quand la rugosité augmente.

Le dernier volet de cette étude expérimentale a abordé le profil généralisé du ressaut. En effet, pour trois rugosités équivalentes $\varepsilon=0,00\text{mm}$; $\varepsilon=3,55\text{mm}$ et $\varepsilon= 4,30\text{mm}$, 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 l'augmentation de la rugosité équivalente ce qui montre l'effet de la réduction des profondeurs et la compacité du ressaut.

A travers cette partie bibliographique, nous avons essayé de présenter les travaux les plus importants, au regard de notre thèse, relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans les canaux prismatiques, à fond lisse et rugueux.

Le premier chapitre a été consacré à l'étude de deux approches de ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire :

- ✓ les travaux de HAGER et WANOSCHEK (1987) relatif au ressaut classique triangulaire évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° .
- ✓ les travaux de ACHOUR et DEBABECHE (2003), concernant le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° .

La première approche relative à l'étude expérimentale de HAGER et WANOSCHEK (1987) qui a consisté à extrapoler les résultats issus d'un profil semi triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° . L'étude s'est intéressée principalement aux longueurs caractéristiques du ressaut et aux profils de surface. D'un point de vue théorique, l'extrapolation pourrait être acceptée, mais d'un point de vue pratique elle le paraît moins, eu regard l'aspect spatial tridimensionnel du ressaut triangulaire symétrique. En effet, la présence d'une paroi verticale, telle que celle du profil semi triangulaire, modifierait le comportement et par suite les caractéristiques du ressaut. L'étude montre que les rapports Y expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs à ceux calculés par l'équation de la quantité de mouvement. Ce décalage est dû sans doute à l'effet des frottements sur les parois du canal et l'auteur a tenu compte de ceci en transformant l'équation de la quantité de mouvement.

En outre, les auteurs ont proposé une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut L_r/h_2 et L_j/h_2 , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de la cotangente d'inclinaison des parois du canal m . L'étude a examinée enfin, le profil de surface généralisé du ressaut. Une équation du profil de surface généralisé le long de l'axe du canal a été proposée.

La seconde approche examinée dans cette partie bibliographique est celle de ACHOUR et DEBABECHE (2003), consacrée à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° . Le ressaut est contrôlé de telle sorte que sa longueur L_j soit approximativement égale à la longueur du bassin, délimité à l'amont par le pied du ressaut et à l'aval par le seuil. L'expérimentation a eu pour but de corrélérer les différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. L'étude de

Achour et Debabeche (2003) montre que ces paramètres sont en nombre de cinq, et pouvant former trois produits adimensionnels $S=s/h_1$, F_1 et x/h_1 . L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a pu mener à l'établissement de relations simples à l'utilisation, liant ces trois variables adimensionnelles.

Le deuxième chapitre de la partie bibliographique a permis de mettre en **exergue** les travaux les plus importants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en "U". Deux études ont été alors abordées.

✓ La première étude étant celle de HAGER (1987) et son complément (1989). En effet, il a été trouvé, 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. L'auteur a montré que la longueur relative du ressaut hydraulique est $L_j/h_2=6\pm 1$. Beaucoup de zones d'écoulement sont décrites et les distributions des vitesses axiales sont montrées. Pour y_1 grand, l'écoulement est assimilable à un ressaut évoluant dans un canal rectangulaire.

✓ La seconde étude, relative au ressaut évoluant dans un canal profilé en "U" et examinée dans cette première partie, étant celle de Debabeche et Achour (2000). Celle-ci a été consacrée à l'évaluation par voie 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 allures de points distincts, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la hauteur relative y_1 ont été obtenues. A l'exception d'un léger décalage, qui est peut-être dû à la négligence des forces de frottement par la relation théorique de HAGER (1987). Les mesures expérimentales vérifient bien les courbes théoriques de HAGER (1987). 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 F_1 . Debabeche et Achour (2000) ont trouvé sept nuages de points différents 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, contrairement à la valeur 6 trouvée par Hager (1987) pour tout le nuage de points. Pour Debabeche et Achour (2000) cette valeur du rapport L_j/h_2 a été atteinte uniquement pour la configuration de 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 déduite de cette dernière. L'analyse des mesures expérimentales a aussi 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 .

Le troisième et dernier chapitre de la partie bibliographique a traité le ressaut hydraulique évoluant dans un canal à fond rugueux. Les études les plus connues dans ce contexte sont certainement celle de Rajaratnam de 1986 et de 2002 relatives, respectivement, au ressaut évoluant dans un canal rectangulaire à fond rugueux et au ressaut évoluant dans un canal rectangulaire à fond ondulé. Pour le cas du ressaut formé sur un lit rugueux, le rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 est fonction du nombre de Froude incident F_1 et de la rugosité relative ε/h_1 . Il a été trouvé que la longueur du ressaut à fond rugueux est environ la moitié à son homologue à fond lisse, correspond pour des rugosités relatives supérieures à 0,10. Idem pour le cas du ressaut hydraulique à fond ondulé qui a montré également de bonnes performances vis-à-vis de la réduction de la profondeur aval du ressaut.

CONCLUSION GENERALE

Notre thèse de doctorat a été consacré à l'étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil continu, dans deux profils de canaux prismatiques à parois rugueuses : le canal triangulaire et le canal profilé en "U". Le manuscrit est divisé en deux parties : une première partie bibliographique et une seconde partie ayant concerné notre propre contribution.

La première partie a été divisée en trois chapitres :

A travers le premier chapitre nous avons abordé deux configurations du ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section triangulaire, il s'agit du ressaut triangulaire classique de type A et le ressaut triangulaire contrôlé par seuil. Pour la première configuration nous avons examiné l'étude expérimentale de Hager et Wanoschek (1987) qui a extrapolé les résultats issus d'un profil semi triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° . L'étude a concerné les longueurs caractéristiques du ressaut et les profils de surface. L'étude montre que les rapports Y expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs à ceux calculés par l'équation de la quantité de mouvement. Cette différence est attribuée à l'effet des frottements sur les parois du canal et l'équation de la quantité de mouvement est alors modifiée en tenant compte de ceux-ci. Hager et Wanoschek (1987) proposent une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut, en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois latérales. La répartition spatiale du ressaut est tridimensionnelle et la présence de la paroi verticale, telle que celle du profil semi triangulaire a contribué sans doute à modifier le comportement et les caractéristiques du ressaut.

Pour la deuxième configuration de ressaut nous avons présenté l'approche de Achour et Debabeche (2003) qui a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° . le ressaut est contrôlé de telle sorte que sa longueur L_j soit approximativement égale à la longueur du bassin, délimité à l'amont par le pied du ressaut et à l'aval par le seuil.

Le ressaut est créé sous différentes hauteurs initiales et à débit volumes variables; chaque série de mesures est toutefois effectuée pour une hauteur initiale constante.

L'écoulement incident est généré à la sortie d'un convergent, spécialement conçu, de hauteur géométrique égale à la hauteur initiale du ressaut. L'expérimentation a eu pour objectif de corrélérer les différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. L'étude de Achour et

Debabeche (2003) montre que ces paramètres sont en nombre de cinq, et pouvant former trois produits adimensionnels $S=s/h_1$, F_1 et x/h_1 ; S est la hauteur relative du seuil et x/h_1 sa position relative. L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a pu mener à l'établissement de relations simples à l'emploi, liant les trois variables adimensionnelles ci-dessus citées.

Dans le deuxième chapitre de la partie bibliographique nous avons traité les travaux les plus importants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en "U". Deux types de ressaut ont été étudiés. Il a été abordé en premier lieu 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 $L_j/h_2=6\pm 1$. En outre, Pour une petite profondeur relative y_1 , un fond de séparation distinct apparaît.

Ce chapitre a traité en second lieu le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince en canal profilé en "U". Une étude a été proposée, celle de Debabeche et Achour (2000).

Cette étude a été consacrée à l'évaluation 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 . A l'exception d'un léger décalage, qui est probablement dû à la négligence des forces de frottement par la relation théorique de HAGER (1987), les mesures expérimentales vérifient bien les courbes théoriques de HAGER (1987). Dans un second temps l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer la variation de la longueur relative L_j/h_2 du ressaut en fonction de nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. 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 F_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. La valeur 6 du rapport L_j/h_2 a été atteinte 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 . La dernière partie de cette étude expérimentale a eu pour objet de décrire, le ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en "U".

Le dernier chapitre de la partie bibliographique a mis l'accent sur deux travaux de Rajaratnam, le premier en (1968) et le second en (2002) concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire respectivement à fond rugueux et à fond ondulé. Pour la première approche une relation empirique liant le rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 , le nombre de Froude F_1 et de la rugosité relative ε / h_1 , a été trouvée. Il a été trouvé également que la longueur du ressaut est environ la moitié du ressaut lisse correspondent pour des rugosités relatives supérieures à 0,10 ; cela semble un avantage significatif du ressaut avec lit rugueux. Pour ce qui est de la seconde approche relative au ressaut hydraulique à fond ondulé, il a été montré également que la longueur du ressaut est relativement moindre par rapport à son homologue lisse.

La deuxième partie de notre travail a concerné notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique dans quelques profils de canaux prismatiques, par la voie théorique et expérimentale. Deux types de canaux sont étudiés : le canal triangulaire et le canal profilé en "U".

Cette partie a été divisée en deux chapitres : le premier chapitre a concerné l'étude du ressaut hydraulique en canal triangulaire à parois rugueuses d'un point de vue théorique et expérimentale. Le deuxième chapitre a traité l'étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique en canal profilé en "U" à fond rugueux.

Pour 'le ressaut triangulaire rugueux' l'étude théorique a abouti à une relation théorique, qui a fait l'objet d'analyse statistique afin d'aboutir à une relation approchée explicite en Y . Celle-ci permet 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 incident de

l'écoulement. En outre, l'étude a pu évaluer la relation liant le coefficient C_r de résistance et la rugosité absolue ε .

L'étude expérimentale a abordé l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses. Quatre rugosités équivalentes ont alors été testées comprises entre 4,53mm et 8,73mm. Pour chacune des rugosités équivalentes 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 de nombre de Froude a été ainsi obtenue. Dans un premier temps nous sommes intéressés à la variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1 incident pour quatre valeurs de rugosités. On a remarqué quatre nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la rugosité, montrant ainsi la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction de nombre de Froude F_1 incident. On a constaté que la longueur relative L_j/h_1 augmente avec l'augmentation de nombre de Froude et diminue avec l'augmentation de la rugosité équivalente. Par ailleurs, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal triangulaire à parois rugueuses a montré qu'un ajustement de type linéaire est possible entre L_j/h_1 et F_1 .

Dans un second temps, nous avons analysé la variation du rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 incident pour cinq valeurs différentes de rugosités ε : 0,00mm ; 4,53mm ; 6,04mm ; 7,11mm et 8,73mm. Il ressort que le rapport des hauteurs conjuguées augmente avec l'augmentation du nombre de Froude et diminue avec l'augmentation de la rugosité des parois du canal. En outre, il a été trouvé que l'ajustement statistique des points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé à parois rugueuses est du type logarithmique. Une équation liant Y , F_1 et ε est obtenue avec une assez bonne corrélation. En outre, l'étude expérimentale s'est intéressée à la dissipation d'énergie cinétique. Celle-ci étant représentée par le rendement. En effet, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que le ressaut dans un canal 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. Ainsi, pour trois rugosités équivalentes $\varepsilon=6,04\text{mm}$; $\varepsilon=7,11\text{mm}$ 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 l'augmentation de la rugosité équivalente ce qui montre clairement l'effet de la réduction de la profondeur de l'écoulement.

Le dernier chapitre de notre thèse de doctorat a concerné l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en "U" à fond rugueux, également d'un point de vue théorique et expérimentale. Pour l'étude théorique on a trouvé une relation approchée explicite en remplacement à la relation semi théorique très implicite en (y_2, y_1) , préalablement trouvée. Celle-ci permet de trouver le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient C_r de résistance du fond demi circulaire du canal profilé en "U" et du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. D'autre part, nous avons pu évaluer la relation liant le coefficient C_r de résistance et la rugosité relative ε/D , et l'expression semi théorique $f(y_1, y_2, F_1, C_r)$ devient de la forme $f(Y, F_1, \varepsilon/D)$.

A travers l'étude expérimentale du dernier chapitre on a analysé expérimentalement le ressaut hydraulique dans un canal profilé en "U" à fond rugueux. Cinq rugosités équivalentes ont alors été expérimentées : 3,55mm ; $\varepsilon=4,50$ mm ; $\varepsilon =5,63$ mm ; $\varepsilon=7,14$ mm et $\varepsilon =9,11$ mm. Pour chacune des rugosités équivalentes étudiées, l'expérimentation a été menée sous quatre ouvertures de hauteurs et une large gamme de débit et de nombre de Froude.

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction de nombre de Froude F_1 incident pour quatre valeurs de rugosité testées. On a remarqué quatre nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la rugosité, montrant ainsi l'influence de la rugosité sur la relation longueur relative L_j/h_1 du ressaut et nombre de Froude F_1 incident. Il ressort que la longueur relative L_j/h_1 augmente avec l'augmentation du nombre de Froude F_1 .

Par ailleurs, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal profilé en "U" à fond rugueux a montré qu'un ajustement de type puissance est possible entre L_j/h_1 et F_1 . Par ailleurs, on a analysé les mesures expérimentales de la longueur relative du rouleau L_r/h_1 de surface en fonction du nombre de Froude F_1 incident pour différentes rugosités relatives ε/D . Un ajustement de type puissance a été également obtenu.

Par ailleurs, nous avons analysé la variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 incident pour quatre valeurs différentes de rugosité, il ressort que le rapport des hauteurs conjuguées augmente avec l'augmentation du nombre de Froude incident. L'effet réducteur de la rugosité aux profondeurs de l'écoulement est nettement remarqué. En outre, l'ajustement statistique de type linéaire des points de mesures du ressaut contrôlé à fond rugueux, a permis d'aboutir, avec une bonne corrélation, à une équation de type linéaire liant Y , F_1 et ε/D . L'étude expérimentale s'est intéressée aussi 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 hydraulique dans un canal profilé en " U " à fond rugueux 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 trois rugosités équivalentes expérimentées : $\varepsilon=0,00\text{mm}$; $\varepsilon=3,55\text{mm}$ et $\varepsilon= 4,30\text{mm}$, 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 l'augmentation de la rugosité équivalente. Par conséquent, l'effet de la compacité du ressaut et de la réduction de la profondeur de l'écoulement est observé.

INTRODUCTION GENERALE

Pour dissiper l'énergie cinétique provoquée par un écoulement torrentiel à l'aval d'un ouvrage hydraulique, il est nécessaire de disposer un bassin de dissipation. En effet, la dissipation d'énergie par ressaut hydraulique s'avère le moyen le plus pratique et le moins onéreux. Ce phénomène hydraulique est obtenu par la mise en place d'un obstacle en travers de l'écoulement. Différentes configurations de ressaut peuvent être obtenues suite aux modifications des conditions d'écoulement à l'amont et/ou à l'aval (Debabeche, 2003).

Le ressaut est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente faible ou nulle, sans obstacle à l'aval (Hager, Bremen et Kawogoshi, 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 et Bretz, 1988). Il est dit forcé lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle (Rand, 1957; Bretz, 1988). L'obstacle (ou seuil) a pour rôle de provoquer la formation du ressaut et de contrôler sa position.

Les recherches entreprises sur le ressaut hydraulique ont pour but, en règle générale, d'évaluer les caractéristiques géométriques de celui-ci, telles que : les profondeurs initiales et finale, le nombre de Froude de l'écoulement incident, et les longueurs de ressaut et de rouleau. Quelques chercheurs se sont intéressés également à la distribution des vitesses et des pressions à l'intérieur du ressaut hydraulique.

Le ressaut hydraulique peut évoluer dans des canaux prismatiques ou non prismatiques, à parois lisses ou rugueuses (Silvester, 1964; Rand, 1965; Murahari, 1971; Subramanya, 1968; Peterka, 1958; Long, 1900,...).

Pour notre cas il s'agit de l'étude du ressaut contrôlé par seuil mince dans deux types de canaux prismatiques à fond rugueux, à savoir le canal triangulaire et le canal profilé en "U". Le sujet a été abordé d'un point de vue théorique et expérimentale. Cette recherche fondamentale n'a jamais fait l'objet d'études antérieures.

Notre thèse est divisée en deux grandes parties :

- Une première partie bibliographique ayant pour objectif principal, de passer en revue les travaux les plus intéressants, qui ont abordé le ressaut hydraulique d'une manière générale et le ressaut à fond rugueux en particulier. Ce volet se propose d'examiner en premier lieu les travaux de HAGER et WANOSCHEK (1987) concernant le ressaut triangulaire de type A évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90°. Il sera question en second lieu d'aborder l'approche de ACHOUR et DEBABECHE (2003), qui a été

consacrée à l'étude expérimentale du ressaut 'triangulaire', contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince. Ensuite, le ressaut hydraulique classique en canal profilé en "U", où on va évoquer l'approche de HAGER (1987 et 1989) relative au ressaut hydraulique classique. L'étude de DEBABECHE et ACHOUR (2000) ayant trait au ressaut contrôlé par seuil en canal profilé en "U", sera entamée par la suite. Nous aborderons enfin, les travaux de Rajaratnam (1968) et Rajaratnam (2002) relatifs au ressaut hydraulique en canal rectangulaire respectivement à fond rugueux et à fond ondulé. Il est nécessaire de noter qu'à l'exception des travaux de Rajaratnam le ressaut hydraulique dans les canaux à fond rugueux n'a pas reçu une attention particulière. Cependant, le canal triangulaire et son homologue profilé en "U" à fond rugueux n'ont jamais fait l'objet d'étude de ce genre. C'est dans le but de combler cette lacune que notre étude a été proposée.

- Une seconde partie à travers laquelle il sera effectué une analyse théorique et expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans deux canaux prismatiques à parois rugueuses: le canal triangulaire et le canal profilé en "U". Des relations fonctionnelles, en termes adimensionnels, liant les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'effet de la rugosité des parois, seront proposées.

Introduction à 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 dans trois canaux prismatiques: le canal triangulaire, le canal profilé en “ U ” et le canal rectangulaire.

Cette partie bibliographique est divisée en trois chapitres.

Le premier chapitre aura pour objectif d'examiner les travaux les plus importants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire. Deux types de ressaut seront alors cités:

- Le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons des travaux de HAGER et WANOSCHEK (1987) concernant le ressaut "triangulaire" du type A évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° .
- Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° , où il sera question de l'approche de DEBABECHE et ACHOUR (2003), relative à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

Le second chapitre de cette partie sera consacré aux travaux les plus importants concernant le ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en “U”.

Deux types de ressaut seront alors étudiés:

- l'approche de HAGER de 1987 et son complément de 1989.
- l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince en canal profilé en “U”. Dans ce contexte une approche a été proposée, l'approche de Debabeche et Achour (2000) , liée au ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince en canal profilé en “U”.

Le troisième et dernier chapitre de l'étude bibliographique évoquera les deux approches de Rajaratnam (1968)et (2002), traitant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à fond rugueux et ondulé.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

PREMIERE PARTIE

INTRODUCTION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE 1

Chapitre I

I. RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRIANGULAIRE

I.1. INTRODUCTION.....	2
I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE.....	2
I.2.1. Forme du ressaut classique.....	3
a. Le pré – ressaut.....	3
b. Ressaut de transition	4
c. Ressaut stable.....	4
d. Ressaut agité ou clapoteux	4
I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	5
I.2.2.1. Longueurs caractéristique du ressaut.....	5
I.2.2.2. Longueur du rouleau	5
I.2.3. Approche de Hager et Wanoschek.....	6
I.2.4. Analyse des résultats.....	7
I.2.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées	7
I.2.4.2. Equation de quantité de mouvement.....	9
I.2.4.3. Longueur caractéristique du ressaut	12
I.2.4.4. Profil de surface généralisé du ressaut	14
I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL MINCE DANS UN CANAL TRIANGULAIRE.....	15
I.3.1. Approche de Achour et Debabeche (2003).....	15
I.3.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	16
I.3.1.2. Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude.....	17
I.3.1.3. Relation générale régissant le contrôle du ressaut.....	18
I.3.1.4. Conclusion	19

Chapitre II

II. RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL PROFILE EN “U”

II.1. Introduction	21
II.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE EN CANAL PROFILE EN “U”	21
II.2.1. Approche de Hager (1987 et 1989).....	22
II.2.1.1. Analyse théorique.....	22
II.2.1.2. Hauteurs relatives du ressaut.....	24
II.2.1.3. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	25
II.2.1.4. Profils de surface du ressaut.....	26
II.2.1.5. Description du ressaut.....	26
II.3. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE EN CANAL PROFILE EN “U”	27
II.3.1. Approche de Debabeche et Achour(2000).....	27
II.3.1.1. Hauteur relative du ressaut.....	27
II.3.1.2. Longueur relative du ressaut.....	29

II.3.1.3. Hauteur relative du seuil.....	30
II.3.1.3.1. Variation de la hauteur relative aval en fonction de la hauteur relative du seuil.....	30
II.3.1.3.2. Variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude incident....	32
II.3.1.4. Variation de la hauteur relative aval du ressaut en fonction de la position relative du seuil	32
II.3.1.5. Rendement du ressaut.....	33
II.3.1.6. Profil de surface généralisé du ressaut.....	35
II.3.1.7. Conclusion.....	36

Chapitre III

III. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

III.1. Introduction	38
III.2. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A FOND RUGUEUX.....	38
III.2.1. Approche de Rajaranatnam (1968)	38
III.2.1.1. Description des essais.....	38
III.2.1.2. Analyse des résultats	38
III.2.1.2.1. Hauteur finale h_2	38
III.2.1.2.2. Longueur caractéristique.....	42
III.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A FOND ONDULE.....	42
III.3.1. Approche de Rajaranatnam (2002).....	42
III.3.1.1. Description des essais.....	42
III.3.1.2. Résultats expérimentaux	43
III.4. Conclusion	46

DEUXIEME PARTIE

Chapitre IV

IV. RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRIANGULAIRE A PAROIS RUGUEUSES.

IV.1. Introduction	52
IV.2. Analyse théorique.....	52
IV.3. Analyse expérimentale de L'équation semi Théorique	57
IV.3.1. Introduction.....	57
IV.3.2. Variation du coefficient C_r de résistance en fonction de la rugosité absolue ε	57
IV.3.3. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient C_r de résistance et du nombre de Froude	59
IV.4. Etude expérimentale.....	60
IV.4.1. Protocole expérimental	61
IV.4.2. Appareillages de mesure	63
IV.4.2.1. Débitmètre à Diaphragme	63
IV.4.2.2. Limnimètre.....	63
IV.4.2.3. tamiseuse.....	64
IV.4.2.4. Palmer	64
IV.4.3. Description des essais.....	65
IV.4.3.1. Etalonnage du Diaphragme.....	65

IV.4.3.2. Procédure expérimentale des essais.....	67
IV.4.3.3. Mode de préparation de la rugosité utilisée.....	68
IV.4.4. Résultats expérimentaux.....	70
IV.4.4.1. Longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1	70
IV.4.4.2. Longueur relative L_j/h_2 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1	74
IV.4.4.3. Rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1	74
IV.4.4.4. Rendement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses.....	79
IV.4.4.5. Profil de surface généralisé du ressaut	80
IV.4.4.6. Exemple d'application	82
IV.5. Conclusion	82

Chapitre V

V. RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL PROFILE EN "U" A FOND RUGUEUX

V.1. Introduction	84
V.2. Analyse Théorique.....	84
V.3. Analyse Expérimentale de L'équation Semi Théorique	89
V.3.1. Variation du coefficient C_r de résistance en fonction de la rugosité relative ε/D	89
V.3.2. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient C_r de résistance et du nombre de Froude F_1	92
V.4. Etude expérimentale.....	95
V.4.1. Description du modèle	96
V.4.2. Appareillages de mesure	98
V.4.2.1. Débitmètre électromagnétique	98
V.4.2.2. Limnimètre.....	100
V.4.2.3. Tamiseuse.....	100
V.4.2.4. Palmer.....	100
V.4.3. Description des essais.....	101
V.4.3.1. Procédure expérimentale des essais.....	101
V.4.3.2. Mode de préparation de la rugosité utilisée.....	103
V.4.4. Résultats expérimentaux.....	104
V.4.4.1. Longueur relative de ressaut L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	104
V.4.4.2. Longueur relative de rouleau L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	108
V.4.4.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y en fonction du nombre de Froude F_1	111
V.4.4.4. Rendement du ressaut hydraulique dans un canal en "U" à fond rugueux.....	114
V.4.4.5. Profil de surface généralisé du ressaut	116
V.4.4.6. Exemple d'application	117
V.5. Conclusion.....	117
CONCLUSION GENERALE	122
PRINCIPALES NOTATIONS	128
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	130
ANNEXES	134



Ghomri Ali

ملخص:

تهدف هذه الأطروحة إلى التحليل النظري و التجريبي للقفزة المائية داخل القنوات من الشكل المثلثي و الشكل من نوع U. تبحث هذه الدراسة عن تأثير الخشونة على خصائص القفزة المائية. التحليل النظري المدعوم بالمعطيات التجريبية الخاصة للقناتين الخاضعتين للتجربة، سمح بإيجاد علاقات نظرية على التوالي : $f(Y, F_1, Cr) = 0$, $f(y_1, y_2, F_1, Cr) = 0$. كان من الضروري إجراء تحليل تجريبي لهاتين الدالتين للحصول على العلاقة التي تربط الخشونة المطلقة وعامل الخشونة، بالإضافة إلى ذلك، تم الحصول على العديد من العلاقات التجريبية تمكن من تحديد أبعاد حوض التهئة لنموذجي القفزة المائية.

الكلمات الرئيسية : القفزة الهيدروليكية ، قناة مثلثية الشكل ، قناة على شكل U، خشونة القعر، قنوات مفتوحة ، حوض التهئة .

Résumé:

Cette présente thèse a pour but d'analyser, d'un point de vue théorique et expérimental, le ressaut hydraulique dans les canaux de forme triangulaire et profilé en "U". L'étude examine l'effet de la rugosité du fond sur les caractéristiques du ressaut. A travers une analyse théorique, soutenue par des données expérimentales, il a été possible d'obtenir pour les deux types de canaux, triangulaire et profilé en "U", les relations théoriques respectivement $f(Y, F_1, Cr) = 0$ et $f(y_1, y_2, F_1, Cr) = 0$. Il a été nécessaire de procéder à une analyse expérimentale de ces deux expressions pour évaluer la relation qui lie le paramètre de rugosité à la rugosité absolue. En outre, plusieurs relations empiriques ont été obtenues, permettant le dimensionnement du bassin de dissipation pour les deux configurations de ressaut.

Mots clés: Ressaut hydraulique, canal triangulaire, canal profilé en "U", rugosité du fond, canaux à ciel ouvert, bassin de dissipation

Abstract:

This present thesis aims to analyze, from both a theoretical and experimental point of view, the hydraulic jump in both a triangular and an U shaped channel. The study investigates the effect of the bottom roughness on the jump features. From a theoretical analysis, supported by experimental data, it has been possible to obtain for both types of channels, triangular and U shaped, the theoretical relations, respectively $f(Y, F_1, Cr) = 0$ and $f(y_1, y_2, F_1, Cr) = 0$. It was necessary to proceed with an experimental analysis of these two functions to evaluate the relationships which binds the roughness parameter to the absolute roughness. Furthermore, several empirical relations were obtained, allowing the sizing of the stilling basin for both configurations of jump

Keywords: Hydraulic jump, triangular channel, U shaped channel, bottom roughness, open channel, stilling basin.

Tableau A1 : Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 4,53\text{mm}$

h_1 (cm)	Δh (cm)	Q (l/s)	F_1	h_2 (cm)	Y	L_j/h_1
1,80	0,4	0,59	6,17	5,608	3,12	15,28
	0,9	0,89	9,21	7,836	4,35	23,56
	1,2	1,02	10,61	8,038	4,47	26,72
	1,8	0,59	6,17	6,674	3,71	15,28
	2,3	0,89	9,21	7,538	4,19	23,56
	3,9	1,25	12,97	9,614	5,34	31,39
	4,6	1,41	14,64	14,64	5,82	34,28
2,50	2,3	1,41	6,44	8,122	3,25	18,84
	3,8	1,81	8,25	9,68	3,87	23,76
	4,8	2,03	9,27	10,515	4,21	26,44
	5,1	2,09	9,55	10,742	4,30	27,12
	6,7	2,39	10,93	11,822	4,73	30,52
	8,2	2,64	12,07	12,692	5,08	33,28
	10,4	2,97	13,58	13,398	5,36	35,44
	11,9	3,18	14,52	14,463	5,79	38,76
	12,4	3,24	14,81	14,674	5,87	39,20
	13,9	3,43	15,67	15,074	6,03	40,64
	15,5	3,62	16,54	15,968	6,39	43,40
3,40	6,2	2,30	4,88	7,56	2,22	3,09
	8,9	2,75	5,83	8,052	2,37	4,35
	11,3	3,10	6,56	9,226	2,71	7,26
	16,7	3,76	7,96	11,862	3,49	13,65
	21,2	4,23	8,95	11,98	3,52	13,91
	27,5	4,81	10,18	13,272	3,90	17,00
	30,2	5,03	10,66	14,78	4,35	20,56
	39,7	5,76	12,21	15,318	4,51	21,79
	47,6	6,30	13,35	16,54	4,86	24,65
	64,7	7,34	15,54	19,662	5,78	31,88

Tableau A1 (suite et fin) : Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 4,53\text{mm}$

$h_1(\text{cm})$	$\Delta h(\text{cm})$	$Q(\text{l/s})$	F_1	$h_2(\text{cm})$	Y	L_j/h_1
4,00	24,4	4,53	6,39	13,112	3,28	14,45
	37,9	5,63	7,95	15,484	3,87	15,83
	41,6	5,90	8,32	15,99	4,00	16,78
	56,1	6,84	9,65	17,816	4,45	20,10
	60,3	7,09	10,00	18,16	4,54	20,73
	64,7	7,34	10,35	18,614	4,65	21,55
	72,4	7,76	10,95	19,238	4,81	22,68
	90,1	8,64	12,20	20,848	5,21	25,53
	98,4	9,03	12,74	21,494	5,37	26,78
	121,8	10,03	14,16	23,192	5,80	29,83
4,40	27,3	4,79	5,33	10,516	2,39	6,73
	36,1	5,50	6,11	13,738	3,12	12,41
	43,7	4,79	5,33	12,702	2,89	10,36
	52,4	5,50	6,11	14,286	3,25	19,45
	68,9	6,04	6,72	15,624	3,55	15,77
	85,2	6,61	7,35	16,248	3,69	16,91
	102,5	8,41	9,35	18,468	4,20	21,50
	132,9	8,81	9,79	20,468	4,65	24,57
	164,9	9,21	10,24	22,644	5,15	28,45
	189,2	10,47	11,65	24,322	5,53	31,45
5,00	49,8	6,45	5,21	17,908	3,58	8,52
	62,4	7,21	5,82	15,12	3,02	10,68
	98,7	9,04	7,30	17,734	3,55	14,78
	123,2	10,09	8,15	18,252	3,65	15,62
	154,4	11,28	9,11	20,494	4,10	19,22
	170,3	11,84	9,56	21,108	4,22	20,2
	192,4	12,58	10,16	22,75	4,55	22,82
	223,6	13,55	10,94	23,678	4,74	24,34
	255,1	14,46	11,68	24,084	4,82	24,86

Tableau A2: Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 6,04\text{mm}$

h_1 (cm)	Δh (cm)	Q (l/s)	F_1	h_2 (cm)	Y	L_j/h_1
2,50	3,6	1,76	8,04	8,79	3,52	17,84
	4,2	1,90	8,67	9,266	3,71	19,28
	7,9	2,59	11,85	11,34	4,54	24,88
	9,4	2,83	12,92	11,152	4,46	24,36
	12,6	3,27	14,93	12,342	4,94	27,44
	14,1	3,45	15,79	12,966	5,19	29,24
	17,3	3,82	17,46	13,782	5,51	31,4
	20,4	4,15	18,95	14,482	5,79	33,28
	23,8	4,48	20,45	15,176	6,07	35,12
	26,3	4,70	21,48	15,648	6,26	36,36
	28,2	4,87	22,24	15,986	6,39	37,24
2,80	4,6	1,99	5,75	5,176	1,73	10,50
	9,7	2,87	8,32	8,802	2,93	15,57
	12,9	3,31	9,58	9,734	3,24	17,80
	14,5	3,50	10,15	10,294	3,43	18,97
	16,3	3,71	10,75	10,926	3,64	21,07
	20,8	4,19	12,13	11,886	3,96	23,17
	23,4	4,44	12,85	12,016	4,01	24,70
	31,7	5,16	14,94	13,198	4,40	23,73
	36,3	5,51	15,97	13,966	4,66	25,63
	3,4	7,8	2,58	4,73	6,354	1,77
8,1		2,63	4,82	7,912	2,2	9,67
13,5		3,38	6,21	8,502	2,36	11,5
16,9		3,78	6,94	8,906	2,47	12,14
19,6		4,07	7,47	9,898	2,75	13,72
23,5		4,45	8,17	10,336	2,87	26,14
28,7		4,91	9,01	11,086	3,08	17,44
33,9		5,33	9,79	11,502	3,2	18,78
37,2		5,58	10,25	12,346	3,43	20,75
48,3		6,35	11,66	13,116	3,64	21,97
52,4		6,61	12,14	13,698	3,81	22,97

Tableau A2 (suite et fin): Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 6,04\text{mm}$

h_1 (cm)	Δh (cm)	Q (l/s)	F_1	h_2 (cm)	Y	L_j/h_1
4,00	20,6	4,17	5,88	10,054	2,51	7,65
	27,4	4,80	6,77	11,716	2,93	9,45
	32,4	5,21	7,36	13,266	3,32	10,37
	39,7	5,76	8,13	13,37	3,34	11,97
	44,5	6,10	8,60	13,52	3,38	12,85
	51,3	6,54	9,23	13,788	3,45	14,07
	58,9	7,00	9,88	14,97	3,74	14,92
	63,1	7,25	10,23	15,026	3,76	15,47
	74,6	7,87	11,11	16,438	4,11	16,9
	80,2	8,16	11,51	16,752	4,19	17,55
	96,5	8,94	12,62	18,837	4,71	19,25
$\varepsilon = 6,04\text{mm}$						
4,40	22,9	4,39	4,88	8,38	1,90	6,75
	28,3	4,88	5,42	9,03	2,05	7,80
	33,1	4,39	4,88	8,19	1,86	6,77
	40,7	4,88	5,42	9,03	2,05	7,82
	44,2	5,27	5,86	9,55	2,17	8,66
	53,6	5,83	6,49	10,26	2,33	9,91
	69,5	6,08	6,76	10,97	2,49	10,27
	76,4	6,69	7,43	11,31	2,57	11,43
	79,2	7,60	8,45	12,58	2,86	13,14
		83,8	7,97	8,86	12,80	2,91
$\varepsilon = 6,04\text{mm}$						
5,00	34,2	5,35	4,12	10,726	2,10	5,96
	38,3	5,66	4,35	11,598	2,27	7,37
	45,8	6,19	4,75	13,524	2,65	9,78
	43,2	6,01	4,62	12,394	2,43	8,27
	90,2	8,65	6,65	13,254	2,60	9,37
	74,2	7,85	6,04	14,48	2,84	10,43
	107,8	9,44	7,26	15,082	2,96	12,69
	119,2	9,93	7,63	15,558	3,05	13,20
	133,5	10,50	8,07	16,109	3,16	12,04
	146,4	10,99	8,45	16,568	3,25	14,63
	197,3	12,73	9,79	18,176	3,56	15,94

Tableau A3 : Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 7,11\text{mm}$

h_1 (cm)	Δh (cm)	Q (l/s)	F_1	h_2 (cm)	Y	L_j/h_1
2,50	4,3	1,92	8,78	6,152	2,46	12,64
	6,1	2,28	10,43	7,036	2,81	15,16
	7,7	2,56	11,70	7,98	3,19	16,84
	10,2	2,94	13,45	8,808	3,52	19,28
	13,4	3,37	15,39	9,694	3,88	22,12
	14,8	3,54	16,17	11,036	4,41	23,12
	16,6	3,75	17,11	11,452	4,58	24,36
	19,3	4,03	18,44	11,018	4,41	26,04
	24,2	4,51	20,62	13,984	5,59	29,12
	26,9	4,75	21,72	14,364	5,75	29,76
2,80	3,6	1,76	5,55	6,098	2,10	10,83
	10,3	2,96	9,33	7,926	2,73	13,86
	13,1	3,33	10,50	8,76	3,02	16,00
	15,2	3,59	11,30	9,828	3,39	17,17
	18,6	3,96	12,49	10,932	3,77	19,07
	26,4	4,71	14,85	12,698	4,38	21,00
	32,7	5,24	16,51	13,264	4,57	24,62
	36,7	5,54	17,48	14,142	4,88	25,76
	42,4	5,95	18,77	15,282	5,27	27,28
	56,3	6,85	21,60	15,706	5,42	25,34
71,6	7,71	24,32	16,996	5,86	30,79	
3,40	5,7	2,21	4,68	4,354	1,28	8,71
	8,3	2,66	5,63	5,912	1,74	10,24
	9,5	2,84	6,02	6,502	1,91	12,18
	11,6	3,14	6,64	6,906	2,03	12,85
	15,3	3,60	7,62	7,898	2,32	14,53
	18,9	3,99	8,46	8,336	2,45	15,91
	21,5	4,26	9,02	9,086	2,67	18,47
	27,4	4,80	10,16	9,502	2,79	19,88
	30,9	5,09	10,79	10,346	3,04	21,97
	32,8	5,24	11,11	11,116	3,27	23,26

Tableau A3 (suite et fin) : Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 7,11\text{mm}$.

h_1 (cm)	Δh (cm)	Q (l/s)	F_1	h_2 (cm)	Y	L_j/h_1
4,00	18,4	3,94	5,56	8,526	2,13	7,90
	23,2	4,42	6,24	9,164	2,29	8,38
	30,9	5,09	7,18	10,028	2,51	10,03
	37,5	5,60	7,91	10,662	2,67	11,23
	42,3	5,95	8,39	11,082	2,77	12,03
	49,6	6,43	9,08	11,66	2,92	13,10
	56,2	6,84	9,66	12,138	3,03	14,03
	61,4	7,15	10,09	12,49	3,12	14,68
	72,8	7,78	10,98	13,198	3,30	16,08
	78,3	8,06	11,38	13,514	3,38	16,60
	93,7	8,81	12,43	14,394	3,60	18,23
4,40	23,6	4,46	4,96	9,628	2,19	7,18
	29,5	4,98	5,53	10,25	2,33	7,61
	35,3	5,44	6,05	10,788	2,45	9,11
	42,1	5,93	6,60	11,348	2,58	10,20
	46,7	6,25	6,94	11,694	2,66	10,93
	57,8	6,94	7,72	12,448	2,83	11,91
	72,3	7,75	8,62	13,302	3,02	12,75
	78,1	8,05	8,95	13,612	3,09	13,34
	83,7	8,33	9,27	13,798	3,14	14,61
	127,9	10,28	11,43	15,769	3,58	16,57
	23,6	4,46	4,96	9,628	2,19	7,18
5,00	36,8	5,55	4,27	8,076	1,62	5,66
	40,2	5,80	4,46	8,328	1,67	6,08
	49,5	6,43	4,94	8,96	1,79	6,44
	56,8	6,88	5,29	9,404	1,88	7,12
	73,6	7,82	6,01	10,298	2,06	8,58
	86,1	8,45	6,50	10,884	2,18	9,56
	102,5	9,21	7,08	11,57	2,31	10,46
	136,3	10,61	8,15	12,786	2,56	12,30
	167,2	11,73	9,02	13,738	2,75	13,74

Tableau A4 : Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 8,73\text{mm}$

h_1 (cm)	Δh (cm)	Q (l/s)	F_1	h_2 (cm)	Y	L_j/h_1
2,50	7,8	2,58	11,78	7,176	2,87	14,04
	11,3	3,10	14,15	8,348	3,34	16,96
	13,4	3,37	15,39	9,834	3,93	18,4
	15,6	3,63	16,59	9,796	3,92	19,76
	18,1	3,91	17,86	10,376	4,15	21,24
	20,4	4,15	18,95	10,778	4,31	22,36
	22,6	4,36	19,93	11,336	4,53	23,4
	25,9	4,67	21,32	11,432	4,57	24,88
	28,7	4,91	22,43	12,424	4,97	26,08
	31,8	5,16	23,60	12,828	5,13	27,32
2,80	7,9	2,59	8,93	7,318	2,61	10,29
	10,6	3,00	10,33	7,216	2,58	12,18
	13,4	3,37	11,59	7,626	2,72	13,82
	15,7	3,64	12,54	8,368	2,99	15,00
	18,9	3,99	13,74	8,518	3,04	16,46
	23,5	4,45	15,31	9,312	3,33	18,32
	29,1	4,94	17,01	10,246	3,66	20,25
	32,4	5,21	17,94	10,436	3,73	21,14
	37,2	5,58	19,21	11,158	3,99	22,64
	51,3	6,54	22,52	12,278	4,39	26,11
3,40	11,6	3,14	6,64	7,618	2,24	8,12
	14,9	3,55	7,52	8,496	2,50	8,56
	18,1	3,91	8,28	8,788	2,58	9,38
	22,4	4,34	9,20	9,362	2,75	10,65
	26,8	4,75	10,05	9,678	2,85	11,82
	28,5	4,89	10,36	10,464	3,08	12,24
	32,9	5,25	11,13	10,512	3,09	13,26
	42,1	5,93	12,57	10,836	3,19	15,06
	49,3	6,41	13,59	11,602	3,41	16,29
	54,8	6,76	14,32	12,436	3,66	17,15

Tableau A4 (suite et fin) : Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 8,73\text{mm}$

h_1 (cm)	Δh (cm)	Q (l/s)	F_1	h_2 (cm)	Y	L_j/h_1
4,00	22,3	4,33	6,11	9,008	2,25	6,13
	26,5	4,72	6,66	9,446	2,36	6,98
	35,8	5,48	7,73	10,274	2,57	8,58
	40,4	5,81	8,20	10,634	2,66	9,28
	51,2	6,54	9,22	11,382	2,85	10,70
	63,6	7,28	10,27	12,124	3,03	12,10
	71,8	7,73	10,90	12,564	3,14	12,93
	87,9	8,54	12,05	13,342	3,34	14,40
	96,3	8,93	12,60	13,712	3,43	15,08
	106,7	9,40	13,26	14,142	3,54	15,90
4,40	25,5	4,63	5,15	7,82	1,78	5,95
	32,4	5,21	5,80	8,42	1,91	6,52
	41,6	5,90	6,56	9,10	2,07	6,84
	49,8	6,45	7,17	9,63	2,19	7,77
	57,2	6,90	7,68	10,06	2,29	8,50
	70,1	7,63	8,49	10,74	2,44	9,68
	81,6	8,23	9,15	11,26	2,56	10,59
	94,3	8,84	9,83	11,80	2,68	11,52
	102,4	9,21	10,24	12,12	2,75	12,07
	125,6	10,19	11,32	12,94	2,94	13,48
5,00	41,2	5,87	4,74	8,312	1,66	3,84
	43,6	6,04	4,88	8,458	1,69	4,08
	50,1	6,47	5,22	8,832	1,77	4,68
	54,7	6,75	5,45	9,776	1,96	5,06
	70,5	7,66	6,18	9,83	1,97	6,24
	85,9	8,44	6,82	10,464	2,09	7,22
	99,1	9,06	7,32	10,952	2,19	7,98
	114,4	9,73	7,86	11,466	2,29	8,76
	128,7	10,31	8,33	11,908	2,38	9,44
	165,9	11,69	9,44	12,924	2,58	11,02

Tableau A5: Mesures expérimentales, ayant servi au traçage du rendement en fonction du nombre de Froude, pour le cas d'un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 4,53\text{mm}$

h_1 (cm)	$\eta\%$	F_1
1,8	74,64	6,17
	84,81	9,21
	87,28	10,61
	74,56	6,17
	84,78	9,21
	90,26	12,97
	91,70	14,64
2,5	76,02	6,44
	82,48	8,25
	84,90	9,27
	85,48	9,55
	87,81	10,93
	89,30	12,07
	90,81	13,58
	91,60	14,52
	91,82	14,81
	92,40	15,67
92,93	16,54	
2,8	79,21	7,33
	83,06	8,53
	84,63	9,20
	88,11	11,20
	90,73	13,53
	91,90	14,95
	93,30	17,30
	93,84	18,43
	94,08	19,06
94,66	20,56	

Tableau A5 (suite et fin): Mesures expérimentales, ayant servi au traçage du rendement en fonction du nombre de Froude, pour le cas d'un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 4,53\text{mm}$.

$h_1(\text{cm})$	$\eta(\%)$	F_1
3,4	64,08	4,88
	70,00	5,83
	74,97	6,56
	81,35	7,96
	83,56	8,95
	86,17	10,18
	87,29	10,66
	89,17	12,21
	90,43	13,35
92,29	15,54	
4	75,83	6,39
	81,65	7,95
	82,70	8,32
	85,70	9,65
	86,34	10
	86,94	10,35
	87,85	10,95
	89,45	12,2
	90,04	12,74
91,32	14,16	
4,4	5,33	67,9
	6,11	74,41
	6,72	76,27
	7,35	79,26
	8,42	82,54
	9,35	84,57
	9,79	85,5
	10,24	86,63
	11,65	88,69
	12,94	90,2
5	5,2	68,05
	5,82	72,82
	8,15	82,04
	9,11	84,54
	9,56	85,47
	10,16	86,61
	10,94	87,83
	11,68	88,79
11,86	89,05	

Tableau A6 : Mesures expérimentales, ayant servi au traçage du rendement en fonction du nombre de Froude, pour le cas d'un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 6,04\text{mm}$.

h_1 (cm)	$\eta\%$	F_1
2,5	81,59	8,04
	83,31	8,67
	88,84	11,85
	89,75	12,92
	91,54	14,93
	92,18	15,79
	93,21	17,46
	93,75	18,95
	94,36	20,45
	94,8	21,48
2,8	5,75	58,49
	8,32	80,47
	9,58	83,78
	10,15	85,13
	10,75	86,39
	12,13	88,4
	12,85	89,05
	14,94	90,97
	15,97	91,8
3,4	4,73	56,07
	4,82	63,54
	6,21	71,31
	6,94	74,44
	7,47	77,71
	8,17	79,86
	9,01	82,31
	9,79	83,87
	10,25	85,25
	11,66	87,29

Tableau A6 (suite et fin) : Mesures expérimentales, ayant servi au traçage du rendement en fonction du nombre de Froude, pour le cas d'un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 6,04\text{mm}$.

h_1 (cm)	$\eta\%$	F_1
4	5,88	45,09
	6,77	47,33
	7,32	48,65
	8,13	48,72
	8,6	48,81
	9,23	48,98
	9,88	49,59
	10,23	49,62
	11,11	50,14
11,51	50,24	
4,4	59,82	4,88
	64,71	5,42
	58,94	4,88
	64,71	5,42
	67,97	5,86
	71,87	6,49
	74,12	6,76
	76,41	7,43
	80,32	8,45
	81,25	8,86
5	4,12	57,57
	4,35	60,79
	4,75	65,38
	4,62	63,69
	6,65	74,58
	6,04	73,46
	7,26	78,17
	7,63	79,48
	8,07	80,86
8,45	81,92	

Tableau A7 : Mesures expérimentales, ayant servi ou traçage du rendement en fonction du nombre de Froude, pour le cas d'un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 7,1\text{mm}$.

h_1 (cm)	$\eta\%$	F_1
2,50	77,67	8,78
	82,52	10,43
	85,73	11,70
	88,18	13,45
	90,16	15,39
	91,56	16,17
	92,16	17,11
	92,30	18,44
	94,20	20,62
	94,56	21,72
2,80	65,93	5,55
	80,77	9,33
	83,86	10,50
	86,20	11,30
	88,28	12,49
	90,90	14,85
	91,92	16,51
	92,65	17,48
	93,45	18,77
	94,29	21,60
3,40	53,08	4,88
	59,09	5,22
	63,46	5,76
	70,52	6,61
	73,71	7,33
	76,80	7,81
	79,38	8,81
	81,74	9,35
	83,21	9,63
	85,47	11,07

Tableau A7 (suite et fin) : Mesures expérimentales, ayant servi au traçage du rendement en fonction du nombre de Froude, pour le cas d'un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 7,1 \text{ mm}$.

h_1 (cm)	$\eta\%$	F_1
4	25,93	5,56
	53,08	6,24
	59,09	7,18
	63,46	7,91
	70,52	8,39
	73,71	9,08
	76,8	9,66
	79,38	10,09
	81,74	10,98
	83,21	11,38
4,4	71,98	6,29
	75,38	7,02
	77,84	7,67
	80,05	8,37
	81,25	8,81
	83,53	9,79
	85,64	10,94
	86,31	11,36
	86,74	11,69
	89,9	14,48
5	48,4	4,27
	51	4,46
	56,75	4,94
	60,25	5,29
	66,17	6,01
	69,38	6,5
	72,61	7,08
	78,5	10,14
	77,23	8,15
	80,09	9,02
81,84	9,67	

Tableau A8 : Mesures expérimentales, ayant servi au traçage du rendement en fonction du nombre de Froude, pour le cas d'un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 8,73\text{mm}$.

h_1 (cm)	$\eta\%$	F_1
2,50	71,23	10,33
	76,00	11,59
	78,13	12,54
	80,76	13,74
	82,37	15,31
	84,01	17,01
	84,79	17,94
	86,29	19,21
	87,85	22,52
2,80	80,48	10,33
	82,72	11,59
	85,19	12,54
	86,12	13,74
	88,22	15,31
	90,07	17,01
	90,54	17,94
	91,59	19,21
	93,10	22,52
3,40	80,34	11,78
	83,96	11,78
	87,82	14,15
	90,30	15,39
	90,71	16,59
	91,64	17,86
	92,26	18,95
	92,89	19,93
	93,24	21,32
94,00	22,43	

Tableau A8 (suite et fin) : Mesures expérimentales, ayant servi au traçage du rendement en fonction du nombre de Froude, pour le cas d'un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 8,73\text{mm}$.

h_1 (cm)	$\eta\%$	F_1
4	69,85	6,11
	72,65	6,66
	77,01	7,73
	78,59	8,2
	81,4	9,22
	83,67	10,27
	84,83	10,9
	86,6	12,05
	87,33	12,6
88,11	13,26	
4,4	58,11	5,15
	63,49	5,8
	68,48	6,56
	71,71	7,17
	74	7,68
	77,07	8,49
	79,12	9,15
	80,93	9,83
	81,9	10,24
5	53,19	4,74
	54,64	4,88
	58,07	5,22
	63,17	5,45
	65,64	6,18
	69,48	6,82
	72,02	7,32
	74,38	7,86
	76,19	8,33
79,69	9,44	

Tableau A9 : Mesures expérimentales du profil de surface généralisée $y=f(x)$ du ressaut contrôlé par seuil mince en canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 6,04\text{mm}$.

$h_1 = 4,4 \text{ cm}$		$h_1 = 3,4 \text{ cm}$		$h_1 = 2,8 \text{ cm}$	
x	y	x	y	x	y
0,34	0,71	0,35	0,37	0,32	0,27
0,67	0,78	0,70	0,55	0,63	0,51
0,29	0,65	0,29	0,26	0,95	0,80
0,58	0,75	0,57	0,50	0,21	0,31
0,87	0,87	0,86	0,86	0,43	0,61
0,34	0,58	0,24	0,28	0,64	0,75
0,67	0,69	0,48	0,58	0,86	0,82
0,29	0,73	0,72	0,83	0,19	0,44
0,58	0,84	0,97	0,90	0,37	0,62
0,87	0,90	0,23	0,35	0,56	0,67
0,26	0,73	0,46	0,56	0,75	0,76
0,52	0,83	0,69	0,81	0,94	0,85
0,79	0,87	0,92	0,89	0,18	0,57
0,23	0,64	0,20	0,53	0,35	0,61
0,46	0,62	0,40	0,66	0,53	0,68
0,69	0,79	0,61	0,75	0,70	0,77
0,92	0,83	0,81	0,75	0,88	0,86
0,22	0,64	0,18	0,79	0,16	0,57
0,44	0,67	0,37	0,59	0,32	0,65
0,66	0,75	0,55	0,69	0,47	0,76
0,88	0,81	0,74	0,74	0,63	0,82
0,20	0,61	0,92	0,84	0,79	0,90
0,40	0,71	0,16	0,86	0,32	0,27
0,60	0,71	0,32	0,62	0,63	0,51
0,80	0,75	0,48	0,65	0,90	0,80
0,99	0,85	0,64	0,72	-	-
0,17	0,60	0,80	0,78	-	-
0,35	0,63	0,96	0,83	-	-
0,52	0,68	0,15	0,88	-	-
0,69	0,75	0,30	0,60	-	-

Tableau A10 : Mesures expérimentales du profil de surface généralisée $y=f(x)$ du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 7,11\text{mm}$

$h_1 = 4,0 \text{ cm}$		$h_1 = 3,4 \text{ cm}$	
x	y	x	y
0,32	0,42	0,34	0,29
0,63	0,71	0,68	0,61
0,95	0,91	0,29	0,55
0,30	0,50	0,57	0,77
0,60	0,66	0,86	0,92
0,90	0,91	0,24	0,58
0,25	0,51	0,48	0,72
0,50	0,64	0,72	0,80
0,75	0,91	0,97	0,91
1,00	0,95	0,23	0,64
0,22	0,59	0,46	0,73
0,45	0,81	0,69	0,86
0,67	0,85	0,92	0,94
0,89	0,91	0,20	0,70
0,21	0,68	0,40	0,73
0,42	0,79	0,61	0,77
0,62	0,83	0,81	0,84
0,83	0,91	0,18	0,67
0,19	0,69	0,37	0,71
0,38	0,74	0,55	0,75
0,57	0,80	0,74	0,86
0,76	0,86	0,92	0,89
0,95	0,91	0,16	0,62
0,18	0,67	0,32	0,68
0,36	0,73	0,48	0,72
0,53	0,79	0,64	0,79
0,71	0,85	0,80	0,83
0,89	0,92	0,96	0,93
0,17	0,70	0,15	0,64
0,34	0,75	0,30	0,70

Tableau A11 : Mesures expérimentales du profil de surface généralisée $y=f(x)$ du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal triangulaire à parois rugueuses de rugosité absolue $\varepsilon = 8,73\text{mm}$

$h_1 = 2,8 \text{ cm}$		$h_1 = 2,5 \text{ cm}$	
x	y	x	y
0,35	0,89	0,28	0,26
0,69	0,94	0,57	0,64
0,29	0,87	0,24	0,93
0,59	0,99	0,47	0,40
0,88	0,98	0,71	0,59
0,26	0,84	0,87	0,90
0,52	0,87	0,22	0,98
0,78	0,94	0,43	0,41
0,24	0,80	0,65	0,52
0,48	0,85	0,87	0,84
0,71	0,92	0,20	0,93
0,95	0,96	0,40	0,64
0,22	0,81	0,61	0,85
0,43	0,88	0,81	0,92
0,65	0,92	0,19	0,93
0,87	0,97	0,38	0,74
0,19	0,79	0,56	0,82
0,39	0,85	0,75	0,91
0,58	0,91	0,89	0,94
0,78	0,97	0,18	0,97
0,97	1,00	0,36	0,76
0,18	0,76	0,54	0,80
0,35	0,80	0,72	0,88
0,53	0,86	0,85	0,92
0,71	0,92	0,17	0,95
0,88	0,96	0,34	0,77
0,17	0,85	0,51	0,88
0,34	0,91	0,68	0,92
0,51	0,92	0,80	0,94
0,68	0,98	0,96	0,99

Tableau A12: Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal profilé en “U” à fond rugueux de rugosité absolue $\varepsilon = 4,30\text{mm}$

$h_1(\text{cm})$	$h_2(\text{cm})$	$Q(\text{l/s})$	F_1	L_j/h_1	$L_r(\text{cm})$	Y
2,3	6,67	2,34	2,67	36,96	71,00	2,90
2,3	7,27	2,70	3,09	38,70	78,00	3,16
2,3	7,67	3,58	4,09	41,96	81,00	3,33
2,3	9,27	4,06	4,63	43,91	86,00	4,03
2,3	9,77	4,49	5,12	45,87	91,50	4,25
2,3	12,57	5,24	5,99	54,13	110,50	5,47
2,3	13,07	5,90	6,74	55,65	121,00	5,68
2,3	14,47	6,64	7,58	63,04	130,00	6,29
2,3	15,27	7,42	8,47	74,78	155,00	6,64
2,3	16,87	8,57	9,79	83,04	161,00	7,33
2,3	18,67	10,33	11,79	91,30	191,00	8,12
2,3	20,27	11,35	12,95	99,13	224,00	8,81
3,4	9,57	5,24	2,76	35,00	104,00	2,81
3,4	10,97	6,06	3,19	37,65	117,00	3,23
3,4	11,97	6,77	3,57	42,06	123,00	3,52
3,4	16,07	10,33	5,44	45,59	126,00	4,73
3,4	19,27	13,57	7,15	48,24	148,00	5,67
3,4	23,27	15,77	8,31	59,41	187,00	6,84
3,4	26,77	21,68	11,43	67,35	202,00	7,87
3,4	32,47	27,17	14,32	68,82	225,00	9,55
5,2	13,27	12,13	2,78	25,00	113,00	2,55
5,2	14,17	13,57	3,10	31,35	126,00	2,73
5,2	18,97	17,70	4,05	31,73	139,00	3,65
5,2	22,07	20,37	4,66	32,31	106,00	4,24
5,2	25,27	23,91	5,47	34,62	132,00	4,86
6,1	14,67	13,90	2,33	20,25	94,50	2,40
6,1	16,57	14,86	2,49	21,23	104,50	2,72
6,1	17,47	16,06	2,69	24,92	126,50	2,86
6,1	18,77	18,21	3,05	25,90	128,00	3,08
6,1	19,87	19,67	3,30	27,05	136,00	3,26
6,1	20,67	20,14	3,37	27,38	147,00	3,39
6,1	21,97	22,72	3,81	27,70	150,00	3,60
6,1	25,47	25,95	4,35	30,98	172,00	4,18
6,1	26,77	27,17	4,55	32,30	179,00	4,39
6,1	27,77	28,34	4,75	34,26	189,00	4,55

Tableau A13 : Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal profilé en “U” à fond rugueux de rugosité absolue $\varepsilon = 5,63\text{mm}$

$h_1(\text{cm})$	$h_2(\text{cm})$	Q(l/s)	F_1	Lr(cm)	L_j/h_1	Y
2,3	9,10	6,215	7,09	85,00	44,13	3,96
2,3	9,30	6,655	7,60	109,50	53,26	4,04
2,3	10,50	7,15	8,16	122,80	58,26	4,57
2,3	12,30	7,92	9,04	121,00	65,43	5,35
2,3	13,10	8,855	10,11	139,50	70,43	5,70
2,3	14,90	9,625	10,99	174,50	83,04	6,48
2,3	15,90	10,175	11,61	179,00	90,43	6,91
2,3	16,90	11	12,56	196,00	92,39	7,35
2,3	17,20	11,11	12,68	203,00	106,30	7,48
2,3	20,20	14,3	16,32	235,00	111,74	8,78
3,4	9,60	8,91	4,70	102,00	35,68	2,82
3,4	10,00	9,13	4,81	103,00	35,15	2,94
3,4	10,80	9,185	4,84	104,50	35,50	3,18
3,4	11,50	9,625	5,07	104,20	35,38	3,38
3,4	11,80	10,175	5,36	105,00	37,47	3,47
3,4	12,10	9,68	5,10	115,00	37,21	3,56
3,4	13,00	10,725	5,65	112,50	38,97	3,82
3,4	13,30	10,89	5,74	120,50	40,88	3,91
3,4	14,00	11,55	6,09	125,30	41,68	4,12
3,4	14,80	11,715	6,18	146,30	45,41	4,35
3,4	15,50	13,035	6,87	148,70	45,88	4,56
3,4	17,20	14,74	7,77	147,10	47,94	5,06
3,4	17,30	14,905	7,86	167,80	53,94	5,09
3,4	18,60	16,5	8,70	170,20	56,50	5,47
3,4	19,00	17,16	9,05	179,20	58,76	5,59
3,4	20,00	17,71	9,34	186,00	61,15	5,88
3,4	22,00	20,515	10,82	211,50	65,59	6,47
5,2	12,00	12,155	2,78	77,00	17,02	2,31
5,2	12,60	12,815	2,93	85,00	18,46	2,42
5,2	12,76	13,035	2,98	88,50	19,23	2,45
5,2	14,50	14,685	3,36	105,00	22,50	2,79
5,2	14,70	14,795	3,39	112,50	23,08	2,83
5,2	15,70	15,565	3,56	115,70	24,29	3,02
5,2	16,40	16,5	3,78	118,00	25,00	3,15
5,2	17,90	17,82	4,08	136,00	27,42	3,44
6,1	14,20	17,6	2,95	73,00	14,02	2,33
6,1	14,80	19,25	3,23	87,50	15,25	2,43
6,1	15,30	19,8	3,32	91,00	16,56	2,51
6,1	15,50	20,405	3,42	104,50	18,93	2,54
6,1	16,40	21,23	3,56	115,00	21,15	2,69
6,1	16,80	21,45	3,59	120,50	21,48	2,75
6,1	19,30	23,925	4,01	144,00	26,80	3,16

Tableau A14 : Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal profilé en “U” à fond rugueux de rugosité absolue $\varepsilon = 7,14\text{mm}$

$h_1(\text{cm})$	$h_2(\text{cm})$	$Q(\text{l/s})$	F_1	$L_r(\text{cm})$	L_j/h_1	Y
2,3	7,8	5,67	6,47	76	36,09	3,39
2,3	8	5,72	6,53	82,8	40,78	3,48
2,3	8,5	6,22	7,09	88,5	42,17	3,70
2,3	8,8	6,33	7,22	95	45,43	3,83
2,3	9,8	6,99	7,97	99,3	49,13	4,26
2,3	10,1	7,26	8,29	109,8	51,65	4,39
2,3	11,1	7,98	9,10	112,5	52,61	4,83
2,3	11,3	8,31	9,48	113	53,04	4,91
2,3	12,3	8,91	10,17	118,5	55,22	5,35
2,3	12,8	9,13	10,42	122,5	56,09	5,57
2,3	13,3	9,74	11,11	124,4	58,74	5,78
2,3	14,2	10,29	11,74	128,8	59,13	6,17
2,3	14,8	10,62	12,12	132,5	60,91	6,43
2,3	15,4	11,28	12,87	137,1	63,96	6,70
2,3	16,3	12,49	14,25	144	67,83	7,09
2,3	17,1	13,20	15,07	151,4	70,04	7,43
2,3	17,7	13,81	15,76	155	71,74	7,70
2,3	18,3	14,47	16,51	156,5	72,17	7,96
2,3	19,4	16,06	18,33	173	80,43	8,43
2,3	20,3	16,45	18,77	180	81,52	8,83
2,3	21,5	17,49	19,96	187	85,22	9,35
3,4	10,2	8,42	4,44	80,5	26,88	3,00
3,4	10,3	8,53	4,49	87,2	28,24	3,03
3,4	10,5	8,86	4,67	89	28,88	3,09
3,4	11,1	8,97	4,73	97	30,79	3,26
3,4	12	9,52	5,02	98	31,47	3,53
3,4	12,2	10,07	5,31	102	32,94	3,59
3,4	13,4	11,77	6,20	111	35,00	3,94
3,4	13,6	11,94	6,29	114	36,18	4,00
3,4	14,7	12,54	6,61	117	36,76	4,32
3,4	15,3	12,87	6,78	131	39,76	4,50
3,4	15,6	13,31	7,02	136	44,12	4,59
3,4	16,9	14,58	7,68	147	46,18	4,97
3,4	17,3	15,07	7,94	152	48,24	5,09
3,4	17,6	15,79	8,32	157	49,41	5,18
3,4	19,2	16,94	8,93	172	54,12	5,65
3,4	19,5	17,71	9,34	176	54,41	5,74
3,4	19,8	17,88	9,42	185	57,65	5,82
3,4	20,2	19,25	10,15	194,5	60,29	5,94
3,4	21,9	20,63	10,87	214	66,18	6,44
3,4	22,4	21,34	11,25	216,8	66,79	6,59
3,4	23	22,55	11,89	223,5	69,56	6,76

Tableau A14 (suite et fin) : Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal profilé en “U” à fond rugueux de rugosité absolue $\varepsilon = 7,14\text{mm}$

$h_1(\text{cm})$	$h_2(\text{cm})$	$Q(\text{l/s})$	F_1	$L_r(\text{cm})$	L_j/h_1	Y
5,2	11,1	11,56	2,64	60	12,98	2,13
5,2	11,2	11,66	2,67	62	13,37	2,15
5,2	11,4	11,93	2,73	71,6	15,29	2,19
5,2	11,8	12,20	2,79	77,5	16,75	2,27
5,2	12,7	12,96	2,97	83,5	17,52	2,44
5,2	12,8	13,39	3,06	86,1	17,98	2,46
5,2	13,9	14,26	3,26	90	19,08	2,67
5,2	14,2	14,80	3,39	93,5	19,29	2,73
5,2	15,1	15,55	3,56	99	20,58	2,90
5,2	15,5	16,42	3,76	105	21,73	2,98
5,2	15,9	16,58	3,79	111	22,69	3,06
5,2	17	17,71	4,05	117,4	23,96	3,27
5,2	17,6	18,74	4,29	125,6	25,58	3,38
5,2	18,5	19,22	4,40	133	27,31	3,56
5,2	19,7	20,74	4,74	148	29,96	3,79
5,2	20,1	21,55	4,93	154,5	31,42	3,87
5,2	20,5	21,71	4,97	164	33,04	3,94
5,2	20,8	22,57	5,16	173	35,10	4,00
6,1	13,9	19,44	3,26	64	12,26	2,28
6,1	14,2	19,71	3,30	65,5	12,38	2,33
6,1	14,7	20,03	3,36	72,5	13,15	2,41
6,1	14,9	20,30	3,40	77,3	13,70	2,44
6,1	15,5	21,17	3,55	81	14,43	2,54
6,1	15,9	21,65	3,63	86	15,08	2,61
6,1	16,5	22,73	3,81	91	16,23	2,70
6,1	17	23,44	3,93	94	16,05	2,79
6,1	18,1	25,38	4,25	100,2	17,54	2,97
6,1	18,7	25,92	4,34	112	19,26	3,07

Tableau A15 : Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal profilé en “U” à fond rugueux de rugosité absolue $\varepsilon = 9,11\text{mm}$

$h_1(\text{cm})$	$h_2(\text{cm})$	$Q(\text{l/s})$	F_1	$L_r(\text{cm})$	L_j/h_1	Y
2,3	6,8	5,23	5,96	80	38,26	2,96
2,3	7	5,28	6,03	87	41,30	3,04
2,3	7,8	5,72	6,53	91	43,04	3,39
2,3	7,9	5,78	6,59	93	43,70	3,43
2,3	8,6	6,11	6,97	95	45,65	3,74
2,3	8,8	6,11	6,97	102	46,52	3,83
2,3	9,8	6,93	7,91	104,5	49,13	4,26
2,3	10	7,04	8,04	111	51,74	4,35
2,3	11	7,81	8,91	114,5	52,17	4,78
2,3	11,6	8,25	9,42	119	54,78	5,04
2,3	12,1	8,64	9,86	122	56,52	5,26
2,3	13,3	9,57	10,92	127,5	57,83	5,78
2,3	13,6	9,68	11,05	130	59,57	5,91
2,3	14,1	10,23	11,68	136	62,17	6,13
2,3	15,6	11,55	13,18	151	69,57	6,78
2,3	15,9	12,05	13,75	158	71,96	6,91
2,3	16,5	12,65	14,44	159,5	72,61	7,17
2,3	16,9	13,53	15,44	165	75,22	7,35
2,3	18,2	14,91	17,01	174	79,13	7,91
3,4	9,3	9,68	5,10	9	21,18	2,74
3,4	9,3	9,96	5,25	10	21,47	2,74
3,4	9,8	10,18	5,36	12	22,06	2,88
3,4	9,9	10,34	5,45	16	23,24	2,91
3,4	10,6	10,78	5,68	19,5	24,26	3,12
3,4	10,9	11,11	5,86	24	25,59	3,21
3,4	11,6	11,66	6,15	30	27,35	3,41
3,4	11,9	12,10	6,38	37,3	29,50	3,50
3,4	13	13,09	6,90	44	31,47	3,82
3,4	13,4	13,04	6,87	50,6	33,41	3,94
3,4	14,1	13,70	7,22	59	35,88	4,15
3,4	15	14,52	7,65	66	37,94	4,41
3,4	15,6	15,13	7,97	74	40,29	4,59
3,4	16,4	16,50	8,70	80	42,06	4,82
3,4	17,1	17,71	9,34	89	44,71	5,03
3,4	17,7	17,82	9,39	94,5	46,32	5,21
3,4	17,9	18,48	9,74	106	49,71	5,26
3,4	18,5	19,14	10,09	114,5	52,21	5,44
3,4	19,9	21,07	11,10	161	65,88	5,85
3,4	20,5	22,06	11,63	184,5	72,79	6,03
3,4	21	22,55	11,89	205,5	78,97	6,18

Tableau A15 (suite et fin) : Mesures expérimentales de base, du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal profilé en “U” à fond rugueux de rugosité absolue $\varepsilon = 9,1\text{mm}$

$h_1(\text{cm})$	$h_2(\text{cm})$	$Q(\text{l/s})$	F_1	$L_r(\text{cm})$	L_j/h_1	Y
5,2	11,4	12,10	2,77	84	17,23	2,19
5,2	11,5	12,38	2,83	90	18,35	2,21
5,2	11,8	12,76	2,92	96,2	20,31	2,27
5,2	11,9	13,04	2,98	107,5	22,12	2,29
5,2	12,4	14,03	3,21	111	22,79	2,38
5,2	12,6	14,30	3,27	114,5	23,27	2,42
5,2	13,7	15,57	3,56	117,2	24,23	2,63
5,2	14	16,01	3,66	130,2	26,73	2,69
5,2	14,8	16,78	3,84	134,2	27,15	2,85
5,2	15,4	17,16	3,93	141	28,94	2,96
5,2	15,8	17,60	4,03	147	29,62	3,04
5,2	17	18,92	4,33	158,5	32,02	3,27
5,2	17,4	19,25	4,40	163,5	32,69	3,35
5,2	18	20,02	4,58	169,7	34,12	3,46
5,2	18,9	21,07	4,82	187	37,12	3,63
5,2	19,3	21,73	4,97	192	38,75	3,71
5,2	19,6	22,44	5,13	205	40,77	3,77
5,2	19,9	23,10	5,29	215	42,60	3,83
6,1	13,6	19,86	3,33	60	11,39	2,23
6,1	13,8	20,19	3,38	71	13,03	2,26
6,1	14,4	20,90	3,50	76,5	13,77	2,36
6,1	14,6	21,01	3,52	77,7	14,26	2,39
6,1	15,1	21,95	3,68	82,4	14,75	2,48
6,1	15,5	22,66	3,80	90	16,15	2,54
6,1	16,1	23,82	3,99	114	20,00	2,64

Tableau A16 : Mesures expérimentales, ayant servi au traçage du rendement en fonction du nombre de Froude, pour le cas d'un canal profilé en "U" à fond rugueux de rugosité absolue $\varepsilon = 4,3\text{mm}$

$h_1(\text{cm})$	$\eta\%$	F_1
2,3	11,84	2,67
	22,53	3,09
	47,29	4,09
	49,81	4,63
	55,77	5,12
	57,78	5,99
	64,73	6,74
	68,78	7,58
	73,37	8,47
	77,75	9,79
3,4	82,86	11,79
	84,56	12,95
	18,49	2,76
	25,48	3,19
	56,44	5,44
	68,62	7,15
5,2	82,42	11,43
	86,36	14,32
	25,33	2,78
	32,62	3,10
	43,12	4,05
6,1	48,65	4,66
	56,15	5,47
	11,38	2,33
	10,12	2,49
	15,11	2,69
	24,33	3,05
	29,12	3,30
	29,26	3,37
38,20	3,81	
43,45	4,35	
45,30	4,55	

Tableau A17 : Mesures expérimentales, ayant servi au traçage du graphique du rendement en fonction du nombre de Froude, pour le cas d'un canal profilé en“U”à fond rugueux de rugosité absolue $\varepsilon = 5,63\text{mm}$.

$h_1(\text{cm})$	$\eta\%$	F_1
2,3	79,42	8,16
	84,06	10,99
	84,79	11,61
	86,15	12,56
	86,19	12,68
3,4	66,17	5,74
	68,17	6,09
	67,52	6,18
	72,07	6,87
	75,58	7,77
	75,95	7,86
	78,76	8,70
80,17	9,34	
5,2	32,93	2,93
	33,88	2,98
	34,97	3,08
	36,09	3,15
	38,73	3,36
	38,78	3,39
	40,33	3,56
	43,51	3,78
	45,06	3,91
	46,34	4,08
	46,52	4,17
	49,84	4,39
	53,81	4,78
	55,59	5,03
56,60	5,16	
58,84	5,45	
60,06	5,63	
6,1	40,14	3,19
	40,81	3,23
	41,89	3,32
	43,79	3,42
	44,95	3,56
	44,91	3,59
	48,46	4,01

Tableau A18: Mesures expérimentales, ayant servi au traçage du graphique du rendement en fonction du nombre de Froude, pour le cas d'un canal profilé en "U" à fond rugueux de rugosité absolue $\varepsilon = 7,14\text{mm}$.

$h_1(\text{cm})$	$\eta\%$	F_1
2,30	74,81	6,47
	74,86	6,53
	77,32	7,09
	77,50	7,22
	79,62	7,97
	80,54	8,29
	83,36	9,48
	88,23	11,11
	88,20	11,74
	89,45	14,25
	90,10	15,07
	91,18	16,51
	92,39	18,33
	92,43	18,77
92,92	19,96	
3,40	57,99	4,49
	59,92	4,67
	59,17	4,73
	60,76	5,02
	63,82	5,31
5,20	29,35	2,64
	29,77	2,67
	30,99	2,73
	31,49	2,79
	33,57	2,97
	36,06	3,06
	37,98	3,26
6,10	43,43	3,26
	43,86	3,30
	44,06	3,36
	44,66	3,40
	46,55	3,55
	47,45	3,63
	49,88	3,81
	51,17	3,93
	54,90	4,25

Tableau A19 : Mesures expérimentales du profil de surface généralisé $y=f(X)$ du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal profilé en “U” à fond rugueux de rugosité absolue $\varepsilon=3,55\text{mm}$.

$h_1=2,3\text{cm}$		$h_1=3,4\text{cm}$		$h_1=5,2\text{cm}$		$h_1=6,1\text{cm}$	
X	y	X	y	X	y	X	y
0,218	0,258	0,121	0,148	0,080	0,132	0,185	0,331
0,239	0,287	0,079	0,150	0,079	0,140	0,182	0,341
0,308	0,429	0,067	0,168	0,080	0,154	0,259	0,455
0,328	0,431	0,079	0,217	0,079	0,171	0,258	0,460
0,286	0,512	0,110	0,236	0,092	0,175	0,294	0,508
0,319	0,530	0,168	0,272	0,119	0,183	0,360	0,532
0,352	0,532	0,312	0,473	0,098	0,205	0,355	0,563
0,547	0,765	0,311	0,500	0,145	0,230	0,321	0,586
0,500	0,769	0,297	0,506	0,141	0,250	0,414	0,677
0,500	0,769	0,349	0,533	0,135	0,263	0,415	0,690
		0,349	0,575	0,179	0,308	0,517	0,706
		0,357	0,576	0,217	0,403	0,529	0,763
		0,358	0,608	0,283	0,474	0,504	0,770
		0,495	0,684	0,276	0,481	0,640	0,826
		0,419	0,709	0,341	0,516	0,550	0,828
		0,462	0,710	0,348	0,553	0,593	0,866
		0,483	0,740	0,384	0,556	0,594	0,867
		0,553	0,767	0,478	0,625	0,725	0,915
		0,595	0,817	0,482	0,640	0,660	0,940
		0,713	0,911	0,504	0,661	0,786	0,952
		0,714	0,913	0,381	0,662	0,783	0,960
		0,6724	0,923	0,539	0,693		
		0,7419	0,938	0,417	0,716		
		0,7225	0,941	0,556	0,726		
		0,7959	0,946	0,536	0,778		
		0,8387	0,988	0,63	0,83		
				0,677	0,879		
				0,649	0,879		
				0,763	0,932		
				0,772	0,948		
				0,773	0,950		
				0,722	0,965		
				0,821	0,981		

Tableau A20 : Mesures expérimentales du profil de surface généralisé $y=f(X)$ du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal profilé en “U” à fond rugueux de rugosité absolue $\varepsilon=4,30\text{mm}$.

$h_1=2,3\text{mm}$		$h_1=3,4\text{mm}$		$h_1=5,2\text{cm}$		$h_1=6,1\text{cm}$	
X	y	X	y	X	y	X	y
0,241	0,513	0,142	0,300	0,162	0,331	0,127	0,361
0,469	0,778	0,229	0,463	0,540	0,856	0,187	0,368
0,529	0,817	0,242	0,487	0,734	0,980	0,184	0,424
0,641	0,967	0,242	0,487	1,000	1,000	0,228	0,444
		0,475	0,803			0,236	0,499
		0,648	0,961			0,282	0,562
		1,000	1,000			0,293	0,588
						0,317	0,589
						0,350	0,719
						0,329	0,724
						0,388	0,768
						0,455	0,835
						0,568	0,902
						0,522	0,931
						0,594	0,932
						0,443	0,953
						0,642	0,971

Tableau A21 : Mesures expérimentales du profil de surface généralisé $y=f(X)$ du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal profilé en “U” à fond lisse de rugosité absolue $\varepsilon \cong 0,00\text{mm}$

$h_1=2,32\text{cm}$		$h_1=3,3\text{cm}$		$h_1=5\text{cm}$		$h_1=6\text{cm}$	
y	X	y	X	y	X	y	X
0,03	0,09	0,11	0,08	0,08	0,11	0,1	0,16
0,05	0,1	0,12	0,08	0,09	0,11	0,12	0,13
0,09	0,1	0,12	0,09	0,12	0,12	0,12	0,15
0,14	0,17	0,18	0,16	0,19	0,21	0,18	0,18
0,17	0,19	0,94	0,72	0,21	0,23	0,25	0,31
0,19	0,2	0,96	0,8	0,24	0,22	0,29	0,27
0,24	0,26	1	1	0,25	0,23	0,37	0,32
0,28	0,29			0,38	0,32	0,48	0,36
0,3	0,31			0,41	0,34	0,5	0,4
0,46	0,38			0,42	0,32	0,6	0,46
0,49	0,41			0,51	0,42	0,63	0,48
0,54	0,48			0,56	0,35	0,72	0,55
0,55	0,43			0,93	0,74	0,75	0,62
0,75	0,57			0,97	0,84	0,83	0,64
0,79	0,61			1	1	0,9	0,73
0,88	0,67					0,91	0,77
0,89	0,71					0,94	0,8
0,94	0,82					0,95	0,8
0,95	0,76					0,97	0,91
0,97	0,92					0,98	0,92
0,97	0,86					0,99	0,96
1	1					1	1