

Approche Expérimentale De La Longueur Du Ressaut Hydraulique Dans Un Canal Triangulaire A Parois Rugueux

Kateb.S.^{1*}, Debabeche M.², Zegait.R³ et Baouia K.³

^{1,3} *Laboratoire de recherche sur le développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides et sahariennes (L.E.N.R.E.Z.A), Université de Ouargla - Algérie*

² *Laboratoire de Recherche exploitation et valorisation des ressources naturelles en zone arides Université Mohamed Khider, BP 145 RP – 07000 Biskra - Algérie*

Abstract. This paper presents, experimental study, the hydraulic jump in horizontal symmetrical triangular channel with rough walls and a 90° central angle. The study investigates the effect of the walls roughness on the sequent depth ratio, and relation has been proposed for the inflow Froude number as a function of the sequent depth ration and roughness parameter, which has been determined using the experimental.

Keywords: *hydraulics jump, triangular channel, rough walls, open channel, stilling basin*

Résumé. La présente étude s'intéresse à l'analyse théorique et expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90°, à parois rugueuses. Cette étude a pour principal objectif d'analyser et de déterminer l'effet de la rugosité des parois du canal sur les caractéristiques essentielles de ce type de ressaut, à savoir, le nombre de Froude de l'écoulement incident, les hauteurs initiale et finale du ressaut et la longueur du ressaut.

Mots clés: *ressaut hydraulique, canal triangulaire, rugosité des parois, bassin d'amortissement.*

1. Introduction

La présente étude s'intéresse à l'analyse l'effet de la rugosité des parois du canal sur les caractéristiques essentielles de ce type de ressaut, à savoir, le débit volume Q , la hauteur initiale h_1 , la hauteur finale h_2 et la longueur L_j du ressaut. Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, le rapport $Y=h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut et la longueur relative L_j/h_1 du ressaut.

En effet, quatre rugosités absolues ε sont testées : 4,53 mm, 6,04 mm, 7,11 mm et 8,73 mm.

*Corresponding author.

E-mail: katebsamir30@gmail.com (Kateb S.).

Address: Laboratoire de Recherche exploitation et valorisation des ressources naturelles en zone arides. Université Mohamed Khider, BP 145 RP – 07000 Biskra - Algérie

1. position du problème

La modification des conditions à l'amont (hauteurs, débit,...etc) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur, ...etc), peut conduire à différentes configurations de ressaut. Le ressaut est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente faible ou nulle, sans obstacle à l'aval. Il est dit contrôlé lorsque sa formation est conditionnée par la mise en place d'un obstacle à l'aval de l'écoulement. Pour notre cas il s'agit d'un ressaut contrôlé par seuil mince en canal à section droite triangulaire, à parois rugueuses. Différentes rugosités ont été testées. 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 rouleur L_r . La distance (x) sur laquelle le ressaut s'étend augmente également et pour ramener celui-ci dans sa position initiale, c'est à dire à environ 5 cm de la sortie du convergent, le premier seuil de hauteur s doit être surélevé. Ainsi à chaque valeur du débit Q , correspond une longueur L_j du ressaut et L_r du rouleur, ainsi qu'une hauteur h_2 à l'aval du ressaut et une hauteur (s) du seuil (Figure.1).

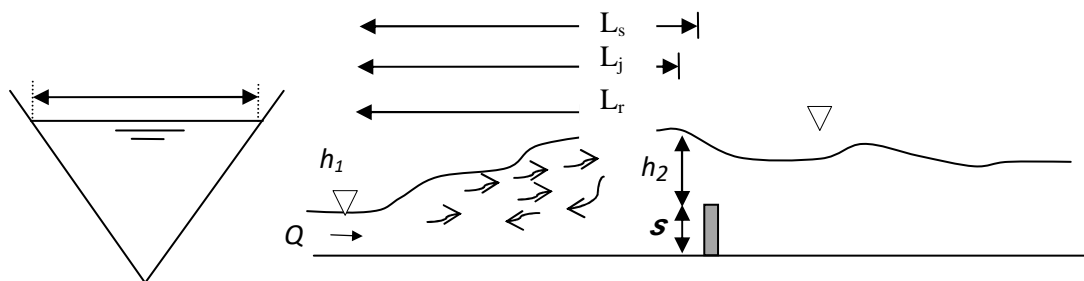


Figure.1: Ressaut contrôlé par seuil mince. h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, L_j longueur du ressaut hydraulique .

2. Protocole expérimental

2.1. Description du modèle

Le canal expérimental (figure 2) est constitué d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure de section droite triangulaire symétrique d'angle d'ouverture de 90° , par le moyen d'une conduite circulaire de 150 mm de diamètre. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe (figure 3) qui alimente un convergent en charge débouchant dans le canal de mesure. Le canal de mesure de section triangulaire et de longueur 3 m est relié, dans sa partie d'aval, à un second canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérales, permettant l'étalonnage du diaphragme (ou la mesure directe du débit).



Figure 2 : Photographie du canal de mesure de section droite triangulaire, ayant servi à l'expérimentation.



Figure 3 : Pompe

Le canal triangulaire est relié, dans sa partie amont, à une boîte en charge (figure 4) puis à un convergent de section droite triangulaire (figure 5). Le rôle de ce convergent est de générer un écoulement incident à grande vitesse. La section de sortie du convergent est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale h_1 du ressaut.



Figure 4 : Boîte en charge.



Figure 5 : Série de convergent

2.2. Procédure expérimentale

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90°, à parois rugueuses. En effet, quatre rugosités absolues ont été testées : ε (mm) = 4.53, 6.04, 7.11, 8.73. L'expérimentation a été menée sous sept hauteurs initiales : h_1 (mm) = 18, 25, 30, 34, 40, 44, et 51. Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue : $4 < F_1 < 24$. La formation du ressaut contrôlé est conditionnée par la mise en place d'un seuil à l'aval de l'écoulement, pour cela des seuils de différentes hauteurs ont été utilisés. Pour une hauteur s de seuil placé à l'extrémité aval du canal 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 de ressaut et une valeur de la hauteur s du seuil.

Un échantillon constitué d'une soixantaine de points de mesures expérimentales, pour chaque caractéristique et pour chaque rugosité des parois, a permis ainsi d'aboutir à des résultats assez significatifs. Les caractéristiques abordées par cette étude expérimentale sont : le débit volume Q , la hauteur initiale h_1 , la hauteur finale h_2 , la longueur L_j du ressaut et la rugosité ε des parois du canal. Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les paramètres suivants :

- Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial h} \quad (1)$$

- La longueur relative L_j/h_1 du ressaut.

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

3. Résultats expérimentaux

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

La Figure 6 montre la représentation graphique de la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour quatre rugosités absolues : ε (mm) = 4.53, 6.04, 7.11, 8.73. Quatre nuages de points distincts sont perceptibles, correspondant chacun à une rugosité absolue ε .

On constate que pour une rugosité absolue fixe, l'augmentation du nombre de Froude engendre celle de la longueur relative du ressaut. En outre, pour une valeur fixe du nombre de Froude incident, l'augmentation de la rugosité absolue provoque la diminution de la longueur relative du ressaut.

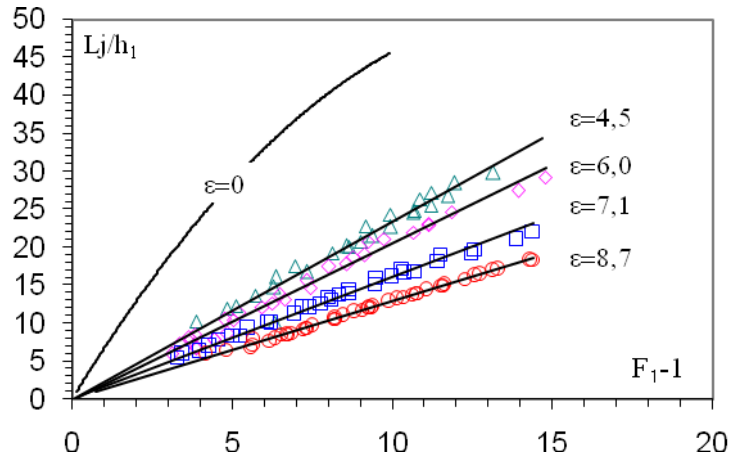


Figure 6 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de nombre Froude F_1 , pour quatre valeurs de rugosité absolue ϵ . (—) Courbes d'ajustements.

Par ailleurs, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés non linéaire, montre que pour chaque rugosité absolue, un ajustement linéaire de la forme $L_j/h_1 = a F_1$ est possible. La figure 6 le montre bien.

Le tableau 9.1:regroupe les valeurs du coefficient a.

Tableau 1: coefficients a des courbes d'ajustements.

| ϵ (mm) | Coefficient a | R^2 |
|-----------------|---------------|-------|
| 4,53 | 2,34 | 96 |
| 6,04 | 2,06 | 98 |
| 7,11 | 1,61 | 99 |
| 8,73 | 1,30 | 99 |

Le tableau 7 montre, que le coefficient 'a' diminue progressivement avec l'augmentation de la rugosité absolue ϵ . L'ajustement statistique des couples de valeurs (ϵ , a) par la méthode des moindres carrés donne la relation de type linéaire suivante : $a = 3,53 - 0,26\epsilon$, celle-ci est représentée dans la figure 7

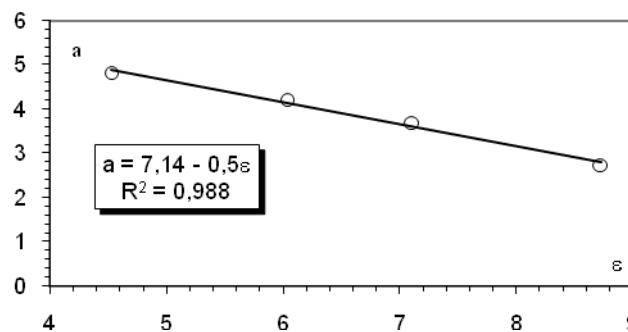


Figure 7 : Variation du coefficient 'a' en fonction de la rugosité absolue 'ε'.

En remplaçant le coefficient 'a' par son expression dans la relation $L_j/h_1 = a F_1$, l'équation liant la longueur relative L_j/h_1 du ressaut au nombre de Froude incident F_1 et à la rugosité absolue ϵ est

$$L_j/h_1 = (3,53 - 0,26\epsilon)(F_1-1) \quad (2)$$

pour $4,53 \leq \epsilon \leq 8,73\text{mm}$

La figure 8 montre que la relation $L_j/h_1 = \xi(\epsilon, F_1)$ 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 2).

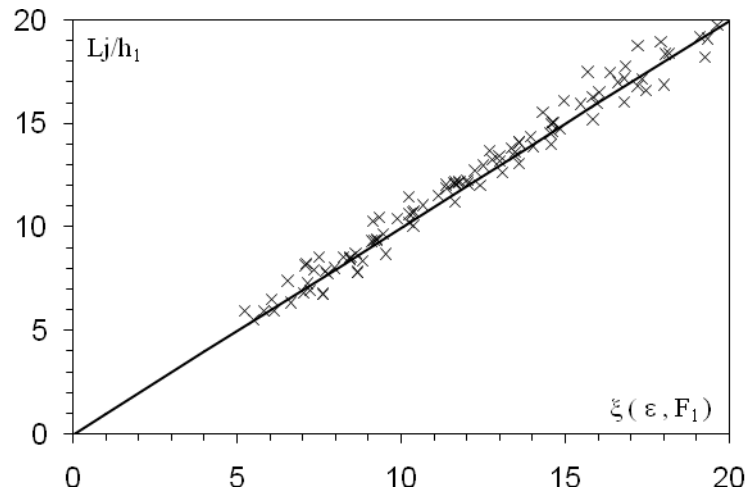


Figure 8 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de $\xi(\epsilon, F_1)$. (x) Points expérimentaux du ressaut contrôlé à parois rugueuses. (—) Première bissectrice d'équation $L_j/h_1 = (3,53 - 0,26\epsilon)(F_1 - 1)$.

3.2. Rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1

La figure 9 représente la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident F_1 , pour les quatre rugosités absolues : ϵ (mm) = 4.53, 6.04, 7.11, 8.73. En remarque en premier lieu que, pour les trois rugosités, l'augmentation du nombre de Froude incident entraîne celle du rapport Y des hauteurs conjuguées. Aussi on constate clairement l'influence de la rugosité des parois du canal sur la relation $Y(F_1)$. 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. La figure 9 montre quatre nuage de points, correspondant chacun à une valeur bien connue de la rugosité absolue ϵ . Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés non linéaires.

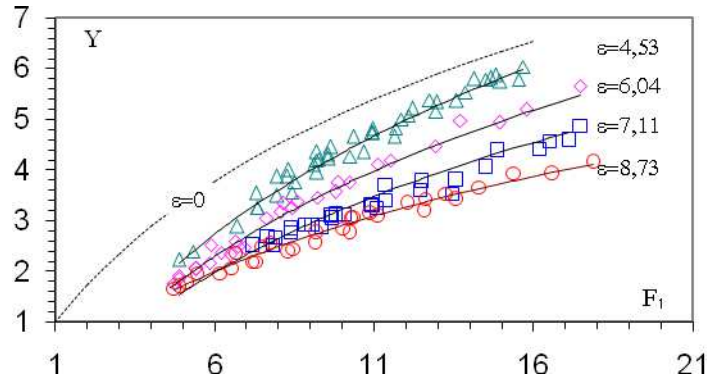


Figure 9 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de F1, pour quatre valeurs ε de rugosité absolue. (—) Courbes d’ajustement. (---) courbe selon Debabeche (2003).

L’analyse des points de mesures expérimentales, montre clairement que pour chaque valeur de ε, un ajustement logarithmique est possible, de la forme $Y = b \text{Ln} [(F1+4)/5]+c$

Le tableau 2 regroupe les valeurs des coefficients de b et c

Tableau 2 : Coefficients b et c des courbes d’ajustements.

| ε (mm) | Coefficient b | Coefficient c | R2 |
|--------|---------------|---------------|----|
| 4,53 | 4,82 | -0,60 | 98 |
| 6,04 | 4,22 | -0,60 | 98 |
| 7,11 | 3,70 | -0,60 | 95 |
| 8,73 | 2,74 | - | 97 |

Le tableau 2 montre que le coefficient ‘b’ diminue avec l’augmentation de la rugosité absolue ε. L’ajustement statistique des couples des valeurs (ε, b) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire d’équation : $b = 7.14 - 0.5ε$. Celle-ci est représentée à la figure 10.

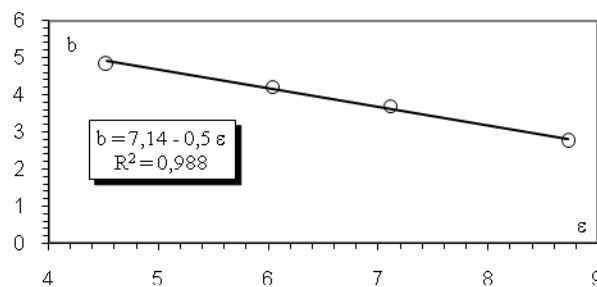


Figure 10 : Variation du coefficient b en fonction de la rugosité absolue ε

Le coefficient c ne dépend pas de la rugosité absolue et présente une valeur fixe de ‘-0.6’ En effet, en remplaçant les coefficients b et c par leurs expressions dans la relation $Y = b \text{Ln} [(F1+4)/5] + c$,

L'équation liant le rapport des hauteurs conjuguées au nombre de Froude incident et à rugosité absolue devient :

$$Y = (7,14 - 0,5\varepsilon) \text{Ln}(F1-1) - 0,6 \quad (2)$$

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

La figure 11 montre que la relation $Y = \Phi(F1, \varepsilon)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice.

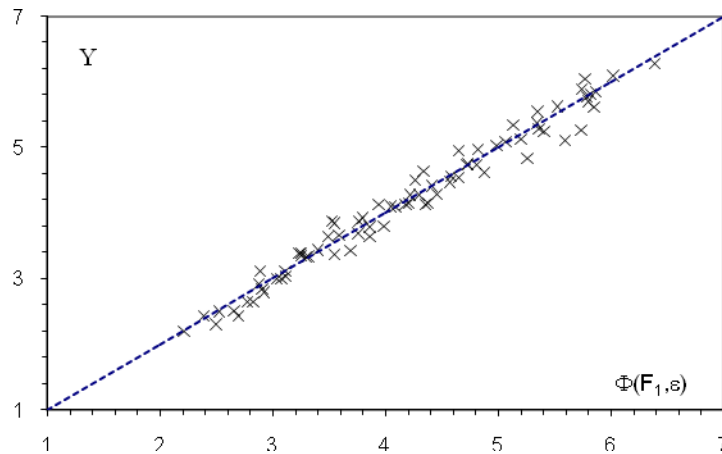


Figure 11 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction ε et de F1. (x) Points expérimentaux du ressaut contrôlé en canal triangulaire à parois rugueuses. (—) Première bissectrice d'équation : $Y = (7,14-0,5\varepsilon) \text{Ln}(F1-1)-0,6$.

3.3. Rendement du ressaut hydraulique

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:

$$\eta = \Delta H/H \quad (3)$$

$$\Delta H = H1-H2$$

H1 et H2 désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut. Celles-ci sont définies par les relations (9.4) et (9.5):

$$H1 = h1 + V1^2/(2g) \quad (4)$$

$$H2 = h2 + V2^2/(2g) \quad (5)$$

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

$$H1 = h1 + Q^2/(2gA1^2)$$

$$H2 = h2 + Q^2/(2g A2^2)$$

$$\text{Avec } A1 = mh1^2$$

Le nombre de Froude de l'écoulement incident dans un canal à section droite triangulaire est défini par la relation (.6) :

$$F_1 = \frac{2Q^2}{gm^2h_1^5} \tag{6}$$

En introduisant l'équation (6) dans la relation (3) on obtient l'expression (7) du rendement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}} \tag{7}$$

Y = h2/h1 étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

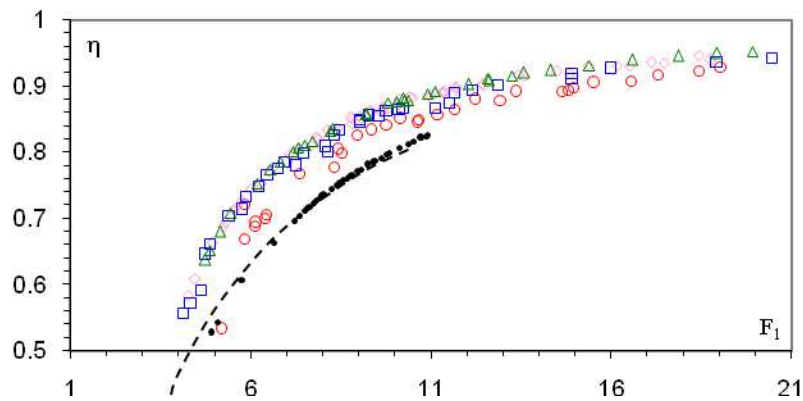


Figure 12 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 , pour cinq valeurs différentes de rugosité absolue : ϵ (mm) = (●) 0,00 (lisse), (○) 4,53mm, (□) 6,04mm, (◇) 7,11mm et (Δ) 8,73mm. (---) Courbe selon Debabeche (2003)

La figure 12 montre que pour une gamme pratique de Froude incident les points de mesure du ressaut à parois rugueuses sont au-dessous de ceux à parois lisses. Effectivement, le ressaut hydraulique dans le canal à parois rugueuses dissipe mieux la charge que son homologue à parois lisse. En outre, la figure 9.8 montre que la dissipation de la charge hydraulique croit avec l'augmentation de la rugosité. Néanmoins, pour des nombres de Froude élevés, les points de mesure 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 canal (Selon la classification de Bradley et Peterka, 1957) .

4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons analysé expérimentalement l'effet de la rugosité des parois du canal sur les caractéristiques essentielles de ce type de ressaut. L'étude a examiné en premier lieu la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. L'étude montre qu'un ajustement linéaire de la forme $L_j/h_1 = a F_1$ est possible. Tel que le coefficient 'a' est fonction de la rugosité absolue. L'étude a abordé ensuite, la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident F_1 , pour les quatre rugosités absolues. 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. Il a été possible de lier Y et F_1 par une courbe logarithmique. Dans un troisième temps, nous avons examiné la variation du rendement du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. Il a été montré que la dissipation de la charge hydraulique croît avec l'augmentation de la rugosité.

5. Liste de notations

| | | |
|-------|---|-------------------------------------|
| F_1 | Nombre de Froude incident | [-] |
| G | Accélération de la pesanteur | [m.s ⁻²] |
| h_1 | Hauteur conjuguée amont | [m] |
| h_2 | Hauteur conjuguée aval | [m] |
| L_r | Longueur du rouleau | [m] |
| L_j | Longueur du ressaut | [m] |
| M | Désigne la hauteur relative initiale du ressaut | [-] |
| m | Cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du triangle par rapport à l'horizontale | [-] |
| Q | Débit volume | [m ³ . s ⁻¹] |
| S | Hauteur relative du seuil | [-] |
| X | position relative de la marche par rapport au pied du ressaut | [m. s ⁻¹] |
| Y | Rapport des hauteurs conjuguées | [-] |
| | | [-] |

6. Références bibliographiques

- [1] Achour, B. Dissipation d'énergie par ressaut , thèse d'état, Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil,1998.
- [2] Achour, B. jump flowmeter in a channel of triangular cross-section without weir.J.hydr.res.,27n°2,205-214.
- [3] Achour, B.,Debebeche,M., ressaut hydraulique contrôle par seuil mince dans un canal triangulaire. Journal of hydraulic research Vol.00,No.0 (2002),pp.1-7.
- [4] Debabeche, M., Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie,2003 .
- [5] Hager, W., Bremen R., H., Classical Hydraulic jump; sequent depth, J. Hydraulic Research 27(5),565-585,1989.
- [6] Hager, W., Bremen R., H., et Kawogoshi N. Classical Hydraulic jump; length of roller, J. Hydraulic Research 28(5),591-608,1990.
- [7] Rajaratnam ,N., Hydraulic jumps on rough beds, Transaction of the engineering institute of Canada, Vol. 11, N° A-2 may 1968.
- [8] Rajaratnam ,N., Hydraulic jumps on corrugated beds, Journal of hydraulic engineering, ASEC, J. Hydraulic Engineering, Vol. 128, N° 7,656-336,july 1,2002.
- [9] Sinniger, R.O., Hager, W.H., Constructions hydrauliques, Ecoulement stationnaires, Presses polytechniques romandes, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,1989.
- [10] ARGYROPOULOS ,P.A General solution of the hydraulic jump in sloping channels, proc.ASCE.J.Hydr.Divi.,88(HY4),61-75. (1962).
- [11] FORSTER ,JW. and SKRINDE, R.A "Control of Hydraulic jump by sills". Trans. ASCE, 115,973-1022. (1950)