

EFFET DE LA RUGOSITE SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT EN CANAL PROFILE EN U A FOND RUGUEUX

EFFECT OF ROUGHNESS ON THE CANAL IN EVOLVING HYDRAULIC JUMP PROFILE AU BOTTOM ROUGH

*F. Riguet, A. Ghomri

*Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS)
Université de Biskra, BP 145 RP – 07000 Biskra, - Algérie
E-mail : ferhatriguet@yahoo.fr

Abstract

This study aims to study the hydraulic jump controlled by threshold, moving in a channel profile 'U' bottomed rough for a single roughness. Functional relations in dimensionless terms, linking the different characteristics of the projection, showing the effect of roughness of the bottom of the channel are obtained.

Key words : Hydraulic jump, channel-shaped in U, stilling basin, channel bottom rough.

Résumé

Cette étude a pour objectif d'étudier l'effet de la rugosité sur le ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en U à fond rugueux pour une seule rugosité. Des relations fonctionnelles, en termes adimensionnels, liant les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'effet de la rugosité du fond du canal, sont obtenues.

Mots clés : Ressaut hydraulique, canal profilé en U, bassin d'amortissement, canal à fond rugueux, rugosité.

INTRODUCTION

L'étude a pour but d'étudier l'effet de la rugosité expérimentalement sur le ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal profilé en "U" à fond rugueux pour une rugosité bien déterminée. L'étude bibliographique montre que les caractéristiques adimensionnelles essentielles, intervenant au phénomène du ressaut, dans un canal profilé en "U", sont le nombre de Froude IF_1 ou le débit relatif Q^* , la hauteur relative amont $y_1 = h_1/D$ (h_1 est la hauteur au pied du ressaut, D est la largeur du canal), la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$ (h_2 est la hauteur maximale mesurée à l'aval du ressaut) et le rapport $y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut.

Pour le ressaut hydraulique 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 ceux de Kateb (2006) et Ghomri (2009) qui ont contribué à l'étude du ressaut hydraulique dans un canal respectivement triangulaire à parois rugueuses et en U à fond rugueux. A notre connaissance, le canal profilé en 'U' à fond rugueux, n'a pas encore connu d'études poussées. C'est dans le but de compléter cette recherche dans ce domaine que notre étude a été proposée.

L'objectif principal de cette étude est de contribuer à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal en U à fond rugueux pour une seule ouverture contrôlée par un seuil à parois minces.

POSITION DU PROBLEME

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. Il est dit forcé lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle. Le ressaut hydraulique peut évoluer dans des canaux prismatiques ou non prismatiques, à fond lisse ou rugueux.

Pour notre cas il s'agit d'un ressaut contrôlé par seuil mince en canal profilé en 'U' à fond demi-circulaire rugueux. Une rugosité équivalente a été étudiée $\varepsilon = 7,14\text{mm}$.

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, c'est à dire à environ 5 cm de la sortie du convergent, le premier seuil de hauteur s doit être surélevé. Ainsi à chaque valeur du nombre de Froude IF_1 ou du débit relatif Q^* , correspond une longueur L_j du ressaut et L_r du rouleau, ainsi qu'une hauteur h_2 à l'aval du ressaut et une hauteur s du seuil (figure1).

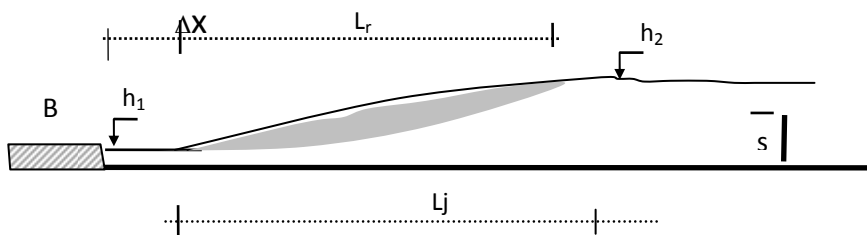


Figure 1 : Ressaut contrôlé par seuil mince. h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, L_r longueur du rouleau de surface, Δx distance séparant la boîte en charge B du pied du ressaut, B boîte en charge.

L'objectif principal de cette étude est d'étudier des relations expérimentales du ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal profilé en 'U' à fond rugueux.

Les caractéristiques adimensionnelles du ressaut, concernées par cette étude sont les suivantes : le nombre de Froude IF_1 ; le débit relatif Q^* ; la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil à paroi mince ; la longueur relative L_j/h_1 du ressaut ; la longueur relative L_j/h_2 du ressaut ; la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$; la hauteur relative amont $y_1 = h_1/D$; la rugosité relative ε/D .

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

- **Description du modèle**

Le canal de mesure qui nous a servi de banc d'essai (photographie 1) est constitué essentiellement d'une rigole demi-circulaire en 'pvc' de 5,67 m de longueur, et de diamètre 24,5 cm sur laquelle est fixée latéralement, d'un côté une tôle en aluminium de 0,50 m de hauteur et de l'autre côté une série de 7 panneaux transparents en Plexiglas permettant les prises de vues et observations. Ces panneaux sont reliés entre eux par collage au chloroforme. Le tout est fixé par boulonnage à une structure métallique rigide. L'étanchéité est assurée par des joints en caoutchouc et par de la silicone.



Photographie 1 : un 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 100 mm de diamètre. Celle-ci est reliée à une boîte métallique fermée, sur laquelle est insérée une ouverture à paroi plane en tôle de largeur déterminée débouchant dans le canal. Le rôle de cette paroi est de générer un écoulement incident à grande vitesse. La section de sortie de celle-ci est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale h_1 du ressaut.

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

L'alimentation du canal s'effectue par le moyen d'une pompe débitant jusqu'à 40 l/s. Le canal de mesure a été conçu au laboratoire 'LARHYSS' de l'Université de Biskra.

• Description des essais

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

L'expérimentation a été menée sous quatre hauteurs initiales ($h_1(\text{cm}) = 2,3; 3,40; 5,2; 6,1$). Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue ($2,3 < IF_1 < 15$).

Des seuils de différentes hauteurs s ont été testés, afin d'observer leur influence sur le contrôle du ressaut ; treize seuils ont ainsi été confectionnés, dont la hauteur s varie entre 3,4 cm et 20cm.

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 (photographie 2.). Le couple de valeur (Q, h_1) permet en outre le calcul du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident. L'accroissement de IF_1 entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation de sa longueur de ressaut L_j . La distance Δx sur laquelle le ressaut s'étend augmente également et pour ramener celui-ci dans sa position initiale, c'est à dire à environ 5 cm de la sortie du convergent, le seuil de hauteur s doit être surélevé. Ainsi à chaque valeur du nombre de Froude IF_1 correspond une valeur de la longueur L_j de ressaut et une valeur de la hauteur s du seuil.

Un échantillon constitué d'une quarantaine de points de mesures expérimentales, pour chaque caractéristique, a permis ainsi d'aboutir à des résultats significatifs. Ces paramètres sont : la rugosité

ε du fond du canal, 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 IF_1 ,

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

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

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

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

- 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 .



Photographie 2 : Ressaut hydraulique en canal profilé en U à fond demi-circulaire rugueux.
a) Vue à l'amont du ressaut. b) Vue à l'aval du ressaut

- **Mode de préparation de la rugosité expérimentée**

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

- Le tamisage du gravier de granulométrie différente est effectué par le moyen d'un tamiseur électrique composé par plusieurs tamis de différent diamètres normalisés variant entre 3 et 9 mm , avec des temps de tamisage fixés en relations avec la gamme de gravier à tamiser (moins de 6 minutes).
- Après l'obtention de la gamme de gravier voulue, ce dernier est lavé puis séché.
- Les gammes choisies, varient entre 3 et 9 mm selon le refus du tamis normalisé. Les particules obtenues sont ensuite uniformément réparties sur une toile en plastique
- (photographie 3.a), puis collées par le moyen d'une colle forte.

(a)



- Enfin, la rugosité équivalente obtenue est : $\varepsilon = 7,14 \text{ mm}$
-



(b)

Photographie 3 : a) Echantillon de grains de gravier de rugosité équivalente $\varepsilon = 7,14 \text{ mm}$ b) Grains de gravier répartis uniformément sur le fond du canal.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

1. Hauteur relative aval y_2 en fonction du débit relatif Q^*

La figure 2 représente la variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction du débit relatif Q^* du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal à fond rugueux, de rugosité relative $\varepsilon/D=0,03$ ($\varepsilon=7,14$ mm), pour 04 valeurs distinctes de y_1 .

Comme pour le ressaut en canal à fond lisse, quatre allures de points de mesures sont visibles, correspondant chacune à une hauteur relative fixe de y_1 . Les traits continus illustrent la courbe théorique issue de l'équation de quantité de mouvement pour les quatre valeurs de y_1 : 0,0939 ; 0,1388 ; 0,2122 et 0,2489.

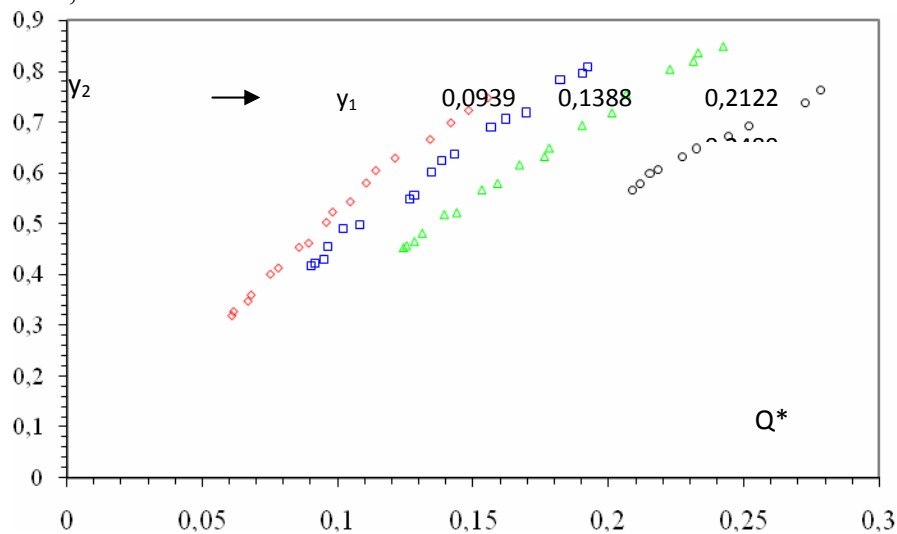


Fig.2. Ressaut hydraulique évoluant en canal à fond rugueux, de rugosité relative $\varepsilon/D = 0,03$
Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction du débit relatif Q^* . Les motifs colorés vides représentent les points de mesures expérimentales. (—) Courbe théorique selon l'équation de la quantité de mouvement, pour les quatre valeurs de y_1 : 0.0939, 0.1388, 0.2122 et 0.2489.

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

La figure 3 illustre quatre allures, correspondant chacune à une valeur bien connue de y_1 . Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés du ressaut contrôlé à fond rugueux.

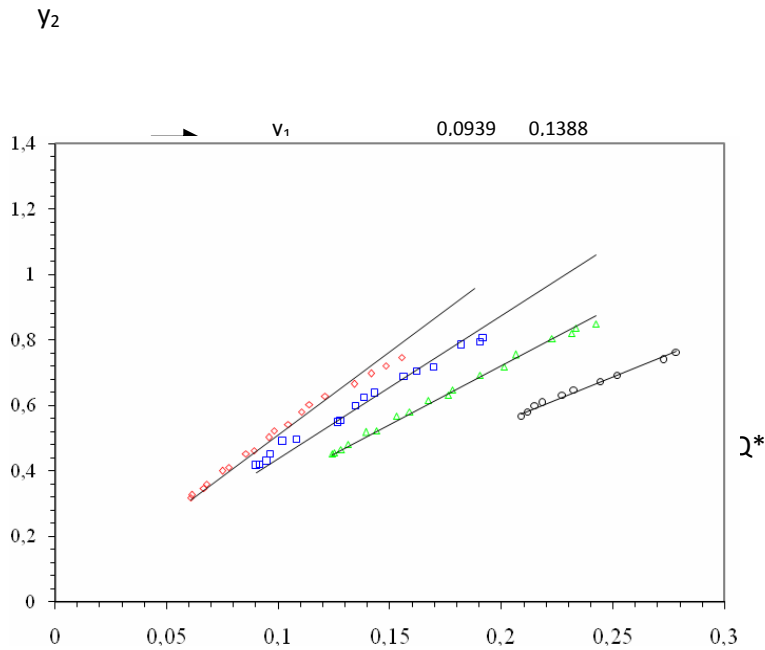


Fig. 3. Ressaut contrôlé en canal à fond rugueux. Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction du débit relatif Q^* , pour les quatre valeurs de y_1 : (\diamond) 0.0939, (\square) 0.1388 (\triangle) 0.2122 et (\circ) 0.2489. (—) Courbes d’ajustement

L’analyse des points de mesures expérimentales, montre clairement que pour chaque valeur de y_1 , un ajustement de type linéaire est possible de la forme : $y_2 = a_3 Q^*$.

Le tableau 1 regroupe les valeurs des coefficients a_3

Tableau 1: Coefficients a_3 des courbes d’ajustements.

$h_1(\text{cm})$	$y_1 = h_1/D$	Coefficient a_3	R^2
2,3	0,0939	5,0929	0,9788
3,4	0,1388	4,3744	0,9722
5,2	0,2122	3,6114	0,9938
6,1	0,2490	2,7536	0,9885

Le tableau 1 montre l’augmentation progressive du coefficient a_3 avec la diminution de la hauteur relative amont y_1 . L’ajustement statistique des couples des valeurs (y_1, a_3) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire d’équation :

$$a_3 = -14,196y_1 + 6,4204,$$

La figure 4 la représente bien.

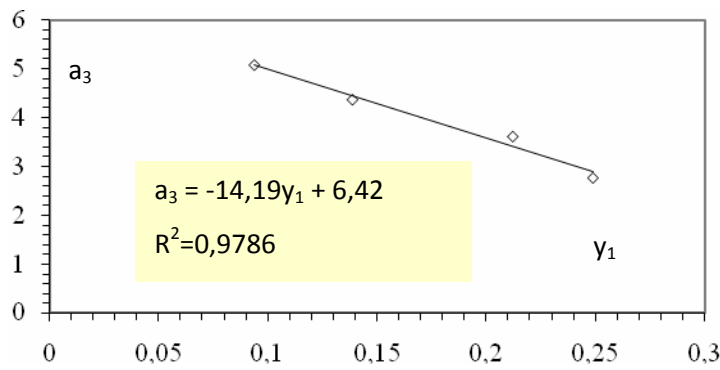


Fig.4. Variation du coefficient a_3 en fonction de la hauteur relative aval y_1

En effet, en remplaçant les coefficients a_3 par son expression dans la relation $y_2 = a_3 Q^*$, l'équation liant la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$ au débit relatif Q^* et à la hauteur relative amont y_1 devient :

$$y_2 = (-14,19y_1 + 6,42) Q^* \quad (1)$$

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

La figure 5 montre que la relation $y_2 = f(Q^*, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice.

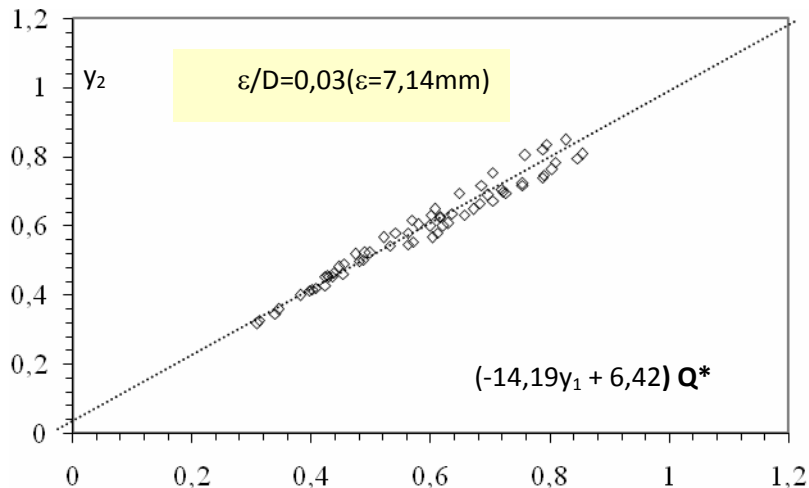


Figure 5 : Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction de (y_1 et Q^*)

(◇)Points expérimentaux du ressaut contrôlé en canal profilé à fond rugueux de rugosité relative $\epsilon/D = 0,03$ (—) Première bissectrice d'équation : $y_2 = (-14,19y_1 + 6,42)Q^*$

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

La figure 6 illustre la représentation graphique de la variation de y_2 en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal à fond rugueux, de rugosité relative $\epsilon/D = 0,03$ ($\epsilon = 7,14\text{mm}$), pour quatre valeurs de y_1 .

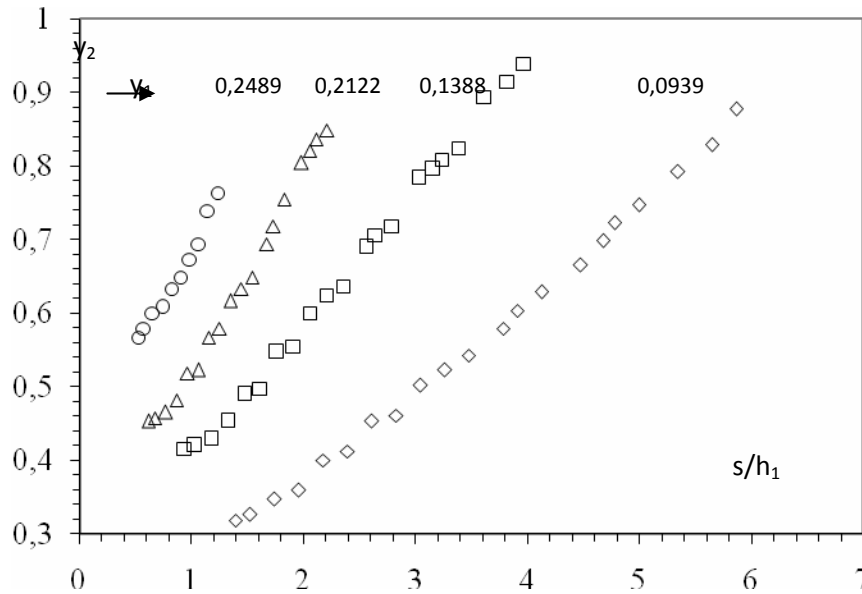


Fig.6. Variation de la hauteur relative aval $y_2=h_2/D$ en fonction de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil, pour quatre valeurs distinctes de y_1 . Les motifs noirs vides représentent les points de mesures expérimentales.

Cette figure montre que les points de mesures du ressaut contrôlé à fond rugueux ($\varepsilon/D=0,03$) sont distincts, pour les quatre valeurs de y_1 . En outre, l'augmentation de la hauteur relative S du seuil entraîne celle de la hauteur relative aval y_2 . On constate également que pour une même valeur de S , y_2 augmente avec l'augmentation de y_1 .

L'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé en canal à fond rugueux, montre que pour chaque valeur de y_1 une courbe de type exponentielle est possible de la forme $y_2 = c_3 \exp[d_3.s/h_1]$, comme le montre bien la figure 7.

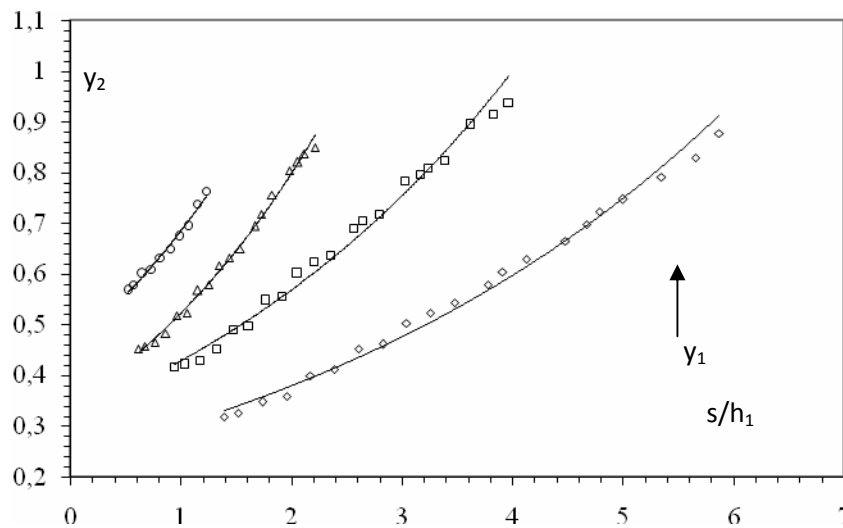


Fig.7.: Ressaut contrôlé en canal profilé en U à fond rugueux. Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil, pour quatre valeurs différents de y_1 : (\diamond) 0,0939, (\square) 0,1388 (Δ) 0,2122 et (\circ) 0,2489. (—) Courbes d'ajustements.

Le tableau 2 regroupe les valeurs des coefficients c_3 et d_3 .

Tableau 2 . Coefficients c_3 et d_3 des courbes d'ajustement

$h_1(\text{cm})$	$y_1 = h_1/D$	Coefficient c_3	Coefficient d_3	R^2
2,3	0,0939	0,2405	0,2272	0,9912
3,4	0,1388	0,322	0,2833	0,988
5,2	0,2122	-	0,4238	0,9948
6,1	0,2490	0,4542	0,4106	0,9862

Le tableau 2 montre clairement que le coefficient c_3 augmente progressivement avec l'augmentation de la hauteur relative amont y_1 . L'ajustement statistique des couples de valeurs (c_3 , y_1) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type puissance : $C_3=1,13y_1^{0,65}$ Celle-ci est schématisée par la figure 8.

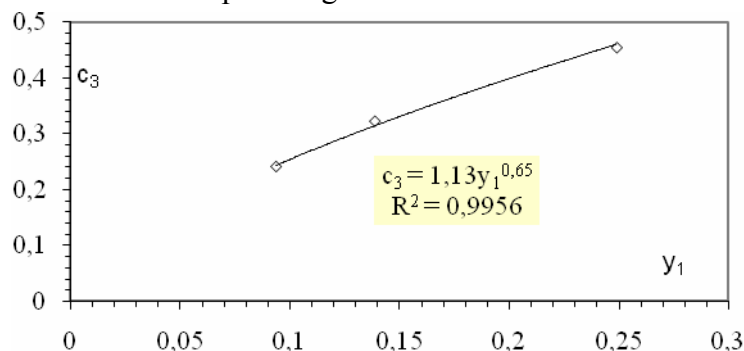


Fig.8. Variation du coefficient c_3 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

Un ajustement des couples de valeurs (d_3, y_1) du tableau 2, donne avec une bonne corrélation, la relation de type puissance suivante : $d_3 = 0,95y_1^{0,61}$
 Cette équation est présentée à la figure 9

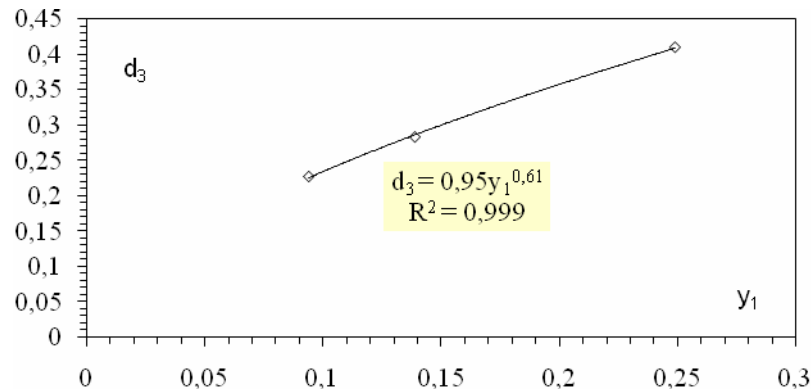


Fig.9. Variation du coefficient d_3 en fonction de la hauteur relative amont y_1 .

En effet, en remplaçant les coefficients de c_3 et d_3 par leurs expressions dans la relation $y_2 = c_3 \exp.(d_3.s/h_1)$, l'équation liant la hauteur relative aval y_2 , la hauteur relative S du seuil et la hauteur relative amont y_1 devient :

$$y_2 = 1,13y_1^{0,65} \exp[0,95y_1^{0,61} .s/h_1] \quad (2)$$

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

La figure 10 montre également que la relation trouvée $y_2 = f(S, y_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice.

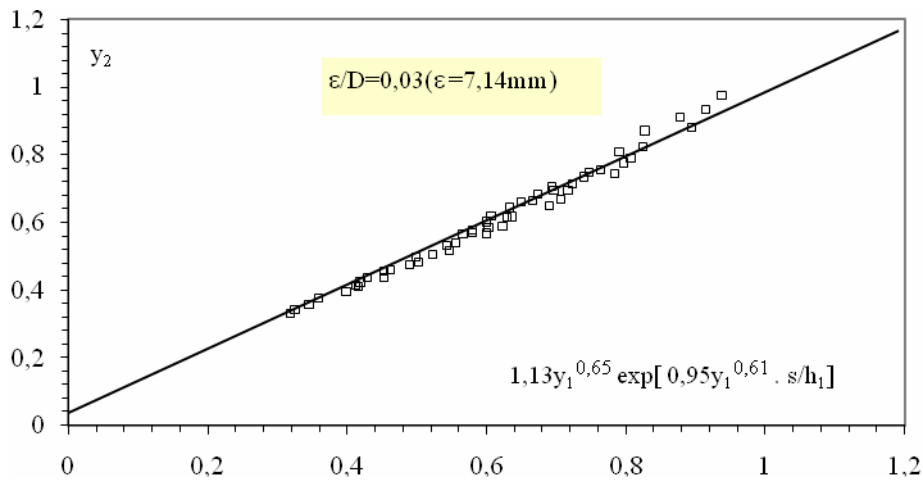


Fig.9. Variation de la hauteur relative aval y_2 en fonction de $f(S, y_1)$. (\diamond) Points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé à fond rugueux. (—) Première bissectrice d'équation $y_2 = 1,13y_1^{0,65} \exp[0,954 y_1^{0,61} . s/h_1]$

3. Longueur Relative L_j/h_1 du Ressaut en Fonction du débit Relatif Q^*

La figure 11 illustre la variation de la hauteur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* , pour quatre valeurs distinctes de la hauteur relative amont y_1 . Les motifs vides noirs et vides colorés représentent les points de mesures expérimentales, respectivement du ressaut ‘à fond lisse’ et du ressaut ‘à fond rugueux’. Il ressort de cette figure, que les points de mesures du ressaut ‘à fond lisse’ se situent bien au-dessus de ceux du ressaut ‘à fond rugueux’.

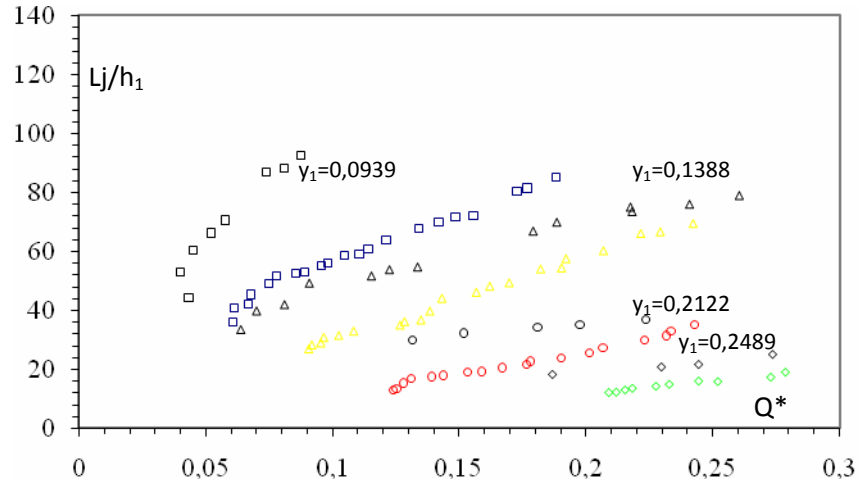


Fig. 11. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* pour quatre valeurs distinctes de y_1 . Les motifs colorés vides représentent les points expérimentaux du ressaut contrôlé en canal à fond rugueux. Les motifs vides noirs représentent le ressaut contrôlé à fond lisse.

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

CONCLUSION

Dans cette étude, l'effet de la rugosité absolue du fond du canal profilé en U, de pente horizontale, sur les caractéristiques du ressaut hydraulique a été examiné. Une seule rugosité absolue a été testée.

En premier temps, l'étude s'est intéressée à la variation de la hauteur relative aval $y_2=h_2/D$ du ressaut en fonction du débit relatif Q^* de l'écoulement incident pour quatre ouvertures différentes. Il a été observé que pour une valeur du débit relatif Q^* , l'augmentation de la rugosité absolue entraîne la diminution de la hauteur relative aval. En outre, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales a montré que, pour une rugosité absolue testée de valeur absolue $\varepsilon =7,14\text{mm}$, la hauteur relative aval h_2/D était liée au débit relatif Q^* par la loi de type linéaire [Equation 1].

Dans un second temps, l'étude s'est intéressée à la variation de la hauteur relative aval $y_2=h_2/D$ du ressaut en fonction de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ pour quatre ouvertures différentes. Il a été observé que pour l'augmentation de la hauteur relative S du seuil entraîne celle de la hauteur relative aval y_2 . On constate également que pour une même valeur de S , y_2 augmente avec l'augmentation de y_1 .

En outre, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales a montré que, pour une rugosité absolue testée de valeur absolue $\varepsilon = 7,14\text{mm}$, la hauteur relatif aval h_2/D était lié à la hauteur relative du seuil par la loi de type exponentielle [Equation 2].

En dernier temps, l'étude s'est intéressée à la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du débit relatif Q^* de l'écoulement incident pour une rugosité relative ($\varepsilon/D=0,03$) et pour quatre valeurs distinctes de la hauteur relative amont $y_1=h_1/D$. Les motifs vides noirs et vides colorés représentent les points de mesures expérimentales, respectivement du ressaut 'à fond lisse' et du ressaut 'à fond rugueux'. Il ressort de cette figure, que les points de mesures du ressaut 'à fond lisse' se situent bien au-dessus de ceux du ressaut 'à fond rugueux'.

Finalement, on peut conclure, que pour une gamme des débits relatif Q^* , le ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en 'U' à fond rugueux, présente un effet réducteur de la longueur de ressaut et une hauteur aval moindre que son homologue à fond lisse.

Principales Notations

d, D	Diamètres, largeur du canal	[m]
D_h	Diamètre hydraulique	
IF_1	Nombre de Froude à l'amont du ressaut	[-]
g	Accélération de la pesanteur[m/s ²]	
h	Profondeur d'écoulement	[m]
h_1	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h_2	Hauteur finale du ressaut	[m]
L_j	Longueur du ressaut	[m]
L_r	Longueur du rouleau	[m]
L_j^*	Longueur du ressaut classique	[m]
L_r^*	Longueur du rouleau classique	[m]
P	Pression [N/m ²]	
Q	Débit volume[m ³ /s]	
Q^*	Débit relatif	[-]
R_h	Rayon hydraulique	[m]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
s	Hauteur d'un seuil	[m]
V	Vitesse d'écoulement	[m/s]
y_1	hauteur relative amont du ressaut (h_1/D)	[-]
y_2	hauteur relative aval du ressaut (h_2/D)	[-]
δ	Perte de charge relative ($\Delta H/h_c$)	[-]
ϖ	Poids spécifique[N/m ³]	

REFERENCES

- [1] Achour B., Debabeche M., Ressaut contrôlé par seuil dans un canal profile en U. Journal of hydraulic research.2003, 46, 97-103
- [2] Debabeche M., Achour B., Ressaut hydraulique classique en canal profilé en "U". 1^{ER} Séminaire Sur L'eau, Université de Mascara, 2000.
- [3] Debabeche M., Kateb S., Ghomri A., Etude du Ressaut Hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses. Journal of hydraulic research.2006, 05,187-196
- [4] Ghomri A., Debabeche M., Riguet F., L'étude Semi-théorique du ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en U, à fond rugueux. Revues des sciences fondamentales et appliquées.2009,01,41-56
- [5] Hager W.H., Der Ablufss im U-Profil. Korrespondenz Abwasser, 1987, 34(5), 468-482.
- [6] Hager W.H., Hydraulic jump in U-channel, Proc. ASEC, J. Hydraulic Engineering .1989, 115, 667-675
- [7] Rajartnam N., Hydraulic jumps on rough beds, Transaction of the engineering institute of Canada, 1968, 11, N° A-2,
- [8] Achour B. (1998) Dissipation d'énergie par ressaut, thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou.
- [9] Debabeche M. (2003).Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, Université de Biskra.