



## **ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRIANGULAIRE A PAROIS RUGUEUSES**

***M. DEBABECHE, S. KATEB, A. GHOMRI***

Laboratoire de recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS)  
Université de Biskra, BP 145 RP 07000 Biskra, Algérie.  
Email : mahmoud.debabeche@larhyss.net

### **INTRODUCTION**

Les ouvrages de retenue, tels que les barrages hydrauliques, sont souvent soumis à de fortes crues. En périodes de crues, la retenue étant pleine, l'eau est restituée à travers un évacuateur de crue vers la rivière. Le lit de la rivière se trouve alors confronté à un écoulement torrentiel à forte énergie cinétique. Celle-ci engendre des forces tractrices néfastes par leur caractère érosif. Afin d'éviter d'importantes modifications du lit de la rivière situé à l'aval du barrage, il est nécessaire de dissiper cette énergie. Le moyen le moins onéreux et le plus pratique est certainement le ressaut hydraulique. Le principe consiste à transformer l'écoulement torrentiel en un écoulement fluvial engendrant une diminution des forces tractrices.

Du point de vue pratique, ce sont surtout les dimensions géométriques du bassin de dissipation qui intéressent l'Ingénieur hydraulicien. Ces dimensions sont étroitement liées aux caractéristiques du ressaut et à la forme géométrique du canal dans le quel il évolue.

Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire n'a connu que très peu d'études. Les travaux les plus intéressants dans ce domaine sont ceux de Hager et Wanoschek (1987) concernant le ressaut hydraulique classique du type A, évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale et à angle d'ouverture de 90°, ainsi que ceux, plus récents, de Achour et Debabèche (2003) qui ont effectué une étude expérimentale sur le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince et épaisse.

Par ailleurs, à ce jour, il y a très peu de documentation traitant de l'effet de la rugosité des parois du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique. Nous pouvons citer les travaux de Rajaratnam (1968; 2002) relatifs au ressaut hydraulique en canal rectangulaire à fond rugueux et ondulé, ainsi que ceux de Ghamri (2005) relatifs au ressaut hydraulique en canal profilé en U à fond rugueux.

La présente étude s'intéresse à l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ , à parois rugueuses. Nous présenterons à travers cette étude, des relations fonctionnelles liant la rugosité des parois du canal aux caractéristiques du ressaut hydraulique.

## PROCEDURE EXPERIMENTALE

### Déroulement des essais

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ , à parois rugueuses. Quatre valeurs de la rugosité absolue ont été testées :  $\varepsilon$  (mm) = 4,53; 6,04; 7,11; 8,73.

L'expérimentation a été menée sous sept hauteurs initiales de l'écoulement :  $h_1$  (mm) = 18; 25; 30; 34; 40; 44; 51. Une large gamme du nombre de Froude incident a été ainsi obtenue, correspondant à  $4 < F_1 < 24$ .

La formation du ressaut contrôlé est conditionnée par la mise en place d'un seuil à l'aval de l'écoulement. A cet effet, des seuils de différentes hauteurs ont été utilisés.

Pour une hauteur  $s$  de seuil placée 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  $(Q, h_1)$  permet en outre le calcul du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour la valeur donnée de l'angle d'ouverture du canal triangulaire testé. L'accroissement de  $F_1$  entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation de sa longueur  $L_j$ . Ainsi, à chaque valeur du nombre de Froude  $F_1$  correspond une valeur de la longueur  $L_j$  de ressaut ainsi qu'une valeur de la hauteur  $s$  du seuil. Un échantillon constitué d'une soixantaine de points de mesures expérimentales, pour chacune des valeurs de la rugosité absolue testées, a permis ainsi d'aboutir à des résultats significatifs.

Les caractéristiques hydrauliques et géométriques qui intéressent la présente étude expérimentale sont : le débit volume  $Q$ , la hauteur  $h_1$  de l'écoulement incident, la hauteur finale  $h_2$  du ressaut, la longueur  $L_j$  de celui-ci et la rugosité absolue  $\varepsilon$  des parois du canal. En outre, l'attention est portée sur l'évolution des paramètres adimensionnels suivants :

- i. Le nombre de Froude  $F_1$  tel que :

$$F_1^2 = 2Q^2 / (gm^2 h_1^5)$$

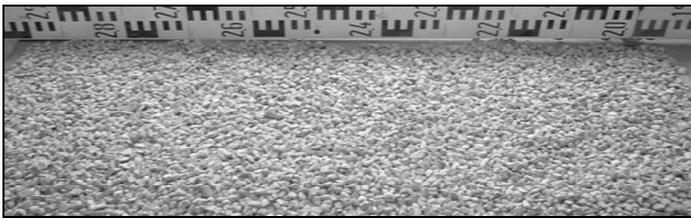
où  $m$  désigne la cotangente de l'angle d'inclinaison, par rapport à l'horizontale, des parois du canal triangulaire testé, soit  $m = \cotg(45^\circ) = 1$ .

- ii. La longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut.
- iii. le rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées du ressaut.

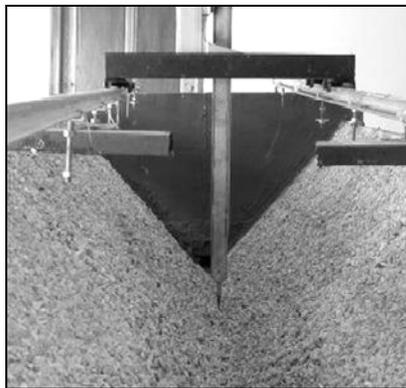
### **Description du mode de préparation de la rugosité des parois**

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

- i.* Le tamisage du gravier de granulométrie variée est effectué au moyen d'un appareil électrique de tamisage "la tamiseuse", composé de plusieurs tamis de différents diamètres normalisés. Le temps de tamisage est choisi selon la gamme de gravier à tamiser, mais ne dépassant pas cinq minutes.
- ii.* Après l'obtention de la gamme voulue de gravier, ce dernier est lavé puis séché.
- iii.* La gamme choisie varie entre 4 et 12,50mm, selon le refus du tamis normalisé. Les particules obtenues sont ensuite uniformément réparties sur une toile en plastique (Photographie 1), puis collées au moyen d'une colle forte "BECTA 10000".
- iv.* A la fin de la préparation de la toile rugueuse, la valeur de la rugosité équivalente est estimée par un appareil numérique de mesure dit "Palmer", de précision 0,001mm.
- v.* La toile rugueuse obtenue est ensuite soigneusement collée sur les deux parois du canal triangulaire (Photographie 2).



Photographie 1 : Echantillon de toile rugueuse de rugosité absolue  $\varepsilon = 8,73\text{mm}$



Photographie 2 : Toile rugueuse soigneusement collée sur les deux parois du canal triangulaire

## RESULTATS EXPERIMENTAUX

### Longueur relative $L_j/h_1$ fonction du nombre de Froude $F_1$

La Figure 1 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 les quatre rugosités absolues testées.

Quatre nuages de points distincts sont ainsi perceptibles, correspondant chacun à une rugosité absolue  $\varepsilon$ . Nous pouvons constater que pour une rugosité absolue donnée, l'augmentation du nombre de Froude  $F_1$  engendre celle de la longueur relative du ressaut. En outre, pour une valeur donnée du nombre de Froude  $F_1$ , l'augmentation de la rugosité absolue provoque la diminution de la longueur relative du ressaut.

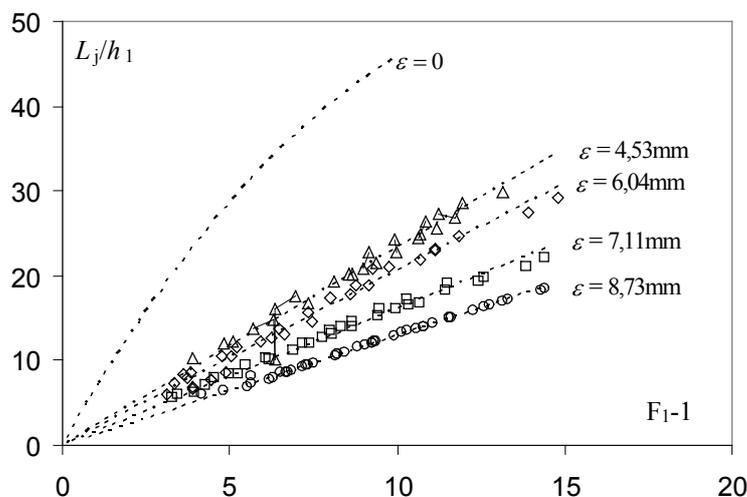


Figure 1 : Variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  en fonction du nombre Froude  $F_1$ , pour quatre valeurs de la rugosité absolue  $\varepsilon$ .  
(- - -) Courbes d'ajustements.

Par ailleurs, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés non linéaires, a montré que pour chacune des rugosités absolues testées, la longueur relative  $L_j/h_1$  est linéairement dépendante de  $F_1$  selon la relation :

$$L_j / h_1 = a(F_1 - 1) \quad (1)$$

Le tableau 1 regroupe les valeurs du coefficient  $a$  ainsi que celles du coefficient de corrélation  $R^2$  issues de l'ajustement effectué.

Tableau 1: Valeurs du coefficient  $a$  de la relation (1)

| $\varepsilon$ (mm) | $a$  | $R^2$ |
|--------------------|------|-------|
| 4,53               | 2,34 | 0,96  |
| 6,04               | 2,06 | 0,98  |
| 7,11               | 1,61 | 0,99  |
| 8,73               | 1,30 | 0,99  |

Le tableau 1 montre ainsi que le coefficient  $a$  diminue avec l'augmentation de la rugosité absolue  $\varepsilon$  et La variation de  $a(\varepsilon)$  est représentée graphiquement sur la figure 2.

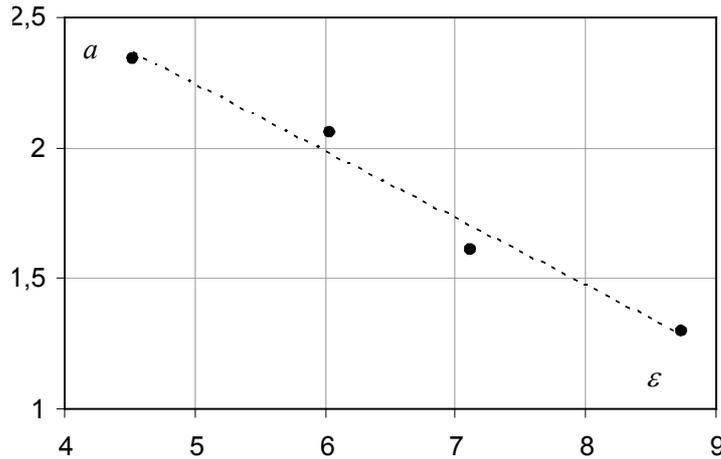


Figure 2. : Variation du coefficient  $a$  de la relation (1) en fonction de la rugosité absolue  $\varepsilon$

L'ajustement statistique des couples de valeurs  $(\varepsilon, a)$ , par la méthode des moindres carrés, a permis d'écrire :

$$a = 3,53 - 0,26\varepsilon \quad (2)$$

En éliminant le coefficient  $a$  entre les relations (1) et (2), nous pouvons alors écrire :

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

La relation (3) est applicable dans la gamme  $4,53\text{mm} \leq \varepsilon \leq 8,73\text{mm}$ .

La figure 3 montre la variation de la fonction  $L_j/h_1 = \xi(\varepsilon, F_1)$  exprimée par la relation (3) en fonction des valeurs expérimentales de la longueur relative  $(L_j/h_1)_{\text{Exp}}$ . Ainsi, les points obtenus se répartissent autour de la première bissectrice, confirmant alors que  $(L_j/h_1)_{\text{Exp}}$  est raisonnablement définie par la relation (3).

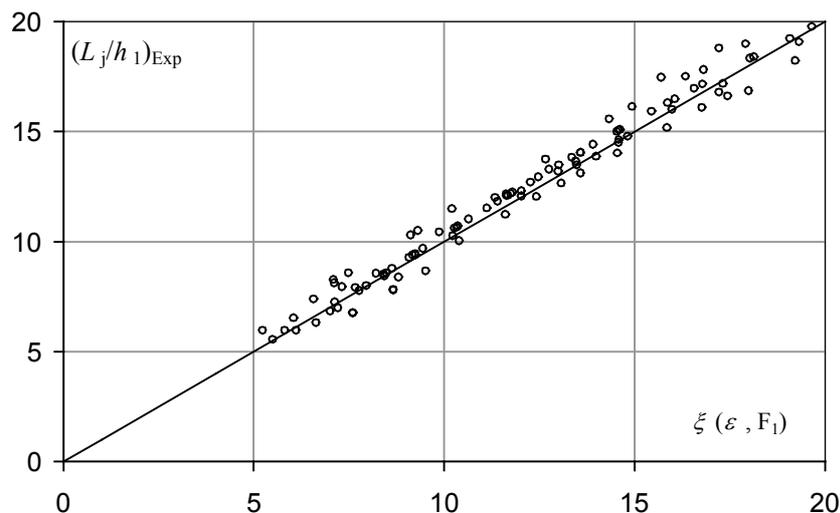


Figure 3 : Variation de la longueur relative expérimentale  $(L_j/h_1)_{Exp}$  en fonction de  $\xi(\epsilon, F_1)$  exprimée par la relation (3).

(o)  $(L_j/h_1)_{Exp}$  du ressaut contrôlé dans un canal à parois rugueuses.

(—) Première bissectrice

### Rapport $Y$ des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude $F_1$

La figure 4 représente la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude incident  $F_1$ , pour les quatre rugosités absolues testées. Nous pouvons ainsi observer que, pour toutes les rugosités, l'augmentation du nombre de Froude incident  $F_1$  entraîne celle du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées.

L'influence de la rugosité des parois du canal sur le rapport  $Y$  est clairement mise en évidence par la figure 4, puisque pour la même valeur du nombre de Froude incident  $F_1$ , l'augmentation de la rugosité absolue  $\epsilon$  engendre la diminution du rapport  $Y$ .

La figure 4 montre quatre nuage de points, correspondant chacun à une valeur donnée de la rugosité absolue  $\epsilon$ . Les traits discontinus représentent l'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés non linéaires. Nous avons également représenté sur la figure 4, la variation  $Y(F_1)$  correspondant à une rugosité absolue  $\epsilon \rightarrow 0$  ou pouvant être considérée comme telle en raison de la nature pratiquement lisse des parois du canal triangulaire. La courbe a été tracée selon la relation de Hager et Wanoschek (1987), issue de l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut et telle:

$$Y = \frac{2Y^2(Y^2 + Y + 1)}{3(Y + 1)} \quad (4)$$

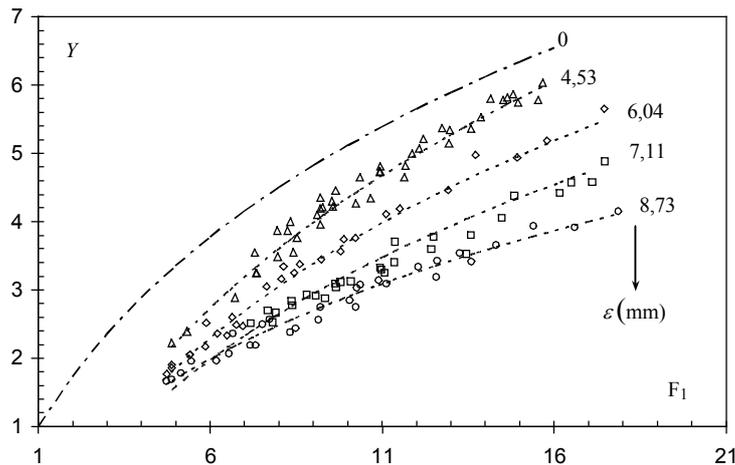


Figure 4 : Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de  $F_1$ , pour les quatre valeurs testées de la rugosité absolue  $\varepsilon$ .  
(- - -) : Courbes d'ajustement.

(—●—) :  $Y(F_1)$  pour  $\varepsilon \rightarrow 0$  (Hager et Wanoschek, 1987)

Les mesures expérimentales ont été soumises à une analyse statique basée sur la méthode des moindres carrés non linéaires. Il a été observé que, pour chacune des rugosités absolues testées, le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut est lié au nombre de Froude incident  $F_1$  par une loi de type logarithmique d'équation :

$$Y = b \ln\left(\frac{F_1 + 4}{5}\right) + c \quad (5)$$

Le tableau 2 regroupe les valeurs des coefficients  $b$  et  $c$ , ainsi que les coefficients de corrélation  $R^2$  issues de l'ajustement.

Tableau 2 : Valeurs des coefficients  $b$  et  $c$  de la relation (5)

| $\varepsilon$ (mm) | $b$  | $c$   | $R^2$ |
|--------------------|------|-------|-------|
| 4,53               | 4,82 | -0,60 | 0,98  |
| 6,04               | 4,22 | -0,60 | 0,98  |
| 7,11               | 3,70 | -0,60 | 0,95  |
| 8,73               | 2,74 | -     | 0,97  |

Le tableau 2 montre que le coefficient  $b$  diminue avec l'augmentation de la rugosité absolue  $\varepsilon$ . L'ajustement des couples de valeurs  $(\varepsilon, b)$  par la méthode des moindres carrés (Figure 5) a permis d'écrire une relation de type linéaire d'équation :

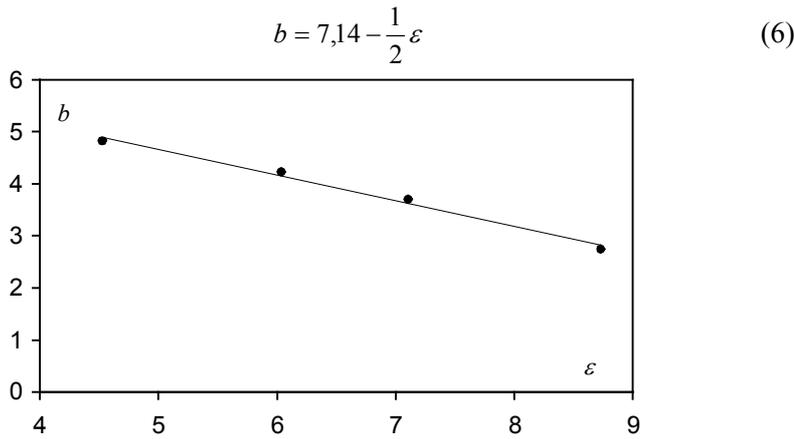


Figure 5 : Variation du coefficient  $b$  de la relation (5) en fonction de la rugosité absolue  $\varepsilon$   
 (—) Courbe d'ajustement tracée selon la relation (6)

Le tableau 2 montre également que le coefficient  $c$  ne dépend pas de la rugosité absolue  $\varepsilon$  et qu'il prend une valeur constante telle que :

$$c = -\frac{3}{5} \quad (7)$$

Ainsi, en tenant compte des équations (6) et (7), la relation (5) s'écrit :

$$Y = (7,14 - \frac{1}{2} \varepsilon) \text{Ln} \left( \frac{F_1 + 4}{5} \right) - \frac{3}{5} \quad (8)$$

La relation (8) est applicable dans la gamme  $4,53\text{mm} \leq \varepsilon \leq 8,73\text{mm}$ .

La variation de  $Y = \Phi(F_1, \varepsilon)$  exprimé par la relation (8) est représentée graphiquement sur la figure 6 en fonction des valeurs expérimentales  $Y_{\text{Exp}}$ .

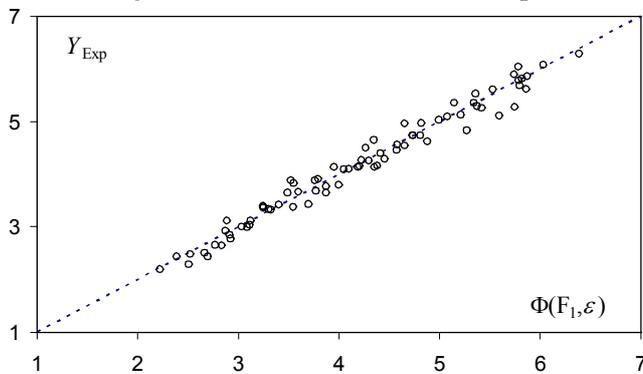


Figure 6 : Variation  $Y_{\text{Exp}}$  en fonction de  $\Phi(F_1, \varepsilon)$ . (- -) : Première bissectrice

La figure 6 montre clairement que les points obtenus se répartissent autour de la première bissectrice, ce qui confirme la fiabilité et la validité de la relation (8).

## CONCLUSION

Dans cette étude, l'effet de la rugosité absolue des parois d'un canal triangulaire, à angle d'ouverture de  $90^\circ$  et à pente horizontal, sur les caractéristiques du ressaut hydraulique a été examiné. Quatre valeurs de la rugosité absolue ont été testées.

Dans un premier temps, l'étude s'est intéressée à la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. Il a été observé que pour une valeur donnée du nombre de Froude incident, l'augmentation de la rugosité absolue entraîne la diminution de la longueur relative du ressaut. En outre, l'analyse statistique des points de mesures a montré que, pour chacune des rugosités absolues testées, la longueur relative  $L_j/h_1$  était liée au nombre de Froude  $F_1$  par une loi linéaire [Equation (3)].

Dans un second temps, la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude incident  $F_1$  a été examinée sous l'effet de chacune des rugosités absolues testées. Nous avons pu observer que, pour une même valeur du nombre de Froude  $F_1$ , l'augmentation de la rugosité absolue engendre la diminution du rapport  $Y$ . La variation  $Y(F_1, \varepsilon)$  a été modélisée par une loi de type logarithmique [Equation (8)], issue de l'analyse statistique des points de mesures expérimentales.

## PRINCIPALES NOTATIONS

|               |   |
|---------------|---|
| $F_1$         | nombre de Froude de l'écoulement incident                             |
| $g$           | accélération de la pesanteur  |
| $h_1$         | hauteur initiale du ressaut hydraulique                               |
| $h_2$         | hauteur finale du ressaut hydraulique                                 |
| $L_j$         | longueur du ressaut hydraulique                                       |
| $m$           | $\cotg(\theta)$   |
| $Q$           | débit volume  |
| $Y$           | rapport des hauteurs conjuguées du ressaut                            |
| $\varepsilon$ | rugosité absolue  |
| $\theta$      | angle d'inclinaison des parois d'un canal par rapport à l'horizontale |

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACHOUR, B., DEBABECHE, M. (2003). Ressaut Hydraulique Contrôlé par Seuil en Canal Triangulaire, *J. Hydraul. Res., AIRH* 41(3), 319–325.
- DEBABECHE, M. (2003). Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques, Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences Hydrauliques, Département d'Hydraulique, Université de Biskra.

- GHOMRI, A. (2005). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant en canal profilé en U, Mémoire de Magister en Sciences Hydrauliques, Département d'Hydraulique, Université de Biskra.
- HAGER, W.H., WANOSCHEK, R. (1987). Hydraulic Jump in Triangular Channel. *J. Hydraulic Res., IAHR* 25(5), 549–564.
- RAJARATNAM, N., (1968). Hydraulic jumps on rough beds, *Transaction of the engineering institute of Canada*, 11(A-2).
- RAJARATNAM, N., (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds, *J. Hydraul. Engng., ASCE* 128(7), 656-336.