



EFFET DE LA MARCHE POSITIVE SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRIANGULAIRE

LAKEHAL M.¹, DEBABECHE M.², MANSRI N.³

¹ Docteur, département d'hydraulique, Université de M'sila.

² Professeur au département d'hydraulique, Laboratoire LARHYSS, Université de Biskra.

³ Magister en Hydraulique, université de Biskra.

RESUME

L'étude se propose d'analyser expérimentalement, les caractéristiques du ressaut hydrauliques forcé par marche positive, évoluant dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90°. L'objectif principal de cette étude est de trouver les relations fonctionnelles, exprimées en termes adimensionnels, liant ces caractéristiques. Une étude comparative avec l'approche de *Debabèche* et *Achour* (2007) sera également proposée.

Mots clés : Ressaut hydraulique, marche positive, canal triangulaire, bassin de dissipation.

ABSTRACT

The study proposes to analyze experimentally, the futures of the forced hydraulic jump by positive step, evolving in a triangular channel of 90° central angle. The study's main objective is to find empirical relationships, expressed in non-dimensional terms, relating characteristics of this kind of jump. A comparative study with the approach of *Debabèche* and *Achour* (2007) will be also proposed.

Keywords : Ressaut hydraulique, marche positive, canal triangulaire, bassin de dissipation.

INTRODUCTION

Le ressaut hydraulique contrôlé et forcé par seuil dans un canal rectangulaire a été largement étudié auparavant. Nous pouvons citer, entre autres, *Rand* (1965) et *Rajaratnam* et *Murahari* (1971). *Hager* et *Bretz* (1988) ont étudiés les différentes configurations de ressaut sous l'effet du seuil. Le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive n'a connu que très peu d'attention. Les recherches les plus connues dans ce domaine, sont certainement celles de *Forster* et *Skrinde* (1950), et celles de *Hager* et *Sinniger* (1985). Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire a connu très peu d'études relativement à son homologue rectangulaire. La revue de la littérature montre que les études les plus récentes sont celles de *Hager* et *Wanoschek* (1987) relatives au ressaut classique, *Achour* et *Debabeche* (2003) concernant le ressaut contrôlé par seuil et plus récemment l'étude de *Debabeche* et *Achour* (2007) ayant trait à l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire.

POSITION DU PROBLEME

Les principales caractéristiques étudiées dans un ressaut hydraulique provoqué par marche positive sont : le débit volume Q , la profondeur initiale h_1 , la profondeur finale h_2 , la hauteur s de la marche, la longueur L_r du rouleau, la position L_s de la marche. Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le nombre de *Froude* de l'écoulement incident $F_1 = [2Q^2/gm^2h_1^5]^{1/2}$, le rapport $Y = h_2/h_1$ des profondeurs conjuguées du ressaut, la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive, la longueur relative $\lambda_r = L_r/h_1$ du ressaut, la position relative de la marche $\lambda_s = L_s/h_1$. En effet, le ressaut hydraulique est considéré de type contrôlé lorsque le rapport $L_s/L_r > 1$ et il est dit forcé de type A lorsque ce dernier rapport est égal à l'unité (Figure 1). Ce dernier type de ressaut a été défini ainsi en vertu de la classification de *Hager* et *Bretz* (1986) pour le cas du canal rectangulaire. Notons que le canal triangulaire n'est pas très approprié pour les bassins de dissipation, mais trouve quelques intérêts pratiques dans les raies d'irrigation. En effet, la capacité du ressaut hydraulique à surélever le plan d'eau aval est utilisée pour l'amorçage des siphons. La littérature montre que la marche positive procure la stabilité du ressaut, son efficacité et sa compacité.

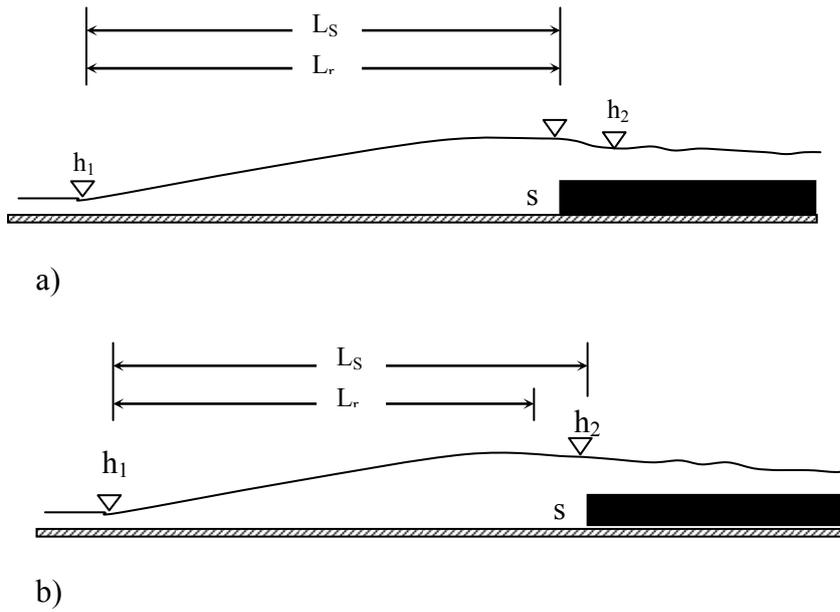


Figure 1 : Schéma du ressaut hydraulique provoqué par marche positive : a) forcé de type A et b) contrôlé.

Les mesures expérimentales du ressaut hydraulique forcé par marche positive ont été effectuées, dans un canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° , de 3m de longueur. L'expérimentation a été menée sous sept hauteurs initiales : $h_1(\text{mm}) = 18, 25, 30, 34, 40, 44, \text{ et } 51$. Une large gamme des nombres de *Froude* incidents a été ainsi obtenue : $2 < F_1 < 20$. La formation du ressaut est conditionnée par la mise en place d'une marche positive en travers de l'écoulement ; pour cela 12 marches ont été confectionnées et testées, de hauteur géométrique allant de 38 à 140 mm et d'une longueur $L_0 = 1$ m.

La photographie 2 illustre une photographie du ressaut hydraulique forcé de type A par marche positive en canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° , pour une profondeur initiale $h_1 = 51$ mm et à débit volume croissant.



Figure 2 : Photographie d'un ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive.

$F_1 = 12.08, s = 14 \text{ cm}, L_s = 160,2 \text{ cm}, h_2 = 20.01 \text{ cm}$

Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure 3 représente la variation de (Y_A-1) en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, tel que $Y_A = (h_2+s)/h_1$ est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut de type A. La courbe en trait continu représente la relation $Y_A-1=f(F_1)$, qui est exprimée par la relation (1).

La représentation graphique des points expérimentaux des rapports Y_A en fonction du nombre de Froude F_1 a abouti à une courbe unique :

$$Y_A - 1 = 3,41 \text{Ln} \left(\frac{F_1 + 4}{5} \right) \quad (1)$$

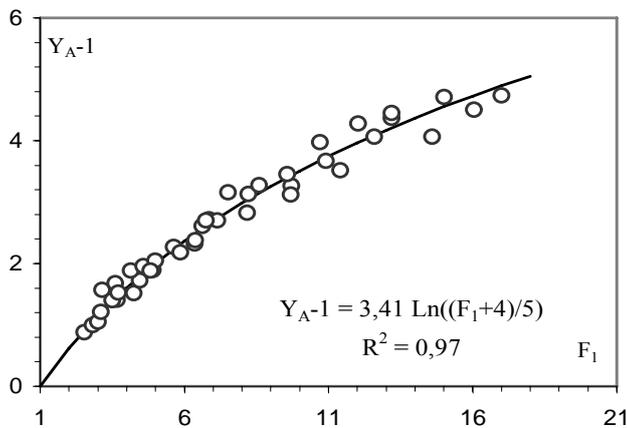


Figure 3 : Variation expérimentale de $(Y_A - 1)$ en fonction du nombre de Froude F_1 , pour le ressaut de type A. (o) points expérimentaux. (—) Courbe selon l'équation (1).

Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de Froude

L'analyse des mesures expérimentales a également montré, que la fonction $s/h_1=f(F_1)$ est de type logarithmique:

$$S_A = s / h_1 = 2,94 \text{Ln} \left(\frac{F_1 + 4}{5} \right) \quad (2)$$

"Ln" désigne le logarithme népérien et la fonction a été ajustée de telle sorte que : $F_1 = 1$ donne $S_A = 0$.

Sur la figure 4 sont représentées à la fois les mesures expérimentales de la hauteur relative S_A de la marche positive en fonction de F_1 et la courbe expérimentale en trait continu traduisant la variation de la hauteur relative S_A de

la marche positive du ressaut nécessaire pour avoir un ressaut de type A.

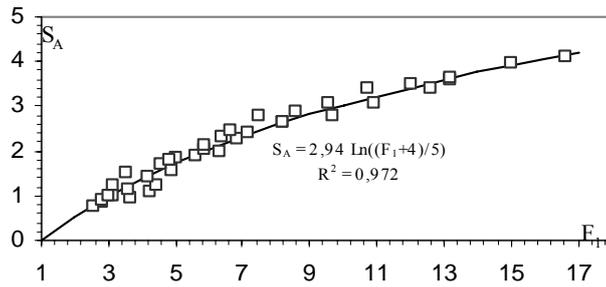


Figure 4 : Variation de la hauteur relative S_A du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 . (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon l'équation (2).

Comme pour le cas du ressaut contrôlé par marche positive, on a établi une relation unique reliant la hauteur relative S_A de la marche positive et le rapport des hauteurs conjuguées Y_A du ressaut de type A.

La représentation graphique de la relation $Y_A - 1 = f(S_A)$ a abouti à une courbe unique, comme l'indique la figure 5. Un ajustement linéaire a permis d'écrire que :

$$Y_A = 1 + 1,16 S_A \quad (3)$$

Pour l'ajustement de cette droite, on a pris en considération la condition : $S_A = 0 \Rightarrow Y_A = 1$.

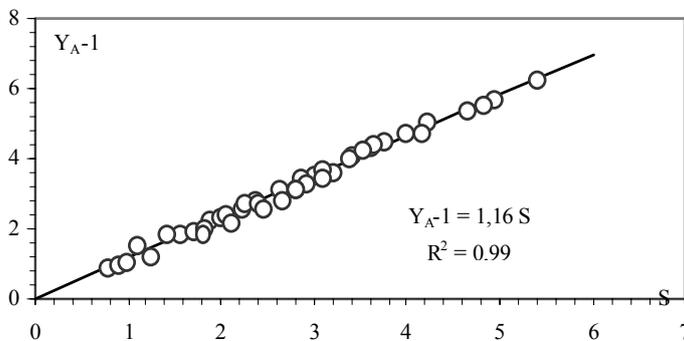


Figure 5 : Variation de $(Y_A - 1)$ en fonction de la hauteur relative S_A de la marche positive. (o) Points expérimentaux. (—) Droite d'équation : $Y_A - 1 = 1,16 S_A$.

La droite (3) peut également être retrouvée, en faisant le rapport des équations (1) et (2) :

$$\frac{(Y_A - 1)}{S_A} = \frac{3,41}{2,94} \approx 1,16$$

d'où $Y_A = 1,16 S_A + 1$

Position relative de la marche positive

Comme pour le cas du ressaut contrôlé par marche positive, nous avons établi une relation générale pour le ressaut de type A. Cette relation peut également s'écrire sous la forme $\phi(S_A, F_1, \lambda_r)=0$, tels que $S_A=s/h_1$ et $\lambda_r=L_r/h_1$. Pour le ressaut de type A, la position L_s de la marche correspond à la longueur L_r du rouleau de surface. L'analyse des mesures expérimentales obtenues a montré que la meilleure représentation graphique adimensionnelle de la fonction ϕ est celle indiquée par la figure 6. Les points expérimentaux se situent sur une droite d'équation : $S_A+F_1^{0.4}=c \lambda_r+d$. Les valeurs des constantes c et d ont été obtenues par un ajustement linéaire.

L'analyse des mesures expérimentales a montré que les trois variables adimensionnelles F_1 , S_A et λ_r intervenant au phénomène sont liées par la relation (4) :

$$S_A + F_1^{0.4} = 0,14 \lambda_r + 0,82 \tag{4}$$

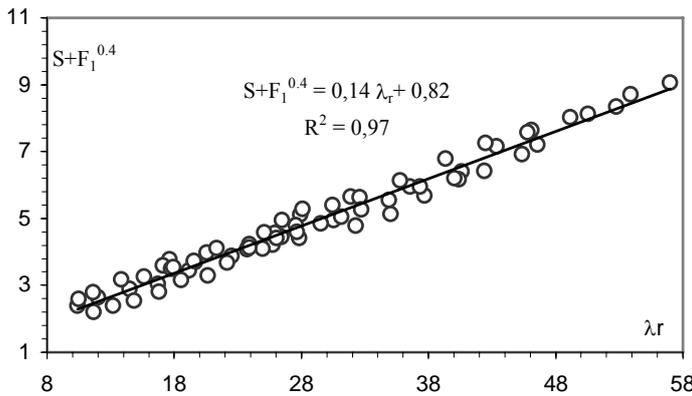


Figure 6 : Variation de $(S_A + F_1^{0.4})$ en fonction de la position relative $\lambda_r=L_r/h_1$ de la marche positive. (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (4).

Longueur relative du bassin

Une relation générale a été également établie entre la longueur relative λ_B du bassin, la hauteur relative S_A de la marche positive et le nombre de Froude F_1 . La longueur L_B étant la distance qui sépare le pied du ressaut de l'aval du rouleau où s'effectue la mesure de la profondeur conjuguée h_2 .

Sur la figure 7 sont représentées à la fois les mesures expérimentales et la courbe expérimentale en trait continu traduisant la variation de $(S_A + F_1^{0.4})$ en fonction de la longueur relative $\lambda_B = L_B/h_1$ de la marche positive, du ressaut type A.

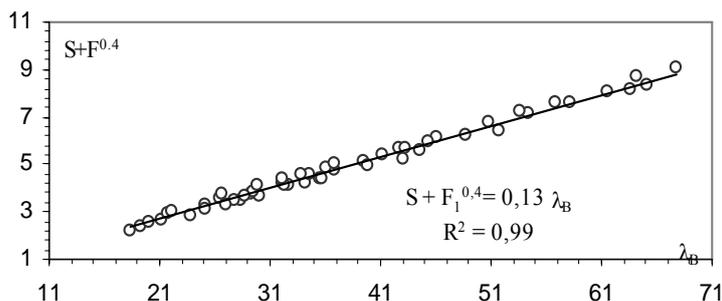


Figure 7 : Variation de $(S_A + F_1^{0.4})$ en fonction de la longueur relative $\lambda_B = L_B / h_1$ de la marche positive. (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (5).

L'analyse statistique des mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés non linéaire a montré que les trois variables adimensionnelles F_1 , S_A et λ_B intervenant au phénomène sont liées par la relation (5) :

$$S_A + F_1^{0.4} = 0,13 \lambda_B \quad (5)$$

ÉTUDE COMPARATIVE

Cette présente étape de notre étude expérimentale, consiste à faire une étude comparative entre le ressaut contrôlé par seuil mince, le ressaut contrôlé par seuil épais et le ressaut type A forcé par marche positive.

La figure 8 montre la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les quatre configurations citées précédemment, représentées par des courbes de couleurs différentes.

La courbe en traitillé représente la variation du rapport Y^* théorique du ressaut classique triangulaire en fonction du nombre de Froude incident F_1 , issu de l'application de l'équation de quantité de mouvement, en vertu de l'équation 6 de Hager et Wanoschek (1987) :

$$F_1^2 = \frac{2Y^{*2} (Y^{*2} + Y^* + 1)}{3(Y^* + 1)} \quad (6)$$

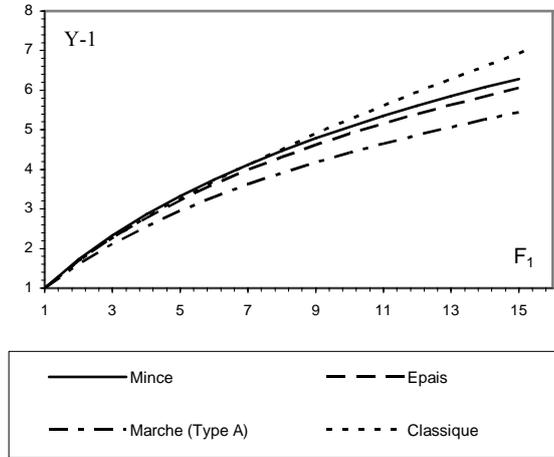


Figure 8 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. (—) Courbes tracées selon la relation (6)

La figure 8 montre que pour le ressaut forcé par marche, l'influence de la marche positive sur le rapport des hauteurs conjuguées est bien perceptible. Cette influence s'accroît avec l'augmentation de F_1 . En effet, un décalage important est visible pour le ressaut de type A forcé par marche positive par rapport à son homologue contrôlé par seuil. En effet, pour un nombre de Froude partique $F_1=9$, nous avons pu observer que l'écart relatif $\Delta Y/Y$ entre le ressaut contrôlé par seuil épais et son homologue de type A est approximativement égal à 10 % .

Par ailleurs, pour une large gamme des nombre de Froude F_1 ($2 \leq F_1 \leq 15$), un ajustement des valeurs expérimentales a montré que la variation de $Y=f(F_1)$ est de type logarithmique pour les quatre configurations étudiées, l'équation 6,13 le montre bien :

$$Y = a \operatorname{Ln} \left[\frac{(F_1 + 4)}{5} \right] + 1 \quad (7)$$

$a = 3,96$: ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

$a = 3,78$: ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse.

$a = 3,27$: ressaut de type A forcé par marche positive.

La condition de criticité est ainsi satisfaite puisque $Y(F_1=1)=1$.

Hauteur relative du seuil

La figure 9 montre la variation de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil et de la marche en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les quatre configurations de ressaut. Un décalage assez important est visible entre les courbes des ressauts contrôlés par seuil et leur homologues contrôlés et forcés par marche positive. En effet, pour le même nombre de Froude incident F_1 , la formation d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil nécessite une hauteur relative de seuil plus élevée que son homologue utilisant une marche positive. L'écart relatif $\Delta S/S$ peut atteindre les 20 % pour un nombre de Froude $F_1=9$.

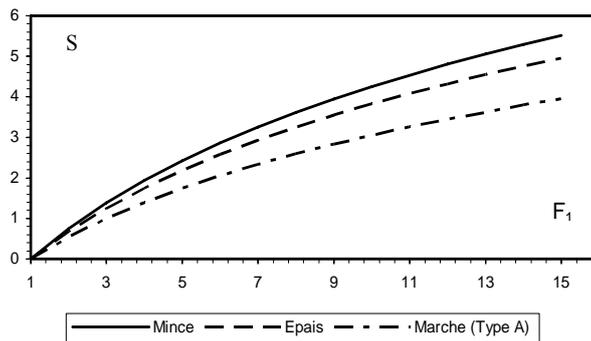


Figure 9 : Variation de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbes tracées selon la relation (8)

Par ailleurs, un ajustement des valeurs expérimentales a montré que la variation de $S=f(F_1)$ est de type logarithmique pour les quatre configurations étudiées, l'équation 6.14 le montre bien :

$$S = b \operatorname{Ln} \left[\frac{(F_1 + 4)}{5} \right] \quad (8)$$

- $b = 4,13$: ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.
- $b = 3,71$: ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse.
- $b = 2,94$: ressaut de type A forcé par marche positive.

Longueur relative du bassin

La figure 10 montre la variation de la longueur relative $\lambda_B = L_B/h_1$ du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les quatre configurations étudiées. Il

ressort que l'effet réducteur de la marche positive, commence à se faire sentir à partir du nombre de Froude $F_1=9$. En effet, pour les nombres de Froude supérieurs à 9, le ressaut forcé par marche positive évolue dans un bassin plus court que sont homologue contrôlé par seuil.

En outre, l'ajustement des valeurs expérimentales a montré que la relation $\lambda_B=f(F_1)$ est de la même forme pour les quatre configurations étudiées. Celle-ci s'écrit comme suit :

$$S + F_1^{0.4} = a\lambda_B + b, \lambda_B X \geq 4 \quad (9)$$

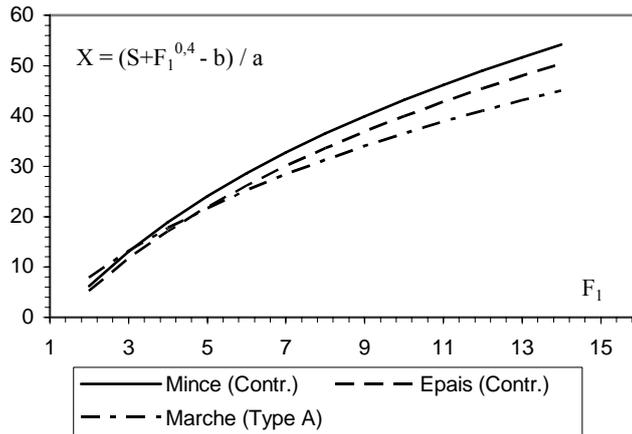


Figure 10 : Variation de la longueur relative λ_B du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbes tracées selon la relation (9)

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:

$$\eta = \frac{\Delta H}{H} \quad (10)$$

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

H_1 et H_2 désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut. Celles-ci sont définies par les relations (6.17) et (6.18):

$$H_1 = h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (11)$$

$$H_2 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (12)$$

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

$$H_1 = h_1 + Q^2/(2gA_1^2) \quad (13)$$

$$H_2 = h_2 + Q^2/(2gA_2^2) \quad (14)$$

Avec $A_1 = mh_1^2$

Le nombre de *Froude* de l'écoulement incident dans un canal à section droite triangulaire est défini par la relation (15) :

$$F_1 = \frac{2Q^2}{gm^2h_1^5} \quad (15)$$

La combinaison des équations (10), (13), (14) et (15) donne l'expression (16) du rendement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}} \quad (16)$$

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

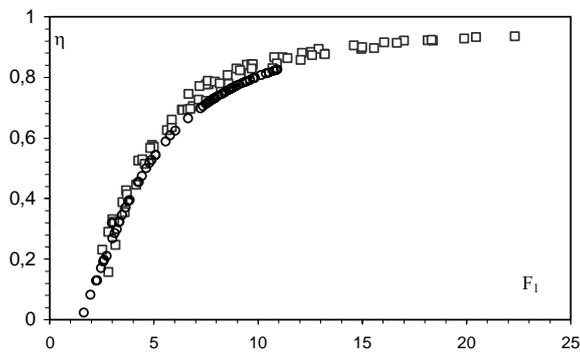


Figure 11 : Variation du rendement en fonction du nombre de Froude F_1 , (o) Ressaut contrôlé par seuil épais. (□) Ressaut type A forcé par marche positive.

La figure 11 montre que pour la gamme des nombres de Froude incident $5 < F_1 < 11$, les points de mesure du ressaut de type A forcé par marche positive sont au-dessus de ceux du ressaut contrôlé par seuil épais. Cependant pour des nombres de Froude $F_1 > 11$, tous les points de mesures se rejoignent pour former

un seul nuage de points, montrant ainsi que quelque soit la forme du seuil, l'effet de dissipation de la charge hydraulique est le même pour les deux configurations de ressaut. Le décalage n'étant pas significatif, on peut dire que le rendement est quasi indépendant de S.

CONCLUSION

L'étude a eu pour objectif d'étudier expérimentalement le ressaut de type A forcé par une marche positive, dans un canal de section droite triangulaire à angle d'ouverture de 90° . Une étude comparative entre le ressaut contrôlé par seuil, selon l'étude de *Debabeche et Achour (2007)*, et le ressaut forcé par marche positive a été également étudié. L'analyse des mesures expérimentales montre un écart important, entre le ressaut de type A forcé par marche positive et son homologue contrôlé par seuil. En effet, pour un nombre de *Froude* pratique $F_1=9$, nous avons pu observer que l'écart relatif $\Delta Y/Y$ entre le ressaut contrôlé par seuil épais et son homologue de type A est approximativement égal à 10 %. Une loi de type logarithmique est proposée pour évaluer le rapport Y en fonction du nombre de *Froude* F_1 , pour les trois types de ressaut. En outre, la représentation graphique des mesures expérimentales montre que pour chacune des configurations de ressauts suscitées, $(Y-1)$ augmente au fur et à mesure que la hauteur relative S du seuil croît, suivant une courbe unique linéaire dont la pente varie d'une configuration à l'autre. Par ailleurs, une relation de type puissance, liant la hauteur relative S de la marche positive, le nombre de *Froude* F_1 et la longueur relative λ_B du bassin a été trouvée pour les trois types de ressaut étudiés. En outre, pour les nombres de *Froude* supérieurs à 9, le ressaut forcé par marche positive évolue dans un bassin plus court que son homologue contrôlé par seuil. Par ailleurs, la représentation graphique du rendement en fonction du nombre de *Froude* incident, montre que les points de mesures du ressaut contrôlé par seuil épais et par marche positive sont presque confondus. Ainsi on peut conclure que le rendement est quasi indépendant de la forme du seuil.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACHOUR B., DEBABECHE, M. (2003). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire. *Journal of Hydraulic Research* 41(3), 319-325.
- DEBABECHE M., ACHOUR, B. (2007). Effet du seuil sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire, *Journal of Hydraulic Research*, 45(1), pp. 135-139.
- FORSTER J. W., SKRINDE R.A. (1950). Control of Hydraulic jump by sills, *Trans. ASCE*, 115, pp.973-1022.

- HAGER W.H., SINNIGER R. (1985). Flow Characteristics of the Hydraulic jump in Stilling Channel with an abrupt bottom rise, J. Hydraulic Research 23(2),101-113, Discussion 25(3), 207-215, 1986.
- HAGER W.H., WANOSCHEK R., (1987). Hydraulic jump in triangular channel, J. Hydraulic Research, Vol. 25, No 5, pp-549-564.
- HAGER W.H., BRETZ N.V., (1988). Sill-controlled stiling basin, the international symposium on hydraulics for high dams, 273-280.
- RAJARATNAM N., MURAHARI, V., (1971). A contribution to forced hydraulic jumps, J. Hydraulic Research, vol. 9, 217-239.
- RAND W., (1965). Flow over a vertical sill in an open channel, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, vol. 91, HY4 97-122.