



EFFET DE LA RUGOSITE SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL PROFILE EN U (Partie 1)

M. DEBABECHE, A. GHAMRI, C. SAHNOUNE, K. ISMAIL

Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface
LARHYSS, Université de Biskra, B.P. 145, R.P., 07000, Biskra, Algérie

INTRODUCTION

Le ressaut hydraulique peut évoluer dans des canaux prismatiques ou non prismatiques, à paroi lisse ou rugueuse. Il est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal de pente faible ou nulle, sans obstacle à l'aval. Il est contrôlé lorsque sa formation est provoquée par la mise en place d'un obstacle à l'aval de l'écoulement. Lorsque le ressaut hydraulique se forme de part et d'autre de cet obstacle, il est alors appelé ressaut forcé.

L'étude se propose d'examiner par voie expérimentale le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince en canal profilé en "U" à fond rugueux de diamètre D , écoulant un débit volume Q . L'étude bibliographique montre que les principaux paramètres adimensionnel influençant le phénomène du ressaut hydraulique dans un canal profilé en "U" sont : le nombre de Froude incident F_1 ou le débit relatif $Q^* = Q/\sqrt{gD^5}$, la hauteur relative amont $y_1 = h_1/D$ où h_1 est la hauteur au pied du ressaut ou profondeur de l'écoulement incident, 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.

À l'exception des travaux de Hager (1987, 1989), ou ceux plus récents de Debabèche (2003), de Achour et al. (2002) et de Achour et Debabèche (2003), le ressaut hydraulique en canal profilé en U n'a pas suscité un grand intérêt. En outre, aucune étude n'est à signaler concernant l'influence de la rugosité des parois du canal sur les caractéristiques de ce type de ressaut. Cette influence n'a été étudiée et observée que dans le cas du canal rectangulaire (Rajaratnam, 1968).

L'objectif principal de cette étude est donc d'expérimenter le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal profilé en "U" à fond rugueux de pente géométrique nulle ou pouvant être considérée comme telle. Les relations fonctionnelles, liant les caractéristiques du ressaut, seront

proposées en termes adimensionnels. Elles feront apparaître notamment l'effet de la rugosité du fond du canal considéré sur les caractéristiques du ressaut hydraulique.

Une étude comparative entre les caractéristiques d'un tel ressaut et celles de son homologue évoluant dans le même profil à fond lisse permettra de tirer des conclusions intéressantes. Dans cette étude, l'effet de la rugosité du canal sur les longueurs caractéristiques du ressaut n'est pas discuté. Cet aspect fera l'objet d'une attention particulière lors d'une prochaine publication.

DESCRIPTION DE L'ECOULEMENT

Une boîte B (Fig.1), alimentée sous pression par une pompe et spécialement conçue pour générer un écoulement de grande vitesse, provoque l'apparition d'un écoulement torrentiel de faible profondeur h_1 dans le canal d'essais. La mise en place d'un seuil à paroi mince, de hauteur s , dans une section donnée du canal transforme le régime torrentiel de l'écoulement incident en un régime fluvial de profondeur aval h_2 . Si une tranche Δx de l'écoulement incident persiste et demeure en régime torrentiel, un ressaut hydraulique prend alors naissance à l'aval du seuil s , à condition que la hauteur de celui-ci soit suffisante pour le débit écoulé. Si le seuil est trop haut, le ressaut se déplace en sens inverse de celui de l'écoulement pour noyer finalement la boîte B . Afin de faire réapparaître le ressaut hydraulique, le débit volume Q doit être augmenté. Pour une valeur donnée de Q , h_1 et s , le ressaut hydraulique se forme de façon contrôlée et ses caractéristiques, telles que la longueur de son rouleau de surface L_r et sa longueur L_j , sont alors bien définies.

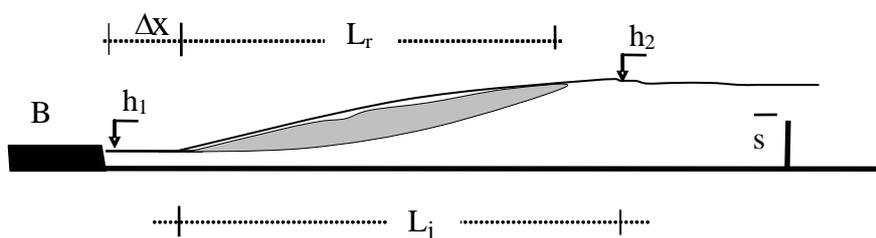


Figure 1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince. Profil en long de l'écoulement.

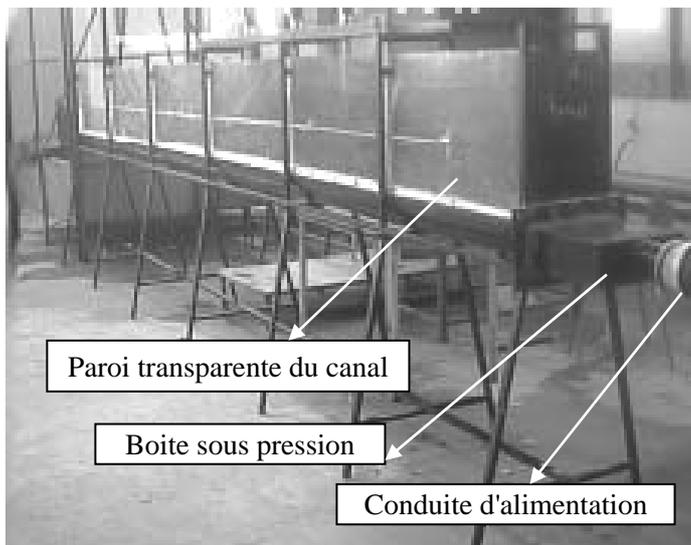
En outre, l'accroissement du débit Q entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation de la longueur L_r de son rouleau de surface. La distance Δx augmente également et pour ramener le ressaut à sa position initiale, le seuil doit être surélevé. L'expérience montre que la distance Δx ne peut être réduite qu'à un minimum de 5 cm environ, en raison des perturbations que subit le ressaut hydraulique dans le sens longitudinal. Grâce à la courte

distance Δx obtenue, la profondeur h_1 de l'écoulement incident est raisonnablement assimilée à l'ouverture de la boîte sous pression B (figure 1). A chacune des combinaisons (Q, h_1, D) correspond une valeur du nombre de *Foude* incident F_1 et une valeur du débit relatif Q^* . Il lui correspond également une seule valeur des longueurs L_r et L_j , de la profondeur aval h_2 et de la hauteur s du seuil.

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Description du modèle

Le banc d'essais expérimental est composé d'un canal de mesures d'une longueur de 567 cm (Photographie 1) et dont le fond est formé par une conduite semi circulaire en PVC de diamètre intérieur de 24,5 cm. Pour construire la partie rectangulaire supérieure du profil en U, deux parois latérales de hauteur 50 cm surmontent le fond. L'une des parois latérales est en tôle, tandis que l'autre est en Plexiglas transparent permettant ainsi les prises de vue et les observations. Le profil en U ainsi construit est solidement fixé sur un support métallique reposant sur des pieds.



Photographie 1 : Vue d'ensemble du canal d'essais

L'écoulement permanent dans le canal d'essais est assuré en circuit fermé. L'eau est aspirée d'un bassin d'alimentation par l'intermédiaire d'une pompe qui la refoule ensuite dans la conduite d'alimentation débouchant dans la boîte sous

pression. Celle-ci alimente à son tour le canal et l'eau sortant de celui-ci est alors recueillie par le bassin d'alimentation raccordé à la pompe qui peut débiter jusqu'à 80 l/s.

Le réglage du débit volume Q s'effectue par manipulation d'une vanne insérée dans le circuit et sont mesurés à l'aide d'un débitmètre à diaphragme préalablement étalonné par un déversoir triangulaire.

Rugosité artificielle du canal d'essais

Le fond semi circulaire du canal d'essais a été testé sous une rugosité artificielle équivalente de 4,3 mm, soigneusement répartie de manière uniforme le long du canal. Cette rugosité a été obtenue en respectant les étapes suivantes :

- Un tamisage de sable ou de gravier de granulométrie différente est effectué au moyen d'un tamiseur électrique. Celui-ci est composé de plusieurs tamis de différents diamètres normalisés variant entre 1 et 8mm. Les temps de tamisage, dépendant de la gamme de gravier à tamiser, ont été fixés à moins de 5 minutes.
- Après l'obtention de la gamme voulue de gravier, ce dernier est lavé puis séché. La gamme choisie varie entre 4 et 5 mm selon le refus du tamis normalisé. Les particules obtenues sont ensuite uniformément réparties sur une toile en plastique, puis soigneusement collées au moyen d'une colle forte.



Photographie 2 : Echantillon de grains de gravier de rugosité équivalente $\varepsilon = 4,3\text{mm}$.

La photographie 3 montre le résultat final obtenu sur le fond semi circulaire du profil en U testé par le procédé ci-dessus décrit.



Photographie 3 : Grains de gravier uniformément répartis sur le fond du canal profilé en U testé.

DESCRIPTION DES ESSAIS

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut contrôlé par seuil à paroi mince dans le canal à fond rugueux ci-dessus décrit.

L'expérimentation a été menée sous quatre hauteurs initiales du ressaut hydraulique : $h_1 = 2,32$ cm, 3,40 cm, 5,2 cm et 6,1cm. Une large gamme des valeurs des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue, telle que $2,3 < F_1 < 15$.

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 et dont la hauteur s varie entre 3,4 cm et 19,8 cm.

Pour chaque valeur des paramètres s , x et h_1 , l'augmentation du débit volume Q provoque l'apparition d'un ressaut (photo. 4.). Le couple de valeur (Q, h_1) a permis en outre le calcul du nombre de Froude incident F_1 par la relation :

$$F_1 = \sqrt{\frac{64Q^2}{gD^5} \frac{\sin \alpha}{(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)^3}} \quad (1)$$

où l'angle α (radians) est tel que $\alpha = \cos^{-1}(1-2y_1)$. La relation (1) peut également s'écrire :

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



Photographie 4 : Ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en U à fond rugueux. Vue de l'amont.

L'accroissement de F_1 entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation de la longueur 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 correspondent une valeur de la longueur L_j et une valeur de la hauteur s du seuil. Pour chacune des rugosités absolues ε testées et pour chacune des valeurs des treize seuils considérés, la mesure de Q , h_1 , h_2 , et L_j a permis de calculer les paramètres adimensionnels suivants:

$$y_1, y_2, Y = h_2 / h_1, F_1, S = s / h_1, L_j / h_1, L_j / h_2 \text{ et } \varepsilon / D.$$

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Hauteur relative 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^* , pour quatre valeurs distinctes de y_1 . Deux types de ressaut évoluant en canal profilé en U sont confrontés : le ressaut contrôlé en canal à fond rugueux et le ressaut contrôlé en canal à fond lisse.

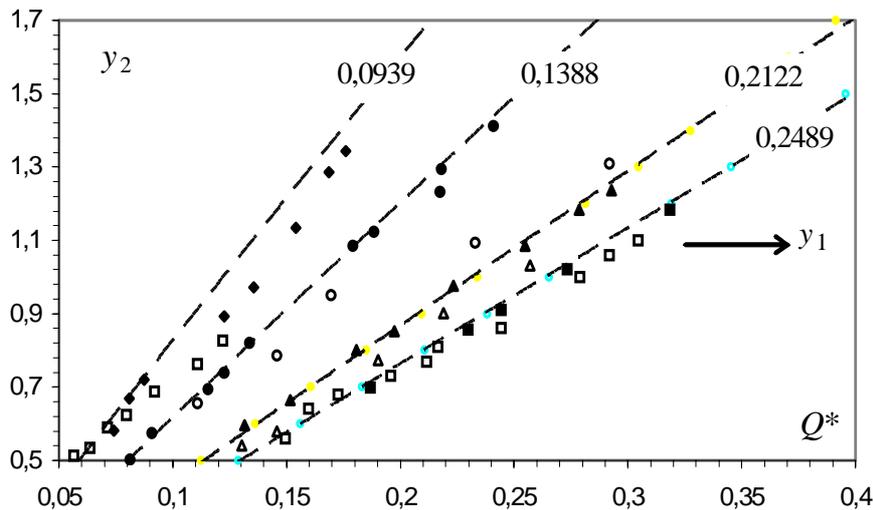


Figure 2 : Variation de $y_2 f(Q^*)$. Motifs pleins : Ressaut contrôlé en canal à fond lisse, Motifs vides : Ressaut contrôlé en canal à fond rugueux, (- -) courbe théorique tracée selon l'équation de la quantité de mouvement.

La figure 2 montre quatre (04) séries de points de mesures, correspondant chacune à une valeur bien déterminée de la hauteur relative initiale y_1 du ressaut. Les traits discontinus représentent la courbe théorique issue de l'équation de quantité de mouvement. Nous pouvons ainsi constater que les points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé dans le canal à fond rugueux se situent bien au-dessous de ceux du ressaut contrôlé dans le canal à fond lisse. Aussi, l'écart entre les deux nuages de points augmente considérablement avec l'augmentation de Q^* , mais il s'amenuise au voisinage de la courbe correspondant à $y_1 = 0,2489$. Ceci pourrait être expliqué par le fait que l'augmentation de la vitesse de l'écoulement engendre l'accroissement des pertes de charge par frottement et entraîne alors la diminution de la hauteur relative aval y_2 du ressaut hydraulique.

Hauteur relative y_2 en fonction du nombre de Froude F_1

La figure 3 indique la variation de la hauteur relative y_2 en fonction de la quantité (F_1-1) , pour les deux rugosités relative étudiées ($\varepsilon/D=0$ et $\varepsilon/D=0,0176$). Quatre nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la hauteur relative y_1 sont constatés, montrant ainsi l'influence de celle-ci. Nous pouvons constater l'augmentation du nombre de Froude incident F_1 entraîne celle de la hauteur relative aval y_2 . En outre, pour le même nombre de Froude F_1 , la hauteur relative y_2 augmente avec l'augmentation de y_1 et diminue avec l'accroissement de la rugosité équivalente. Par ailleurs, l'ajustement des mesures expérimentales pour les deux rugosités considérées a permis de proposer la relation suivante :

$$y_2 = \alpha y_1^\beta (F_1 - 1)^\gamma \tag{3}$$

La valeur du coefficient α , ainsi que celle des exposants β et γ sont consignées dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Valeurs expérimentales de α , β et γ de la relation (3).

Rugosité relative ε/D	α	β	γ
0	2,41	1,26	0,77
0,0176	1,95	1	0,63

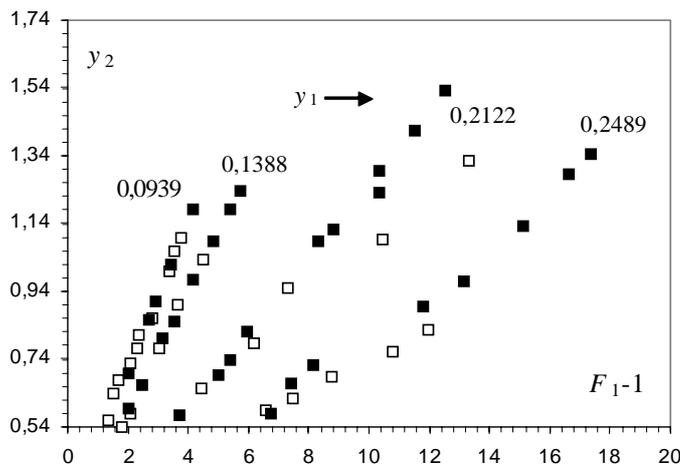


Figure 3 : Variation expérimentale de $y_2 = f [(F_1-1); y_1]$. (□) Canal à fond rugueux, (■) Canal à fond lisse.

Les valeurs expérimentales de la hauteur relative y_2 ont été confrontées à celles calculées en application de la relation approchée (1), pour les deux rugosités relatives testées. Le résultat apparaît sur les figures 4 et 5 qui montrent clairement que les points obtenus suivent la première bissectrice.

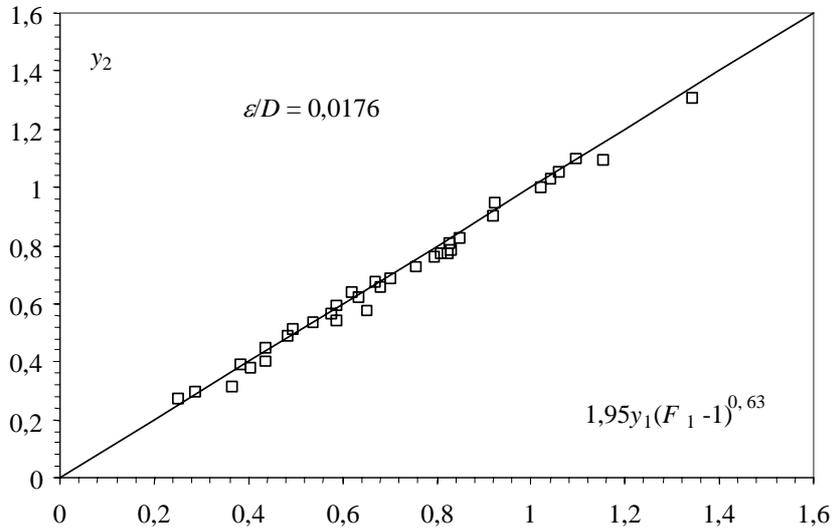


Figure 4 : Variation de y_2 expérimentale en fonction de y_2 calculées selon la relation (1), pour le cas du canal à fond rugueux.

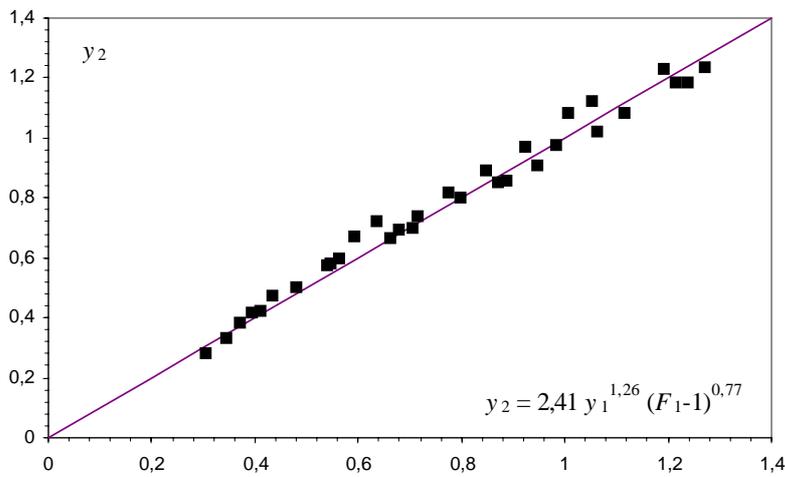
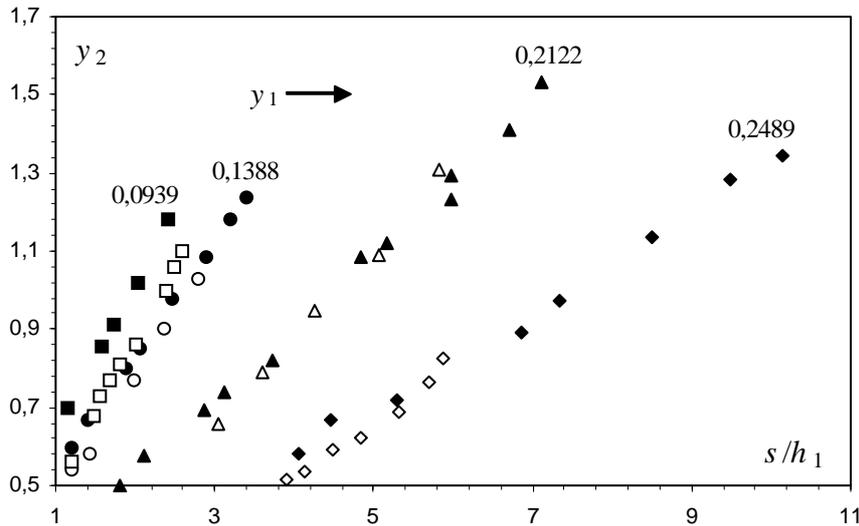


Figure 4 : Variation de y_2 expérimentale en fonction de y_2 calculée selon la relation (1), pour le cas du canal à fond lisse.

Hauteur relative y_2 en fonction de la hauteur relative S du seuil

Sur la figure 6, nous avons représenté la variation de la hauteur relative y_2 en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil, pour les deux valeurs de la rugosité relative testée. Quatre (04) nuages de points distincts, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la hauteur relative amont y_1 sont ainsi mis en évidence.



**Figure 6 : Variation expérimentale de $y_2 = f(S = s/h_1 ; y_1)$.
Motifs pleins : Canal à fond lisse, Motifs vides : Canal à fond rugueux**

La figure 6 montre en particulier que pour le même couple de valeurs ($S = s/h_1, y_1$), la hauteur relative y_2 augmente avec la diminution de la rugosité relative ε/D . Par ailleurs, l’ajustement des mesures expérimentales obtenues pour les deux rugosités testées a permis d’établir la relation suivante :

$$y_2 = \delta y_1^\theta S^\sigma \tag{4}$$

Nous avons pu montrer que l’exposant σ est fonction de la hauteur relative y_1 suivant une loi linéairement décroissante et que le coefficient δ et l’exposant θ sont des constantes dont la valeur dépend de celle de la rugosité relative. Les valeurs obtenues pour δ et θ ainsi que la fonction $\sigma(y_1)$ sont consignées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Valeurs expérimentales de δ , θ et $\sigma(y_1)$ de la relation (4).

Rugosité relative ε/D	δ	θ	$\sigma(y_1)$
0	4,21	1,35	$(0,045 - 1,67 y_1)$
0,0176	5,10	1,62	$(1,3 - 1,9 y_1)$

Il ressort de la relation (4) ainsi que des résultats consignés dans le tableau 2 que la hauteur relative y_2 pour le cas du canal à fond lisse s'écrit :

$$y_2 = 4,21 y_1^{1,35} S^{(0,045 - 1,67 y_1)} = f_L \quad (5)$$

Les valeurs issues de l'application de la relation (5) ont été confrontées à celles mesurées dans le canal à fond lisse. Le résultat est représenté graphiquement sur la figure 7 montrant ainsi que les points obtenus suivent la première bissectrice.

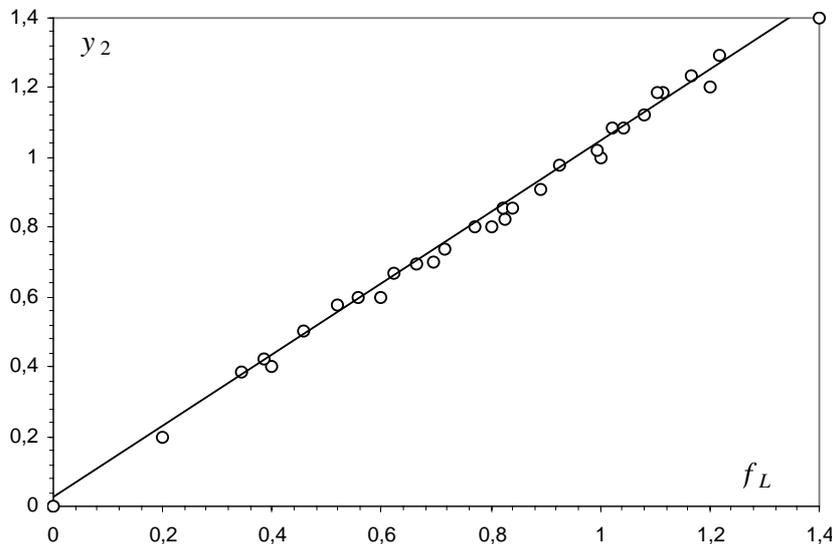


Figure 7 : Variation de y_2 expérimentale en fonction de f_L calculé selon la relation (5). Cas du canal à fond lisse.

Quant au canal à fond rugueux, la relation (5) ainsi que les résultats consignés dans le tableau 2 permettent d'écrire que :

$$y_2 = 5,10 y_1^{1,62} S^{(1,3 - 1,9 y_1)} = f_R \quad (6)$$

Sur la figure 8 sont représentées les valeurs de y_2 expérimentales en fonction de celles calculées en application de la relation (6). Il apparaît clairement que les points obtenus se répartissent autour de la première bissectrice.

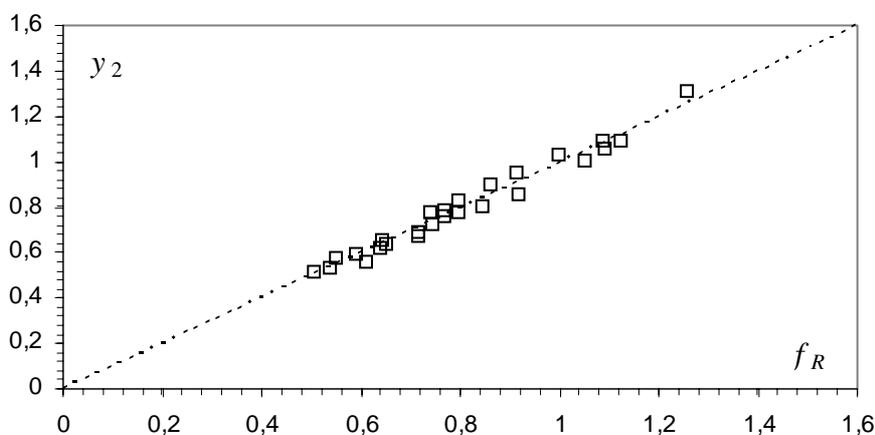


Figure 8 : Figure 7 : Variation de y_2 expérimentale en fonction de f_R calculé selon la relation (6). Cas du canal à fond rugueux.

CONCLUSION

Dans cette étude, une analyse expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince en canal profilé en U a été effectuée, aussi bien pour un canal à fond lisse que pour un canal à fond rugueux. L'expérimentation a été menée sous quatre hauteurs de l'écoulement incident. Treize seuils ont été utilisés pour la formation et le contrôle du ressaut hydraulique. Une large gamme des débits relatifs et des nombres de Froude incidents a pu être testée. Notre attention a porté plus particulièrement sur la hauteur relative aval y_2 du ressaut hydraulique.

En se basant sur un programme expérimental intense, nous avons pu conclure que la hauteur relative $y_2(F_1, y_1)$ était de la forme $y_2 = \alpha y_1^\beta (F_1 - 1)^\gamma$. La valeur du coefficient α ainsi que celle des exposants β et γ ont été expérimentalement déterminées et sont consignées dans le tableau 1.

De même, la hauteur relative $y_2(S, y_1)$ a été définie et se présente sous la forme $y_2 = \delta y_1^\theta S^\sigma$. Les valeurs du coefficient δ et des exposants θ et σ sont consignées dans le tableau 2. Afin de conclure de manière définitive sur les valeurs des paramètres $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \theta$ et σ , il est recommandé de tester une plus large gamme de rugosités.