

Article

Dimensionnement des bassins de dissipation d'énergie trapézoïdaux par ressaut hydraulique

Ahmed Benmalek *, Mohamed Madi, Mohammed A. Hafnaoui, Nouar Boulghobra & Wahida Kherifi

Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides CRSTRA, Biskra, Algérie

* Correspondance : ahmed.benmalek@yahoo.fr

Résumé : Dans le domaine des constructions hydrauliques, il est souvent question de restituer l'eau d'un ouvrage hydraulique vers un cours d'eau. Un ouvrage hydraulique, tel qu'un barrage, est muni d'un déversoir pour laisser passer les débits de crues que la retenue ne peut accumuler. Au pied de ce barrage se situe un bassin amortisseur, conçu pour être le siège de la dissipation d'énergie. Un changement de régime de l'écoulement intervient alors dans le dissipateur : à son entrée, le régime est torrentiel, à sa sortie il est fluvial ; cette transition s'appelle ressaut hydraulique. Pour contrôler et stabiliser la position dans le bassin, la disposition d'un seuil en travers de l'écoulement est souhaitable. Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse, continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative. Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau aval, de contrôler sa position lors des changements des paramètres de l'écoulement et contribuent enfin à une meilleure compacité du bassin amortisseur. L'objectif principal de cette étude est de déterminer expérimentalement l'effet du seuil sur la configuration du ressaut hydraulique évoluant dans un bassin de dissipation de forme trapézoïdal ; et de trouver des relations empiriques adimensionnelles exprimant l'effet du seuil sur les différents paramètres hydrauliques du ressaut.

Mots clés : Ressaut hydraulique ; nombre de Froude ; bassin de dissipation ; canal trapézoïdal ; seuil mince

Received : 17 August 2022
Accepted : 04 January 2023

Citation : Benmalek, A.; Madi, M.; Hafnaoui, M. A.; Boulghobra, N.; Kherifi, W. Dimensionnement des bassins de dissipation d'énergie trapézoïdaux par ressaut hydraulique. *Journal Algérien des Régions Arides* 2023, 15 (1): 111–118.

Publisher's Note : ASJP is an electronic publishing platform for Algerian scientific journals managed by CERIST, that is not responsible for the quality of content posted on ASJP.



Copyright : © 2022 by the CRSTRA. Algerian Journal of Arid Regions is licensed under a Creative Commons Attribution Non Commercial 4.0 (CC BY NC) license.

1. Introduction

Le bassin de dissipation est l'élément central de la dissipation d'énergie. Le seuil est le dispositif particulier lié à un tel ouvrage pour favoriser la formation du ressaut dans le bassin, rendre le dissipateur plus compact, améliorer la stabilité du processus sous des variations de paramètres et augmenter la capacité de dissipation.

Les bassins de dissipation utilisant un ressaut hydraulique pour la dissipation d'énergie sont largement utilisés en génie hydraulique. Da Vinci a été le premier à décrire le ressaut hydraulique, Bidone [1] a mené des expériences classiques il y a environ 170 ans.

Le ressaut hydraulique dans les canaux trapézoïdaux ce type de ressaut à attirer l'attention de plusieurs auteurs, les travaux les plus reconnus sont celles de Wanoschek et Hager [2], ces derniers ont analysé les différents paramètres hydrauliques caractérisant le ressaut hydraulique classique. Les auteurs ont décrit d'une manière détaillée le comportement du ressaut, dans un canal trapézoïdal, d'angle d'inclinaison de 45° ($m = 1$) et pour des valeurs de $M \leq 0,40$. Les observations n'ont révélé l'existence d'un rouleau du fond, jusqu' alors jamais détecté, dont les caractéristiques géométriques, telles que la longueur à la base, la hauteur ainsi que la position sont définies.

Les essais de Wanoschek et Hager [2] ont montré que la longueur relative L_j/h du ressaut dépend à la fois de la valeur du nombre de Froude Fr_1 et de la valeur du rapport de forme M : les courbes de la variation de L_j/h obtenues pour $0,1 \leq M \leq 0,4$, issues des essais de Peterka [3] pour les ressauts dans les canaux de section droite triangulaire. Les

auteurs ont montré que le ressaut dans le canal trapézoïdal testé devrait être plus long et asymétrique au-delà d'une valeur limite du nombre de Froude Fr_{IL} , tout dépend du rapport de forme M .

Par ailleurs, le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal a fait l'objet de quelques études. Parmi les travaux les plus reconnus sur ce type de ressaut ceux réalisés par Posey et Hsing [4], Ohtsu [5], Silvester [6], Afzal et Bushra [7]. Kateb et al. [8] ont analysé l'effet de la marche positif sur ce type de ressaut. Cherhabil et Debabeche [9] ont montré les principales caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal incliné.

Une étude récente présentée par Benmalek et al. [10], qui préoccupe de l'effet de la compacité du ressaut sur les différents paramètres d'écoulement dans les bassins de dissipation de forme trapézoïdale. Les auteurs ont constaté que le rapport de compacité a un effet réducteur sur le rapport des profondeurs conjuguées $Y=h_2/h_1$. Ce qui donne une configuration minimale au bassin de dissipation. Concernant la forme trapézoïdale brusquement élargie, Benmalek et Debabeche [11] ont analysé théoriquement et expérimentalement l'effet de l'élargissement sur ce type de ressaut.

Cette étude vise à analyser par voie expérimentale l'effet du seuil mince un ressaut développé dans un bassin de dissipation de forme trapézoïdal. Des formules empiriques ont été déterminées reliant le rapport des profondeurs conjuguées et la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude incident. La détermination de ces paramètres permettra de dimensionner le bassin de dissipation.

2. Matériels et méthodes

2.1. Considérations générales

Un bassin de dissipation, fosse de dissipation ou bassin d'amortissement est un ouvrage ou parfois une configuration naturelle où plonge une chute d'eau après un déversoir, un seuil, ou une chute à l'intérieur d'une canalisation. On parle également de bassin de tranquillisation (Figure 1). Il est construit en vue de dissiper l'énergie de l'eau et d'éviter l'usure, l'érosion ou la destruction qu'elle pourrait provoquer à l'ouvrage ou à son environnement.



Figure 1. Forme du bassin de dissipation d'énergie en aval du barrage déversoir.

2.2. Procédure expérimentale

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince dans un canal trapézoïdal de lit horizontal et un angle d'inclinaison des talus de 73° (Figure 2a). L'expérimentation a été menée sous quatre hauteurs initiales de l'écoulement : h_1 (cm) = 2; 3; 4; 5 (Figure 2b). Une large gamme du nombre de Froude incident a

été ainsi obtenue, correspondant à $3,57 < Fr_1 < 15,72$. La formation du ressaut contrôlé (Figure 2c) est conditionnée par la mise en place d'un seuil à l'aval de l'écoulement. À cet effet, des seuils de différentes hauteurs ont été utilisés (Figure 2d). Un échantillon constitué de plus de 100 points de mesures expérimentales, pour chacun des paramètres intervenant au phénomène, a permis également pour ce type de ressaut, d'aboutir à des résultats significatifs. Ces paramètres sont : le débit Q , la hauteur initiale h_1 , la hauteur finale h_2 , la hauteur du seuil s et la position x du seuil par rapport au pied du ressaut. Ceux-ci permettent de composer les produits adimensionnels suivants : le nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, le rapport $Y = h_2/h_1$, la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$.

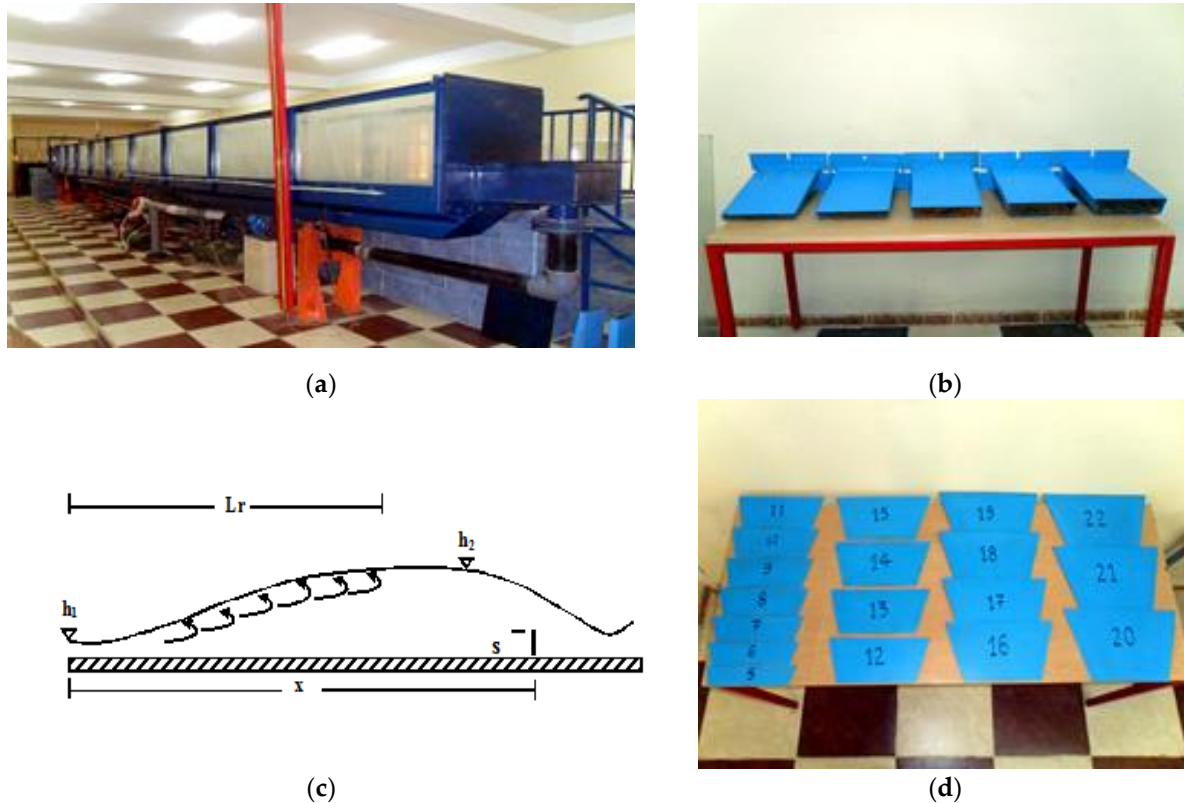


Figure 2. Modèle expérimental : (a) canal expérimental ; (b) ouvertures de h_1 ; (c) ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince ; (d) seuils testés.

L'un des objectifs visés par la présente étude est de définir, par la voie de l'expérimentation au laboratoire, les relations adimensionnelles $f_1(Fr_1, Y) = 0$, $f_2(Fr_1, S) = 0$ et $f_3(Fr_1, \lambda_j) = 0$. Ceci permettra en outre d'évaluer le rapport des profondeurs conjuguées $Y = h_2/h_1$, la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$ et la longueur relative du ressaut $\lambda_j = L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident.

Dans un écoulement brusquement varié tel que le ressaut hydraulique en exprime le débit volume Q et l'aire de la section mouillée A , par le paramètre adimensionnel Fr_1 ou nombre de Froude de l'écoulement incident à l'amont du ressaut. Ce nombre est donné généralement par la relation universelle (Eq. 1) suivante:

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial h_1} \quad (1)$$

L'équation 1 montre que le nombre de Froude Fr_1 dépend de quatre paramètres tels que :

- Q est le débit volume écoulé à travers le canal trapézoïdal [m^3/s];
- g est l'accélération de la pesanteur [m/s^2];
- A_1 est l'aire de la section mouillée au niveau de h_1 [m^2];
- $\partial A_1/\partial h_1$ est la dérivée partielle de l'aire de la section mouillée initiale par rapport à la hauteur conjuguée h_1 .

En réalité le rapport : $\partial A_1/\partial h_1$, ces tous simplement la largeur superficielle de lame d'eau écoulé. $\partial A_1 = B\partial h_1$.

Pour une section trapézoïdale tel notre cas, la dérivée partielle de A_1 par rapport à h_1 donne: $\partial A_1/\partial h_1 = \partial(bh_1 + mh_1^2)/\partial h_1 = b+2mh_1$. La relation (Eq. 1) prend la forme de (Eq. 2) suivante:

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2(b + 2mh_1)}{gA_1^3} \quad (2)$$

En fait, chaque série d'essais a été exécutée pour une ouverture donnée (a_0, h_1) et sous des débits volumes différents. Ainsi, pour h_1 et x fixés, différents profils du ressaut sont obtenus à débit croissant correspondant chacun à une valeur donnée de la hauteur s du seuil. Ainsi lorsque la configuration du ressaut contrôlé (Figure 2c) a été obtenue, et pour une hauteur initiale h_1 et une position x de seuil fixées, les opérations suivantes ont été effectuées:

Calcul du débit volume Q

1. Calcul du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, par application de la relation: $Fr_1^2 = [Q^2(b + 2mh_1)]/[g(bh_1 + mh_1^2)^3]$.
2. Mesure de la longueur x de la position du seuil.
3. Mesure de la hauteur géométrique s du seuil.
4. Mesure de la hauteur finale h_2 du ressaut.

3. Résultats et discussions

3.1. Rapport des profondeurs conjuguées

L'ajustement des valeurs expérimentales par la méthode des moindres carrés a montré que la loi de la variation de Y en fonction de Fr_1 est de type linéaire (Figure 3). La droite obtenue est donnée par (Eq. 3).

$$Y_{th} = 1,22Fr_1 + 0,10 \quad (3)$$

La relation précédente permettra de déterminer la hauteur du bassin de dissipation h_2 , connaissons le nombre de Froude de l'écoulement incident Fr_1 et la profondeur d'eau h_1 en amont du ressaut. Dans le cas de barrage déversoir, h_1 sera la lame d'eau déversante.

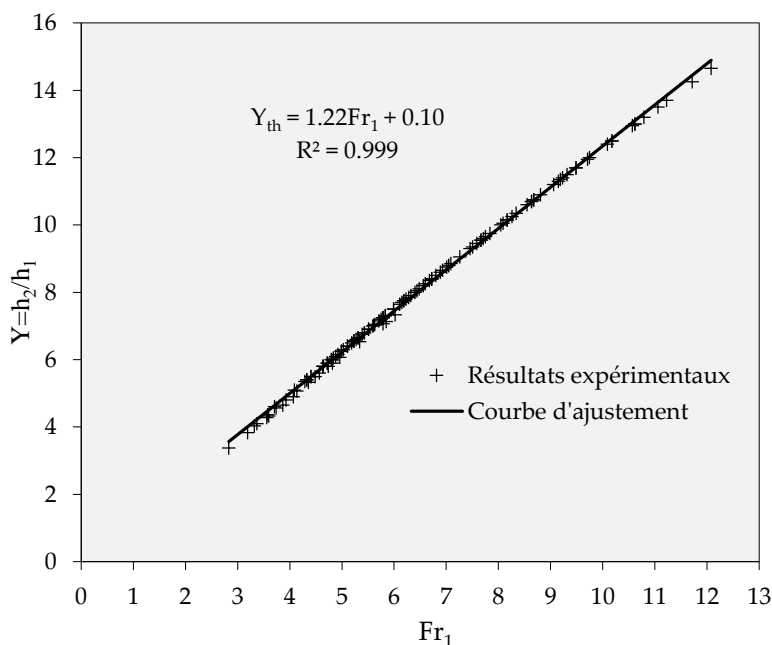


Figure 3. Variation du rapport des profondeurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude Fr_1 .

La figure 4 montre l'erreur relative entre les résultats expérimentaux de Y et les valeurs issues de la relation théorique (Eq. 3). D'après la représentation graphique des erreurs on remarque que tous les points de mesures s'accumulent autour de la première bissectrice, ce qui minimise l'erreur entre les points expérimentaux et celles de la relation théorique (Eq. 3). L'équation donnée par cet ajustement montre que l'erreur relative est de 3,4 % qui ne dépassent plus les 5%. Cette erreur est considérée acceptable dans les conditions expérimentales.

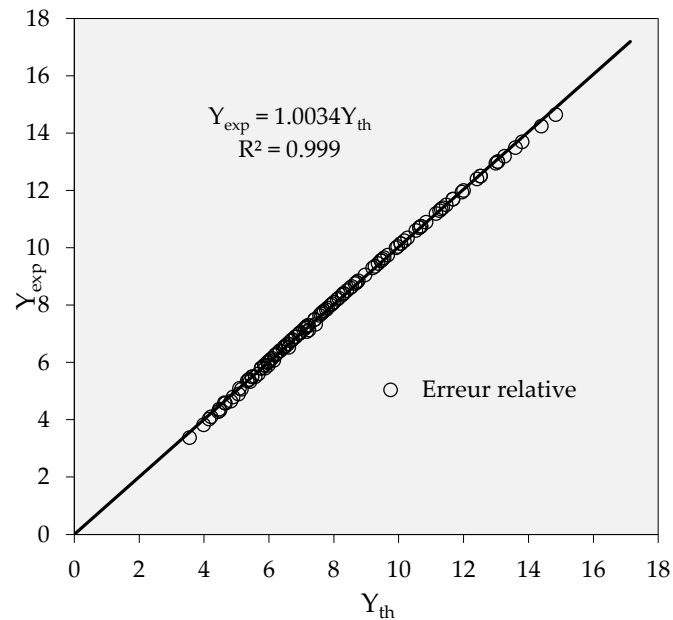


Figure 4. Erreur relative entre la relation théorique Y_{th} et les résultats expérimentaux de Y_{exp} .

3.2. Hauteur relative du seuil

L'ajustement des valeurs expérimentales par la méthode des moindres carrés a montré que la loi de la variation de $S = s/h_1$ en fonction de Fr_1 est du type linéaire (Figure 5). La droite obtenue est donnée par (Eq. 4):

$$S_{th} = 0,80Fr_1 - 0,84 \quad (4)$$

L'application de l'équation (Eq. 4) dans la pratique présente un avantage technique sur le dimensionnement de l'obstacle (seuil) positionné en aval de l'écoulement. En connaissant le nombre de Froude incident Fr_1 et la profondeur d'eau en amont h_1 , on peut déduire facilement la hauteur du seuil s .

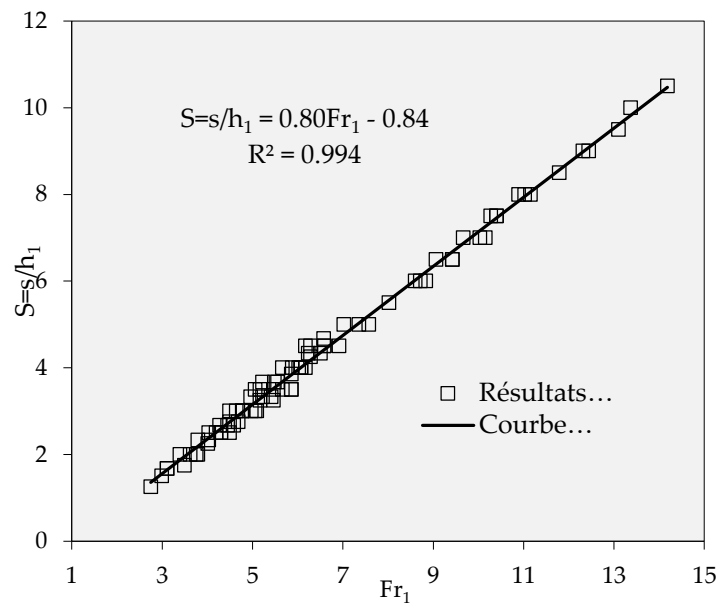


Figure 5. Variation de la hauteur relative du seuil S en fonction du nombre de Froude Fr_1 .

La figure 6 montre l'erreur relative entre les résultats expérimentaux de Y et les valeurs issues de la relation théorique (Eq. 4). D'après la représentation graphique des erreurs on remarque que tous les points de mesures s'accumulent autour de la première bissectrice, ce qui minimise l'erreur entre les points expérimentaux et celles de la théorie. L'équation donnée par cet ajustement montre que l'erreur relative est de 3,4 % qui ne dépassent plus les 5%. Cette erreur est acceptable dans les conditions expérimentales.

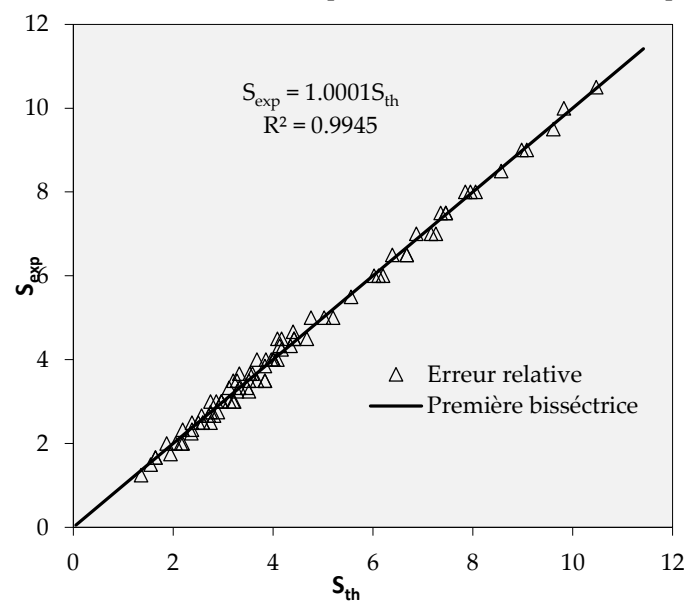


Figure 6. Erreur relative entre la relation théorique S_{th} et les résultats expérimentaux de S_{exp} .

La figure 7 montre l'erreur relative entre les résultats expérimentaux de S et les valeurs issues de la relation théorique (Eq. 4). D'après la représentation graphique des erreurs on remarque que tous les points de mesures s'accumulent autour de la première bissectrice, ce qui minimise l'erreur entre les points expérimentaux et celles de la théorie. L'équation donnée par cet ajustement montre que l'erreur relative est de 0,1 % qui ne dépassent plus les 5%. Cette erreur est acceptable dans les conditions expérimentales.

3.3. Longueur relative du ressaut

L'analyse des points de mesure expérimentale de la longueur relative du ressaut $\lambda_j = L_j/h_1$ (Figure 7), a montré que la variation de la fonction $\lambda_j = f(Fr_1)$ suit une droite donnée par l'équation (Eq. 5) suivante.

$$\lambda_j = 10,30Fr_1 - 13,40 \quad (5)$$

Le but de déterminer la longueur relative du ressaut $\lambda_j = L_j/h_1$, c'est pour connaître la longueur du bassin de dissipation où le ressaut se développe. Si en connais le débit écoulé et par l'application de la relation (Eq. 2) donnant le nombre de Froude caractérisant l'écoulement en amont du bassin. La profondeur d'eau amont h_1 (Figure 2b) est connue donc en déduira la longueur du ressaut L_j , ce qui donne la longueur du bassin en ajoutant toujours une tranche de sécurité.

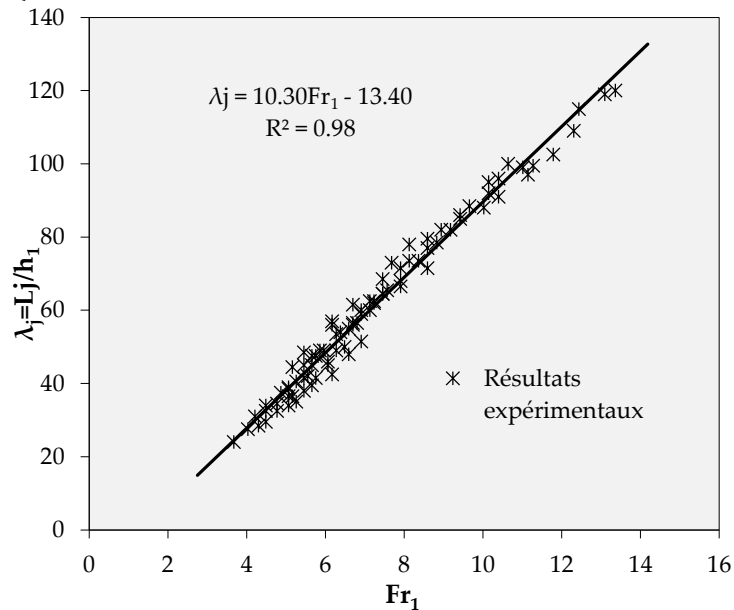


Figure 7. Variation de la longueur relative du ressaut λ_j en fonction du nombre de Froude Fr_1 .

La figure 8 illustre l'erreur relative entre les résultats de λ_{jth} issue de la relation théorique (Eq. 5) et celle de l'expérimentation λ_{jexp} . Cette dernière montre que la majorité des points de mesure s'accroissent autour de la première bissectrice. Ce qui minimise l'erreur entre les deux résultats et qui est considéré favorable dans les conditions expérimental.

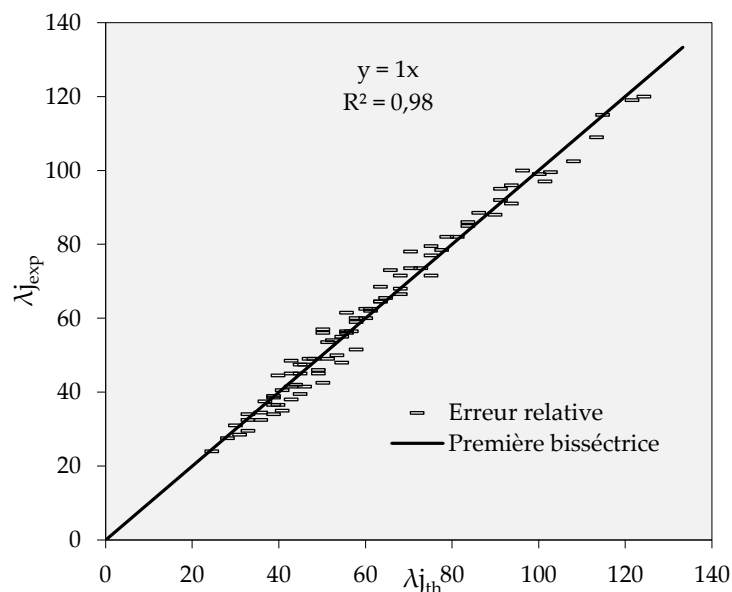


Figure 8. Erreur relative entre la relation théorique λ_{jexp} et les résultats expérimentaux de λ_{jth} .

4. Conclusions

La présente étude a été basée sur l'analyse expérimentale par un modèle hydraulique représentative. Les résultats obtenus pour les différents paramètres du ressaut évoluant dans un canal trapézoïdal, ont été très pratique. Ces données seront utiles pour le dimensionnement des bassins de dissipation de forme trapézoïdal.

Concernant la variation de la profondeur conjuguée du ressaut, les résultats obtenus ont montré que Y augment progressivement avec le nombre de Froude, et pour une valeur donnée de Fr_1 en peut déduire la hauteur du bassin. Dans le cas de la variation de la hauteur relative du seuil en fonction de Fr_1 , la courbe d'ajustement a montré que cette variation est linéaire suivant une droite de la forme $y=ax+b$. La relation issue de cette ajustement permettra de déterminer la hauteur du seuil s , connaissons Fr_1 .

La dernière relation déduit de cette analyse est celle de la longueur relative du ressaut L_j . Ce paramètre est très important pour la détermination de la longueur du bassin en connaissons Fr_1 . Dans la pratique ces paramètre doit être toujours majoré par une tranche de sécurité.

References

1. Bidone, G. Observations on the height of the hydraulic jump. A report presented of royal academy of science of Turin 1819, 21-80.
2. Wanoschek, R.; Hager, W.H. Hydraulic jump in trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research* 1989a, 27(3), 429–446.
3. Peterka, A. J. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. US department of interior, Bureau of reclamation 1964, 25.
4. Posey, C.J.; Hsing, P.S. Hydraulic jump in trapezoidal channel. *Engineering News-Record* 1938, 121, 797–798.
5. Ohtsu, I. Free hydraulic jump and submerged hydraulic jump in trapezoidal and rectangular channels. In *proceeding of the Japan society of civil engineers* 1976, 246, 57-72.
6. Silvester, P. Hydraulics jump in all shapes of horizontal channels. *Journal of Hydraulic Division* 1964, 90 (1), 23–55.
7. Afzal, B.; Bushra, A. Structure of the turbulent hydraulic jump in trapezoidal Channel. *Journal of Hydraulic Research* 2002, 40(2), 205–214.
8. Kateb, S. ; Debabeche, M. ; Benmalek, A. Etude expérimentale de l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal. *Canadian Journal of Civil Engineering* 2013. 40(10), 1014–1018.
9. Cherhabil, S.; Debabeche, M. Experimental Study of Sequent Depths Ratio of Hydraulic Jump in Sloped Trapezoidal Chanel. 6th International Symposium on Hydraulic Structures and Water System Management, Utah State University, Portland, Oregon, USA, 27-30 June 2016.
10. Benmalek A.; Debabeche M.; Zaid Z. Experimental study of the hydraulic jump compactness in an open trapezoidal channel. *Advanced Materials Research* 2022, 1168, 123-137.
11. Benmalek, A.; Debabeche, M. Theoretical and experimental analysis of sequence depth ratio and energy loss in an abruptly enlarged trapezoidal channel. *LARHYSS Journal P-ISSN* 2022, 49, 67-84.