

RESSAUT CONTROLE PAR SEUIL DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

CONTROL OF HYDRAULIC JUMP BY SILL IN RECTANGULAR CHANNEL

B. ACHOUR, N. SEDIRA, M. DEBABECHE

I. INTRODUCTION

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse (*Forster et Skinde*, 1950; *Achour*, 1997), continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative (*Hager et Sinniger*, 1985). 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 (*Bretz*, 1987; *Hager et Li*, 1992).

L'analyse dimensionnelle montre que la relation liant :

- le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident
- la hauteur géométrique s du seuil
- la hauteur initiale h_1 du ressaut
- la hauteur h_2 à l'amont immédiat du seuil
- la position X du seuil comptée à partir du pied du ressaut
- la profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval du seuil

peut s'écrire sous la forme $s/h_1 = f(F_1, X/h_2, h_3/h_1)$. La position X du seuil ne peut être analytiquement déterminée et la fonction f doit être définie par la voie expérimentale.

Pour le cas d'un seuil continu à paroi mince de hauteur géométrique s supérieure à la hauteur minimale d'apparition du ressaut, *Forster et Skrinde* (1950) ont établi des courbes expérimentales montrant la variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 . Le seuil testé est dénoyé et la profondeur h_3 n'a aucune influence sur l'écoulement amont. La relation fonctionnelle ci-dessus indiquée se réduit alors à $s/h_1 = f(F_1, X/h_2)$.

Le ressaut est tel que son rouleau de surface, de longueur L_r , coïncide avec la position X du seuil. Trois valeurs seulement de la position relative X/h_2 ont été considérées (3, 5 et 10).

Notre étude s'intéresse au ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal de section droite rectangulaire. Deux configurations du ressaut sont considérées. La première configuration répond aux conditions expérimentales de *Forster et Skrinde* (1950) ($X \cong L_r$). Nos essais ont eu pour but de définir la fonction f pour un grand nombre de valeurs de X/h_2 et ont permis ainsi d'aboutir à des résultats significatifs.

La deuxième configuration correspond à un ressaut contrôlé dont la longueur L_j coïncide avec la position X du seuil. L'analyse des mesures expérimentales a également permis de corréler les divers paramètres intervenant au phénomène. Une approche théorique est enfin proposée à l'étude du ressaut contrôlé dont l'écoulement incident est généré par la mise en place d'un déversoir.

II. RESSAUT CONTROLE PAR UN SEUIL CONTINU A PAROI MINCE

II.1. Approche de Forster et Skrinde

La figure 1 montre un ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince dans un canal rectangulaire. Le seuil de hauteur s est dénoyé et fonctionne alors comme un déversoir. La profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval du seuil n'a aucune influence sur le comportement du ressaut et répond à l'inégalité :

$$h_3 < h_2 - \frac{3}{4}s \tag{1}$$

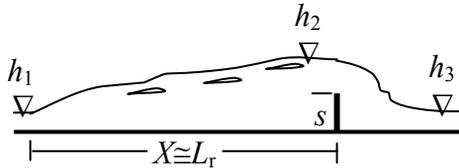


Figure 1 : Ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince

La figure 2 montre la variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les valeurs 3, 5 et 10 de la position relative X/h_2 du seuil.

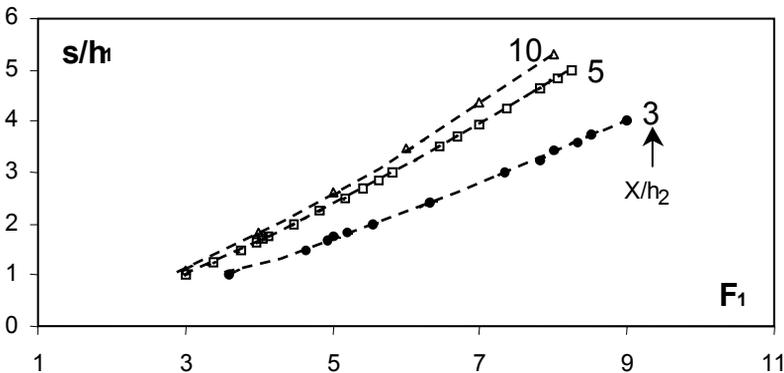


Figure 2: Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative X/h_2 du seuil (Forster et Skinde, 1950).

La figure 2 montre que tout point du diagramme est représenté par la paire de coordonnées $(F_1, s/h_1)$. Lorsque les valeurs de ces coordonnées sont définies, le diagramme permet de déterminer le paramètre X indiquant l'emplacement du seuil. Si le point défini par $(F_1, s/h_1)$ se situe :

- entre deux courbes du diagramme, la valeur de la position relative X/h_2 doit être déterminée par interpolation.
- au-dessus de l'une des courbes du diagramme, le seuil de hauteur s est trop haut et le ressaut peut se déplacer vers l'amont sous l'influence du seuil.
- au-dessous de l'une des courbes du diagramme, le seuil est trop bas et le ressaut peut se déplacer vers l'aval en laissant place à un écoulement torrentiel sur le radier du bassin amortisseur.

Ainsi, le diagramme représenté sur la figure 2 est à la base du dimensionnement du bassin amortisseur à ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince. La méthode est cependant graphique, nécessitant en règle générale des interpolations, et seules trois courbes sont proposées.

Nos essais, que nous exposerons dans ce qui suit, ont eu pour principal objectif de compléter les résultats de *Forster* et *Skrinde* (1950) et de définir de manière explicite la relation fonctionnelle $f(F_1, S, X/h_2) = 0$.

II.2. Essais actuels pour $X \cong L_r$

L'expérimentation a été menée dans un canal rectangulaire de largeur $b=0,30\text{m}$ et d'une longueur de 10 m, alimenté en circuit fermé par une pompe débitant 35 l/s. Les parois du canal sont en verre tandis que son fond est métallique. Des limnimètres à vernier sont disposés le long du canal par le biais de traverses supportées de part et d'autre par les parois du banc d'essais (figure 3 et figure 4).



Figure 3: Dispositif expérimental ayant servi à l'étude du ressaut contrôlé par un seuil dans un canal rectangulaire

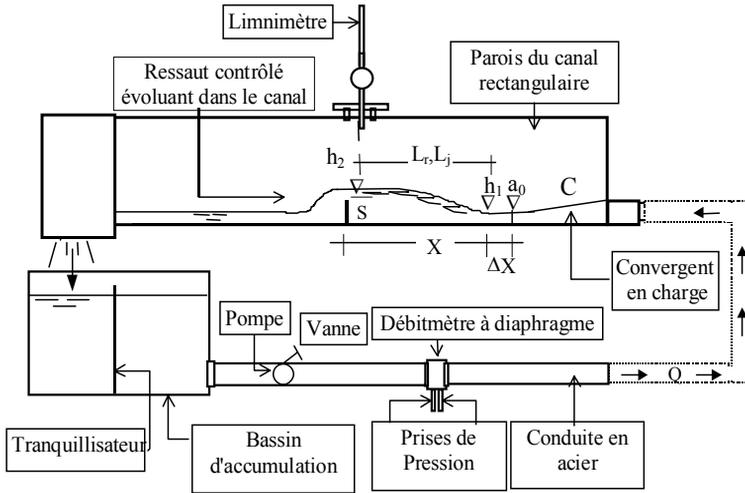


Figure 4 : Schéma simplifié du dispositif expérimental.

L'écoulement incident est généré par un convergent en charge "C" d'un mètre de longueur et de même largeur que le canal de mesure. Ses ouvertures initiale et finale sont respectivement de 15 cm et 2 cm et il est connecté à une boîte sous pression étanche de même largeur. L'ensemble boîte-convergent est directement alimenté par la pompe par le biais d'une tuyauterie flexible.

La boîte sous pression ainsi que le convergent sont munis de guideaux soigneusement disposés afin d'assurer au mieux la stabilité et l'uniformité de l'écoulement incident. Une paroi verticale étanche est disposée au-dessus de la boîte et sur toute sa largeur afin d'éviter toute submersion lorsque le ressaut est noyé et le canal de mesure inondé. L'ensemble du dispositif constitué du convergent et de la boîte sous pression peut se déplacer horizontalement afin de régler la position X du seuil à la valeur désirée.

Cette opération peut également être réalisée par le déplacement horizontal du seuil, mais elle est cependant beaucoup plus contraignante du fait que le seuil est soigneusement fixé et son étanchéité assurée.

La hauteur géométrique s du seuil ainsi que sa position X sont choisies de telle sorte que le rapport X/h_2 prenne des valeurs comprises entre 3 et 10; les essais sont exécutés avec un pas de variation $\Delta(X/h_2) \cong 0,5$.

L'ouverture a_0 du convergent peut être réglée à volonté ainsi que la hauteur géométrique s du seuil; ceci permet d'obtenir une très large gamme de valeurs de la hauteur relative s/h_1 .

Le pied du ressaut est réglé à une distance $\Delta X \cong 5$ cm et la hauteur initiale h_1 peut être raisonnablement assimilée à l'ouverture a_0 du convergent. La mesure limnimétrique de h_1 est très délicate en raison du caractère fortement torrentiel de l'écoulement incident.

Les résultats que nous allons présenter concernent la gamme pratique du nombre de Froude F_1 tel que $3 \leq F_1 \leq 9$. Les valeurs de la hauteur relative s/h_1 du seuil qui correspondent à cette gamme de F_1 sont telles que $1 \leq s/h_1 \leq 6$.

En raison du fait que le pas de variation de X/h_2 choisi lors de nos essais est faible, les courbes expérimentales de $s/h_1 = f(F_1)$ qui en résultent sont très rapprochées et ne seront pas toutes représentées.

L'analyse des mesures expérimentales obtenues a surtout montré que la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil est liée au nombre de Froude $F_1 = \sqrt{q^2 / gh_1^3}$ par une relation de type puissance; q est le débit unitaire et g est l'accélération de la pesanteur :

$$S = C_o \cdot (F_1 - 1)^\beta \tag{2}$$

Le principal résultat que nous pouvons retenir est que l'exposant β figurant dans la relation (2) prend une valeur quasi constante d'environ 5/4 pour toute la gamme $3 \leq X/h_2 \leq 10$; seul le paramètre C_o varie et sa variation peut être liée à celle de la position relative X/h_2 du seuil. Nous tenterons alors de définir la fonction $C_o = \psi(X/h_2)$ à partir des résultats expérimentaux.

Le tableau 1 regroupe les valeurs expérimentales de C_o qui correspondent aux diverses positions relatives X/h_2 choisies.

Tableau 1: Valeurs expérimentales C_o pour quelques positions relatives X/h_2 du seuil à paroi mince

X/h_2	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
C_o	0,300	0,330	0,360	0,390	0,421	0,425	0,429	0,433	0,444
X/h_2	7,5	8	8,5	9	9,5	10			
C_o	0,447	0,450	0,453	0,456	0,459	0,463			

Les valeurs expérimentales de C_o ci-dessus indiquées sont traduites graphiquement sur la figure 5. Celle-ci montre que la courbe de variation $C_o = \psi(X/h_2)$ peut être assimilée à deux tronçons de droites D_1 et D_2 sur l'ensemble de l'intervalle $3 \leq X/h_2 \leq 10$. Un ajustement linéaire basé sur la méthode des moindres carrés a permis d'écrire que :

$$C_o = 0,0604(X/h_2) + 0,1186, 3 \leq X/h_2 \leq 5, R^2 = 1 \tag{3}$$

$$C_o = 0,0086(X/h_2) + 0,379, 5 \leq X/h_2 \leq 10, R^2 = 0,973 \tag{4}$$

Les valeurs expérimentales de la hauteur relative S du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 sont représentées graphiquement sur la figure 6. Celle-ci montre que les courbes se rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que X/h_2 augmente. Il apparaît ainsi que dans la gamme relativement large $5 \leq X/h_2 \leq 7$, voire même $5 \leq X/h_2 \leq 10$, la variation que subit la hauteur relative S pour le même nombre de Froude F_1 n'est pas significative.

En outre, l'allure des courbes expérimentales obtenues semble indiquer que pour F_1 tendant vers l'unité la hauteur relative S tend vers zéro. L'égalité $F_1 = 1$ traduit la condition de criticité ($q^2/gh^3 = 1$) et implique un rapport des hauteurs conjuguées du ressaut $Y = h_2/h_1 = 1$ ($h_2 = h_1 =$ profondeur critique). Cette dernière égalité ne peut être satisfaite que si la hauteur géométrique s du seuil, et par conséquent la hauteur relative S , est nulle.

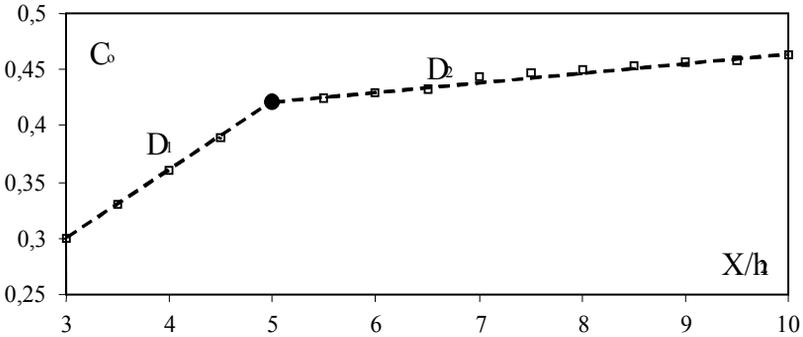


Figure 5: Variation expérimentale de C_o en fonction de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince.

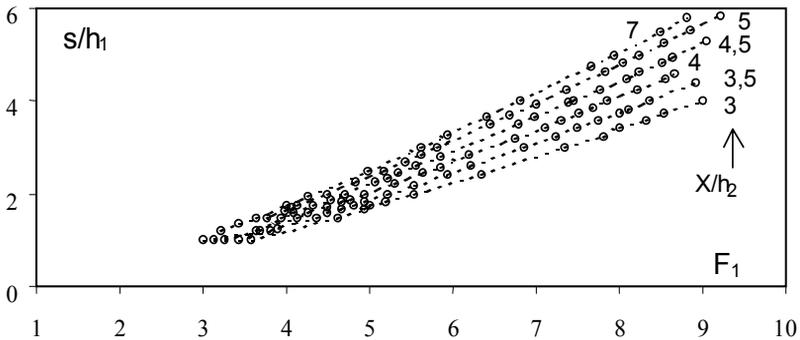


Figure 6: Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de X/h_2 .

II.3. Essais actuels pour $X \cong L_j$

Cette partie de notre étude s'intéresse au ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince placé à une distance X environ égale à la longueur L_j du ressaut (figure 7 et figure 8).

Les essais ont été effectués sous une large gamme de valeurs du nombre de Froude incident F_1 tel que $1,5 \leq F_1 \leq 25$, mais nous nous limiterons à la gamme pratique $3 \leq F_1 \leq 9$. Au-delà de la valeur 9 du nombre de Froude F_1 , le ressaut est considéré comme étant fort et le rapport Y des hauteurs conjuguées ne satisfait pas l'équation de Belanger. Les valeurs mesurées de Y sont en effet inférieures à celles calculées et ceci peut être dû au changement des

caractéristiques du ressaut et au frottement. Aux valeurs élevées de F_1 , la répartition de la pression n'est plus hydrostatique notamment à l'aval du ressaut et la distribution de la vitesse n'est plus uniforme comme le suppose le développement théorique qui a servi de base à l'établissement de l'équation de Belanger, applicable au ressaut classique.

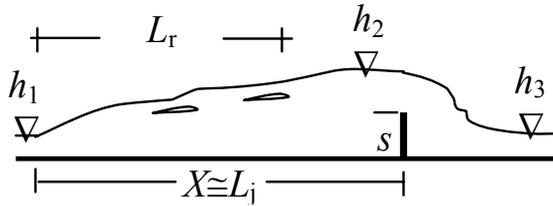


Figure 7: Contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour $X \approx L_j$.

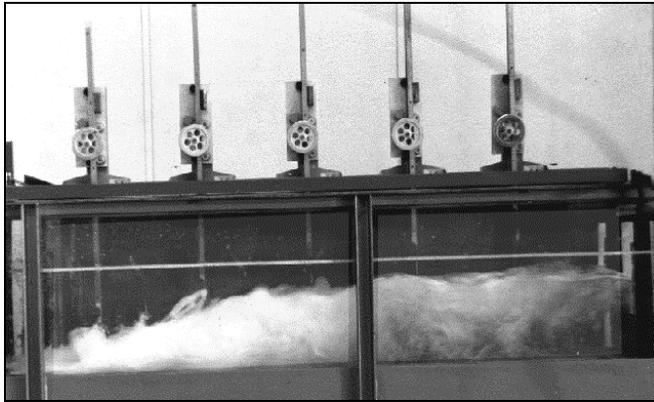


Figure 8: Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire.
 $F_1 = 7,74$, $h_1 = 2,5$ cm, $s = 14$ cm et $X = 184$ cm.

Dans la gamme de valeurs $3 \leq F_1 \leq 9$, les essais n'ont montré aucun effet de frottement et le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées peut donc être évalué par application de la relation :

$$Y = (1/2)[(1 + 8F_1^2)^{1/2} - 1] \quad (5)$$

Dans un premier temps, notre étude s'est intéressé à la détermination de la hauteur relative s/h_1 du seuil nécessaire à la formation du ressaut tel qu'il est représenté sur la figure 9 et pour la gamme pratique ci-dessus indiquée de F_1 . Les mesures expérimentales sont représentées graphiquement sur les figures 9 et 10 montrant respectivement la variation de $\xi (Y, s/h_1) = 0$ et $\zeta (F_1, s/h_1) = 0$. Ainsi, des courbes uniques sont obtenues et un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés a permis de corrélérer avec une excellente approximation les paramètres Y , s/h_1 et F_1 :

$$Y = 2,37(s/h_1)^{0,80} + 1, R^2 = 0,996 \quad (6)$$

$$s/h_1 = 0,562(F_1 - 1)^{1,225}, R^2 = 0,993 \quad (7)$$

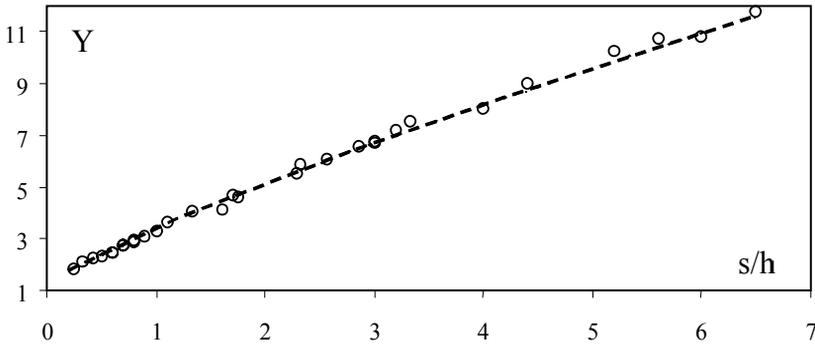


Figure 9: Variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince ($X \cong L_j$).
 (- - -) courbe tracée selon la relation (6).

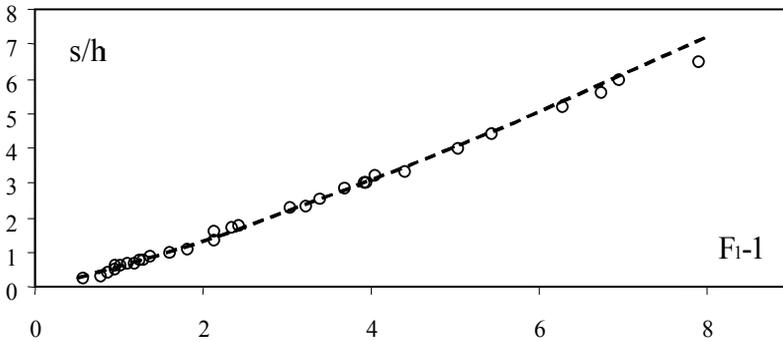


Figure 10: Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident ($X \cong L_j$).
 (- - -) courbe tracée selon la relation (7).

Notre étude s'est enfin intéressé à l'évaluation de la position X du seuil nécessaire à la formation complète du ressaut. Lorsque le seuil est placé à une distance $X = L_j$, le ressaut peut être considéré comme un ressaut classique caractérisé par un rapport X/h_2 environ égal à 6 (Peterka, 1983). Cette tendance semble être confirmée par nos mesures expérimentales représentées graphiquement sur la figure 11, notamment pour les valeurs élevées du nombre de Froude incident F_1 .

La figure 11 n'indique aucune influence significative du nombre de Froude incident F_1 ($F_1 > 3$) sur la position relative X/h_2 du seuil. A ces valeurs élevées de F_1 , la surface libre de l'écoulement à l'aval du ressaut subit des perturbations plus ou moins importantes rendant imprécise la mesure limnimétrique de la profondeur h_2 ($\Delta h_2 = \pm 1,5$ cm). Les mesures expérimentales obtenues se traduisent alors par un nuage de points réparti toutefois autour de la valeur moyenne $X/h_2 = 6$. L'analyse des mesures

expérimentales nous a permis de corrélér de manière plus significative la position relative X/h_1 du seuil au nombre de Froude incident F_1 . La figure 12 montre la variation expérimentale de la fonction $\phi(F_1, X/h_1) = 0$, en rappelant que F_1 est lié à la hauteur relative $S = s/h_1$ par la relation (7). Un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés a permis d'écrire :

$$X/h_1 = 10.(F_1 - 1), R^2 = 0,995 \tag{8}$$

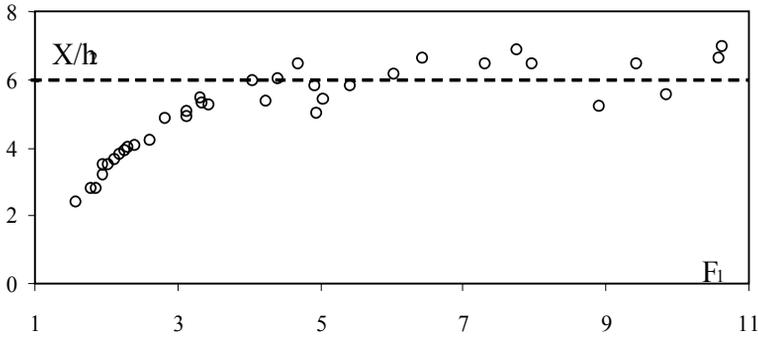


Figure 11: Variation expérimentale de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude incident F_1 lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ($X \cong L_j$).

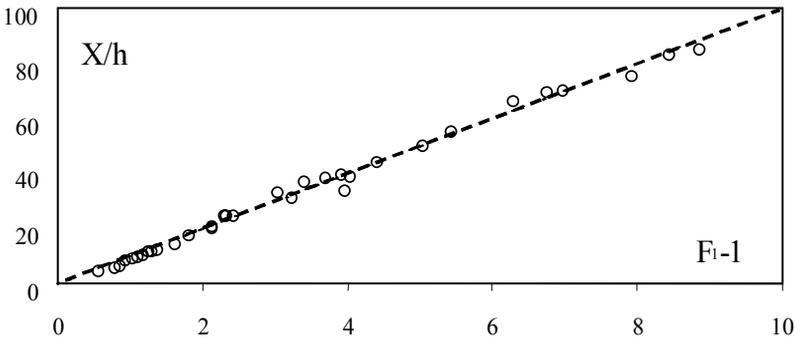


Figure 12: Variation expérimentale de la position relative X/h_1 du seuil à paroi mince en fonction de $(F_1 - 1)$ lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ($X \cong L_j$). (---) courbe tracée selon la relation (8).

III. CONFIGURATION AVEC DEVERSOIR

La figure 13 montre un ressaut contrôlé par un seuil dénuyé à paroi épaisse de hauteur géométrique s_2 . L'écoulement incident est généré par un déversoir de hauteur s_1 . Le déversoir et le seuil sont franchis par un écoulement en régime critique de profondeur h_c et de charge totale H_c .

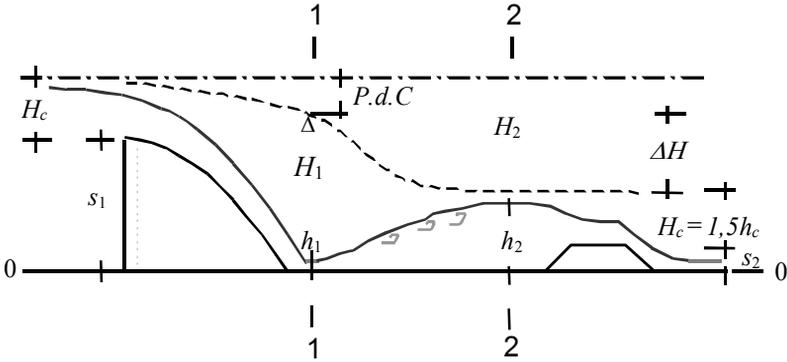


Figure 13: Ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse à l'aval d'un déversoir. Schéma de définition.

En négligeant les pertes de charge par frottement (*P.d.C*) le long du parement aval du déversoir, la figure 13 permet géométriquement d'écrire par rapport au plan de référence 0-0 : $H_1 = (s_1 + 3h_c/2)$ et $H_2 = (s_2 + 3h_c/2)$. Soit :

$$\begin{aligned} s_1 &= (H_1^* - 3/2)h_c \\ s_2 &= (H_2^* - 3/2)h_c \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta H^* = H_1^* - H_2^* = (s_1 - s_2)/h_c$$

où $H_1^* = H_1/h_c$, $H_2^* = H_2/h_c$, $\Delta H^* = \Delta H/h_c$. Les équations (9)₁ et (9)₃ permettent d'écrire :

$$\frac{\Delta H^*}{H_1^* - 3/2} = \left(1 - \frac{s_2}{s_1}\right) \quad (10)$$

Les charges totales relatives H_1^* et H_2^* dans les sections initiale et finale du ressaut s'écrivent respectivement $H_1^* = H_1/h_c = h_1/h_c + q^2/(2gh_1^2h_c)$, $H_2^* = H_2/h_c = h_2/h_c + q^2/(2gh_2^2h_c)$, soit :

$$H_1^* = h_1^* + \frac{1}{2h_1^{*2}} \quad (11)$$

$$H_2^* = h_2^* + \frac{1}{2h_2^{*2}} = Yh_1^* + \frac{1}{2(Yh_1^*)^2} \quad (12)$$

où $h_2^* = h_2/h_c$ et $h_1^* = h_1/h_c$, ou bien :

$$h_1^* = F_1^{-2/3} \quad (13)$$

En tenant compte de (11), (12), et (13), la relation (10) devient :

$$\frac{F_1^{-2/3} + \frac{1}{2}F_1^{4/3} - YF_1^{-2/3} - \frac{1}{2}Y^{-2}F_1^{4/3}}{F_1^{-2/3} + \frac{1}{2}F_1^{4/3} - \frac{3}{2}} = \left(1 - \frac{s_2}{s_1}\right) \quad (14)$$

Etant donné que Y et F_1 sont liés par l'équation de *Belanger*, la relation (14) montre ainsi que la quantité $(1 - s_2/s_1)$ ne dépend que du nombre de Froude incident F_1 . Pour que le ressaut puisse se former, il est nécessaire que $s_2 < s_1$ et par suite $0 < (1 - s_2/s_1) < 1$. L'examen de la relation (10) montre que:

$$h_1^* \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta s / s_1 \rightarrow 1 \text{ et } h_1^* \rightarrow 1 \Rightarrow \Delta s / s_1 \rightarrow 0$$

La représentation graphique de la relation (10) indique que la fonction $(1 - s_2/s_1) = f(h_1^*)$ se situe au-dessus de la courbe d'équation $(1 - s_2/s_1) + h_1^* = 1$ (figure 14). Ces considérations permettent d'écrire :

$$(1 - s_2 / s_1)^m + (h_1^*)^n = 1, m > 1, n > 1.$$

$(\Delta s / s_1)_i = f[(h_1^*)_j], (h_1^*)_j = f[(\Delta s / s_1)_i]$, où $\Delta s = (s_1 - s_2)$. Ainsi, on peut conclure que la fonction f est une fonction involutive et que $m = n$.

Il est aisé de montrer que les constantes m et n sont telles que $m = n \approx 9/8$ et la relation implicite (10) peut être finalement remplacée avec une excellente approximation par l'équation :

$$(\Delta s / s_1)^{9/8} + (h_1^*)^{9/8} = 1 \tag{15}$$

Soit:

$$\left[1 - \left(\frac{\Delta s}{s_1} \right)^{9/8} \right] F_1^{3/4} = 1 \tag{16}$$

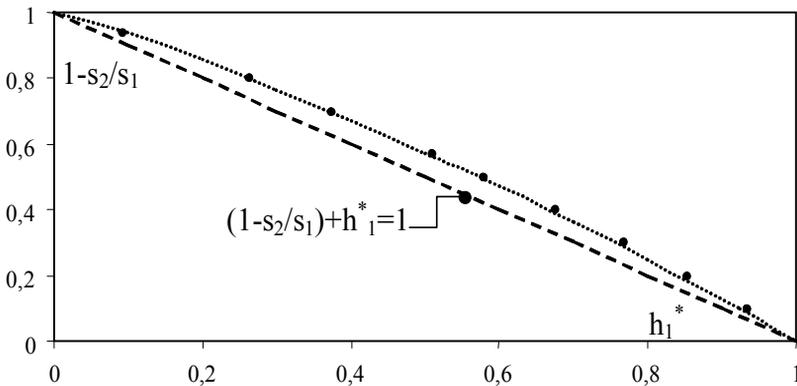


Figure 14: Variation de $(1 - s_2/s_1)$ en fonction de h_1^* .
 (---) Courbe tracée selon (10). (●) Relation (15).

IV. CONCLUSION

Le ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince dans un canal rectangulaire a été expérimentalement testé. Lorsque le seuil est placé à une distance X environ égale à la longueur L_r du ressaut, l'analyse des mesures expérimentales a montré que la hauteur relative S du seuil est telle que $S = C_0 \cdot (F_1 - 1)^{5/4}$. Le paramètre C_0 est linéairement dépendant de la position relative X/h_2 du seuil.

Pour le cas d'un seuil dénoyé placé à une distance X environ égale à la longueur L_j , du ressaut, l'étude a pu définir les fonctions $\xi(Y, S) = 0$ et $\zeta(F_1, S) = 0$, ainsi que la position relative X/h_1 du seuil nécessaire à la formation complète du ressaut.

Une nouvelle approche théorique du ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse a été proposée pour le cas d'un écoulement incident généré par la mise en place d'un déversoir. Le développement théorique a montré, à travers une relation cependant implicite, que le nombre de Froude F_1 était lié à la hauteur géométrique du déversoir et du seuil. Une étude détaillée de la fonction obtenue a permis de conclure que celle-ci était involutive et une excellente relation approchée a été proposée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACHOUR, B., Dissipateurs d'énergie par ressaut, Thèse de Doctorat d'état, Institut de Génie Civil, Université de Tizi-ouzou, 1997.
- bretz, n.v., ressaut hydraulique forcé par seuil, Thèse 699, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1987.
- Forster, J.W., skrinde, r.a., control of the hydraulic jump by sills, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 115, pp.973-987, 1950.
- HAGER, W.H., LI, D., Sill-controlled energy dissipator, , Journal of Hydraulic Research, Vol. 30, pp.165-181, 1992.
- HAGER, w.h., sinniger, r., flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise, Journal of Hydraulic Research, Vol. 23, pp.101-113, 1985.
- PETERKA, A.J. (1983), Hydraulic design of stilling basins and energy dissipator, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph, No. 25, Denver, Col.

PRINCIPALES NOTATIONS

F_1	Nombre de Froude de l'écoulement incident (-)
g	Accélération de la pesanteur (m/s^2)
H_1	Charge totale initiale (m)
h_1	Hauteur initiale du ressaut (m)
H_2	Charge totale finale (m)
h_2	Hauteur finale du ressaut (m)
H_c	Charge totale critique (m)
h_c	Profondeur critique (m)
L_j	Longueur du ressaut (m)
L_r	Longueur du rouleau (m)
q	Débit unitaire (m^2/s)
Q	Débit volume (m^3/s)
s	Hauteur de seuil (m)
S	Hauteur relative de seuil (-)
X	Position de seuil (m)
Y	Rapport des profondeurs du ressaut (h_2/h_1) (-)