

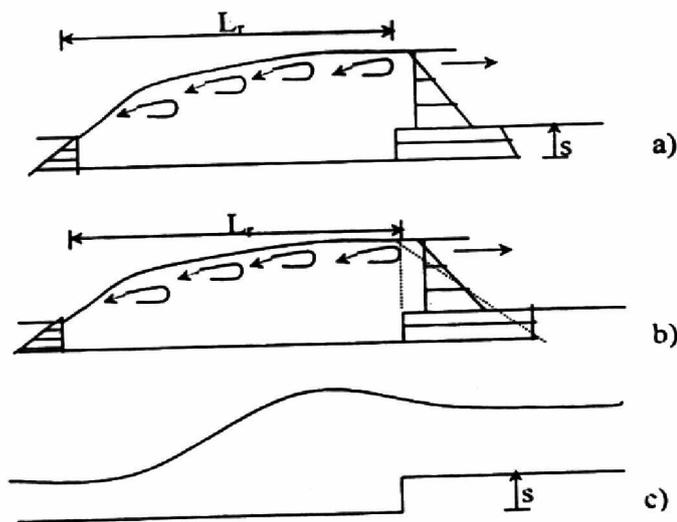
## Chapitre V

### RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR MARCHE POSITIVE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

#### V.1 Introduction

Le ressaut hydraulique contrôlé par marche n'a connu que très peu d'études. Les recherches les plus récentes dans ce domaine, sont certainement celles de Forster et Skrinde (1950), celles de Hager et Sinniger (1985) et celles de Hager et Bretz (1987). Les auteurs ont abordé le ressaut contrôlé par marche positive dans un canal de forme rectangulaire.

La marche positive constitue l'un des moyens les plus simples pour réaliser la transition de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial, par un changement local du radier. Le ressaut se développe dans un canal rectangulaire à pente amont et aval presque horizontale et avec marche positive de hauteur  $s$  (Figure 5.1).



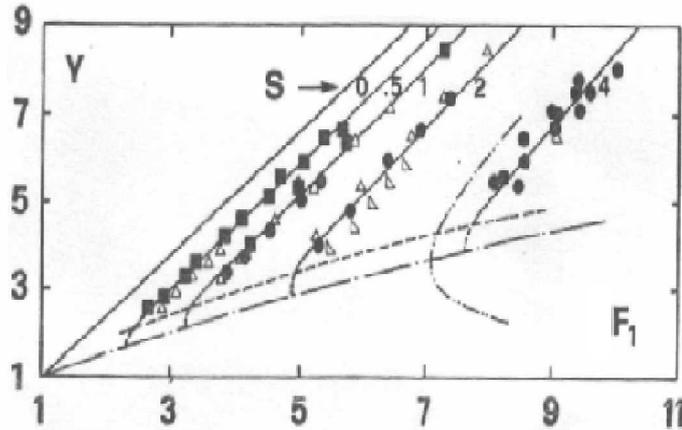
*Figure 5.1 : Types de ressaut hydraulique évoluant dans un canal doté d'une marche positive.(a) ressaut type A.(b) ressaut type B.  
(c) ressaut type B-min*

On présente en fin de ce chapitre l'étude réalisée par Abdel-Azim M. Negm (2000) concernant la cavitation sur les marches positive et négative dans un canal rectangulaire à forte pente pour les ressauts forcés type A et B.

#### V.2 Etude de Forster et Skrinde (1950)

Forster et Skrinde ont analysé en 1950 les écoulements sur une marche positive et sur un seuil sans considération des conditions à l'aval, l'écoulement est libre au-delà du seuil. En supposant une répartition hydrostatique des pressions sur la marche pour l'application du

théorème de la quantité de mouvement, ils ont obtenu une relation entre  $Y=h_2/h_1$ ,  $S=s/h_1$  et  $F_1$ . La Figure 5.2, représente la courbe théorique pour  $S = 4$  et les points expérimentaux pour  $S=0,5, 1, 2$  et  $4$ . Les points expérimentaux sont sur des courbes parallèles à celles théoriques mais décalées, et plus  $S$  est grand, plus l'écart augmente, pour un même nombre de Froude  $F_1$ , la valeur expérimentale est inférieure à celle théorique (Figure 5.2).



**Figure 5.2 :** Résultats expérimentaux de Forster et Skrinde (1950). Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour différentes hauteurs relatives  $S$  de marches positives : (■) 23.8 mm, (Δ) 36.3 mm, (●) 53.9 mm et (Δ) 7.9 mm. (-.-) Courbe théorique pour  $S = 4$ , (---) Limite inférieure des essais et (-.-) Limite théorique.

### V.3 Travaux de Hager et Sinniger (1985)

Dans cette étude, Hager et Sinniger (1985) énoncent qu'en raison des fluctuations importantes de la surface d'eau, la longueur du ressaut  $L_j$  ne peut être définie avec suffisamment de précision. C'est la raison pour laquelle seule la longueur du rouleau  $L_r$  est prise en considération.

Par comparaison avec le ressaut hydraulique dans un canal sans marche, on distingue divers types de ressauts. La transition d'un type à l'autre est normalement continue ; du point de vue du dimensionnement, concernant la position limite amont, le ressaut hydraulique apparaît de manière similaire avec ou sans marche. Cette limite est donc caractérisée par un ressaut pour lequel l'extrémité aval du rouleau se trouve au droit de la marche. La répartition des pressions est évidemment hydrostatique et les vitesses sont réparties presque uniformément dans les deux sections limitant le volume de contrôle. Ce type de ressaut est appelé ressaut type A (Figure 5.1 a).

Le rapport des hauteurs conjuguées  $Y=h_2/h_1$ , où  $h_1$  et  $h_2$  sont respectivement les hauteurs d'eau à l'amont et à l'aval du ressaut, se calcul par l'équation de quantité de mouvement en négligeant les effets de frottement (Forster et Skrinde, 1950 ; Hager et Bretz, 1987) :

$$F_1^2 = \frac{Y \left[ (Y+S)^2 - 1 \right]}{2(Y-1)} \quad (5.1)$$

Avec :

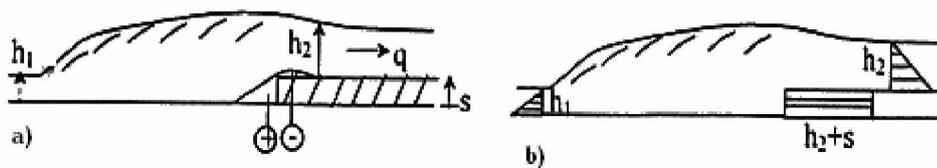
$S = s/h_1$  : hauteur relative de la marche positive ;  $s$  étant la hauteur de la marche positive.

$F_1 = q/(gh_1^3)^{1/2}$  : nombre de Froude à la section amont du ressaut. Où :  $q = Q/b$  est le débit par unité de largeur.

Lorsque la hauteur d'eau aval  $h_u$  est supérieure à  $h_2$  calculée à l'aide de l'équation (5.1), le ressaut hydraulique se déplace vers l'amont.

Par contre, lorsque  $h_u$  devient inférieure à  $h_2$  calculée à l'aide de l'équation (5.1) l'effet de la marche commence à se faire sentir.

Le ressaut type A se transforme en un ressaut type B. Il correspond à la position stable du ressaut situé le plus loin possible à l'aval (Figure 5.1.b).



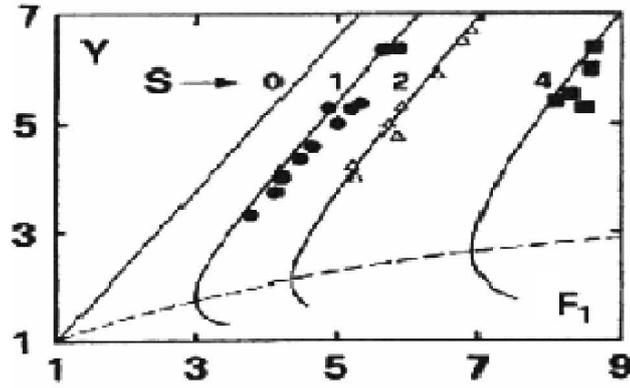
**Figure 5.3 :** a) Zones de séparation d'écoulement pour une marche positive, (+) et (-) indiquent respectivement les surpressions et les dépressions par rapport à la pression hydrostatique. b) Répartition de la pression autour du volume de contrôle.

Comme c'est montré à la figure (5.3.a), il existe deux zones de séparation autour de la marche positive, celle située à l'amont et caractérisée par une surpression, celle située à l'aval par une dépression par rapport à la pression hydrostatique.

Comme hypothèse de la pression sur la marche, une distribution uniforme est admise égale à la valeur  $(h_2 + s)$ , où  $h_2$  est la hauteur d'eau aval sur la marche (Figure 5.3.b). Le rapport des hauteurs conjuguées pour le ressaut hydraulique forcé par marche positive type B s'écrit donc:

$$F_1^2 = \frac{Y \left[ (Y+S)^2 + S^2 - 1 \right]}{2(Y-1)}, \quad S \geq 0 \quad (5.2)$$

Les courbes correspondantes montrent une bonne concordance avec les essais de Forster et Skrinde (1950), (Figure 5.4).



**Figure 5.4 :** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour différentes hauteurs relatives  $S$  de marches positives. (—) Courbes théoriques pour divers  $S$  selon Hager et Sinniger (1985); points expérimentaux de Forster et Skrinde (1950). (---) Limite théorique.

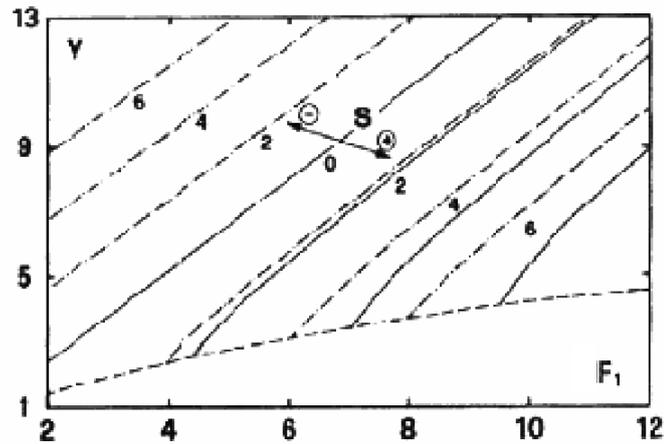
Pour  $h_1$ ,  $S$  et  $q$  données, l'équation (5.2) conduit à un nombre de Froude  $F_1$  plus grand que celui résultant de l'équation (5.1) pour les mêmes rapports  $Y$ . Autrement dit, la valeur de  $Y$  tirée de l'équation (5.2) est inférieure à celle tirée de l'équation (5.1) pour une même valeur de  $F_1$ . Les deux relations ne deviennent identiques que pour  $S=0$ , correspondant au ressaut hydraulique dans un canal sans manche (classique).

Une formule simplifiée est développée pour la dissipation d'énergie relative à la charge amont :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = \left[ 1 - \left( \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right) \right]^2, \text{ pour } F_1 > 1,5 \quad (5.3)$$

Il faut dire que  $\eta$  est indépendant de  $S$  et correspond donc au cas  $S = 0$ .

La figure 5.5 montre la variation du rapport des hauteurs conjuguées pour les marches positives et négatives en fonction du nombre de Froude amont  $F_1$  et de la hauteur relative  $S$  de la marche. Les courbes en pointillées correspondant à la position extrême amont et les courbes pleines se réfèrent à la position extrême aval de la marche. La courbe en trait discontinu correspond à la limite inférieure de l'apparition du ressaut sur une marche positive de la fonction  $Y(F_1)$  pour  $S$  fixé (Hager et Sinniger, 1985).



**Figure 5.5 :** Rapport des hauteurs conjuguées en fonction de  $F_1$  Pour les marches positives et négatives dans un canal rectangulaire, prismatique, (.....) Ressaut type A, (—) Ressauts types B et B-min, (— · —) Limite inférieure de l'apparition du ressaut sur une marche positive.

Si, pour  $S$  et  $F_1$  donnés,  $h_u$  est plus petit que le minimum de la hauteur d'eau aval  $h_2$  (ressauts types B et B-min), le ressaut est repoussé vers l'aval. Il en résulte un jet torrentiel à l'aval de la marche, sans dissipation d'énergie importante (Figure 5.1.c) une telle configuration d'écoulement doit être évidemment évitée en tout les cas. Par conséquent, la hauteur aval doit être limitée de façon à ce que le ressaut hydraulique apparaisse pour tous les débits envisageables.

#### V.4 Travaux de Hager et Bretz (1987)

Comparé à un ressaut hydraulique dans un canal prismatique et à fond horizontal, un bassin amortisseur doit forcer l'apparition du ressaut quelles soient les conditions hydrauliques. En particulier, le ressaut hydraulique ne doit pas sortir du bassin amortisseur.

La stabilité d'un bassin amortisseur est la capacité de l'ouvrage de maintenir la position du ressaut sous des hauteurs d'eau aval  $h_u$  variables, en fixant la hauteur amont  $h_1$  et le nombre de Froude  $F_1$  incident correspondant.

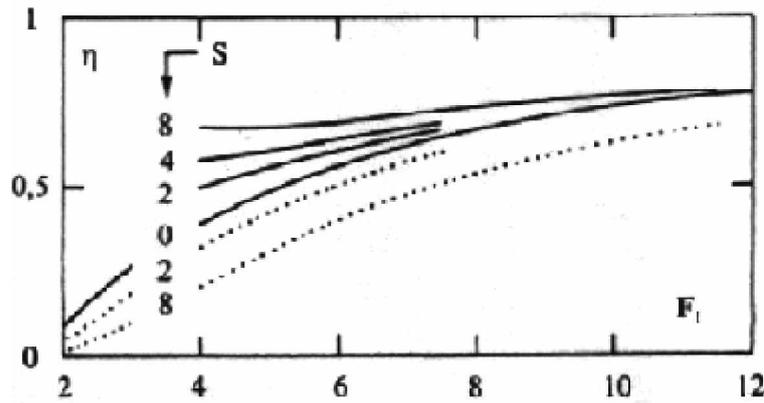
Soit  $\Delta Y = Y_A - Y_B$  le changement maximal admissible de la hauteur d'eau aval, où  $Y_A$  caractérise le ressaut type A et  $Y_B$  le ressaut type B. Une estimation de  $\Delta Y$  est selon Hager et Bretz (1987) :

$$\Delta Y = S/6 \quad (5.4)$$

Hager et Bretz (1987) montrent que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude  $F_1$ .

La dissipation relative d'énergie  $\eta = \Delta H/H_1$  est définie par la perte de charge  $\Delta H$  au travers le ressaut hydraulique comparée à l'énergie amont, soit  $H_1 = h_1 + q^2 / (2gh_1^2)$ .

La figure 5.6 représente  $\eta = f(F_1, S)$  pour les deux types de marche. On constate que  $\eta$  dépend fortement de  $S$  et de  $F_1$ . Pour  $F_1$  et  $S$  fixés, l'efficacité minimale est donnée par le ressaut hydraulique.



**Figure 5.6 :** Efficacité  $\eta = \Delta H/H_1$  en fonction de  $F_1$  et de  $S$ .  
 (---) Ressaut type A sur marche négative, ( $S = 0$ ) Ressaut type B sur marche positive. (—) Ressaut type B-min sur marche négative.

L'étude montre que l'efficacité relative minimale et donnée par le ressaut hydraulique type A est celle la plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique type B.

La compacité d'un bassin amortisseur correspondant à son extension longitudinale à condition que le ressaut se trouve entièrement dans le dissipateur. Les indications suivantes se réfèrent à la longueur du rouleau, la répartition de la vitesse à l'extrémité aval du rouleau est loin d'être uniforme. En ajoutant encore 20 à 40 % de la longueur du rouleau  $L_r$ , cette répartition devient presque uniforme, la vitesse auprès du fond étant sensiblement égale à  $V_2 = q / h_2$ .

Des essais sur modèle réduit montrent que la longueur relative  $\lambda = L_r / (h_2 + s)$  ne varie pas systématiquement avec  $F_1$ . Pour les positions extrêmes, Hager et Bretz (1987) ont obtenu les valeurs moyennes suivantes :

$$\lambda = 4,75 \text{ pour le ressaut type A.} \tag{5.5}$$

$$\lambda = 4,25 \text{ pour le ressaut type B.}$$

Pour le ressaut type A, la fin du rouleau se trouve par définition au niveau de la marche. Pour le ressaut de type B le pied du ressaut se trouve à peu près à une distance  $L_r/2$  à l'amont de la marche. De plus, avec :  $U = \sqrt{2} F_1 - 1/2$ , la longueur du fond protégée  $L_p$  se calcule par :

$$\lambda_p = 6 \left( U - \frac{6S}{5} \right) \quad (5.6)$$

Avec :  $\lambda_p = L_p/h_1$ .

## **V.5 Approche de Abdel-Azim M. Negm (2000)**

### **V.5.1. Détection de la cavitation sur marche dans les bassins amortisseurs à forte pente sous l'effet d'un ressaut hydraulique**

La présence des marches sous les conditions d'un écoulement turbulent, résulte dans les zones de séparation de l'écoulement à proximité de ces marches, où se produit éventuellement des pressions négatives. La distribution des pressions dans les marches n'est pas hydrostatique sous certaines conditions d'écoulement. Elle peut être inférieure ou supérieure à la pression hydrostatique. Les zones de pression négative à proximité des marches ne peuvent pas être détectées en utilisant les piézomètres et nécessitent des transducteurs ou des dispositifs sensibles de mesure de pression. Quelque fois ces dispositifs ne sont pas disponibles et en plus leur coût est élevé.

L'auteur a proposé une approche semi-théorique pour la détection de l'existence de la cavitation à proximité des marches, sous l'effet d'un ressaut hydraulique. Les deux marches négative et positive de différentes hauteurs dans les bassins à forte pente sont considérées. Le coefficient de la force de pression sur les marches est pris comme indicateur de présence de pressions négatives et de la possibilité de développement d'une cavitation à proximité des marches.

La différence entre la distribution de la pression agissante sur la face de la marche et celle hydrostatique dans le cas des ressauts type A<sup>-</sup> et type B<sup>-</sup> est plus grande que dans le cas des ressauts type A<sup>+</sup> et type B<sup>+</sup>, et dépendent et des conditions de l'écoulement dans la marche et de la hauteur relative de cette dernière.

Les analyses de tous les résultats indiquent que la pression négative se produit probablement dans les zones à proximité de la marche négative sous l'effet du ressaut hydraulique et plus sévère dans le cas du ressaut type A<sup>-</sup>. De plus, la pente du fond affecte fortement la variation du coefficient de la force de pression et le taux de variations est indépendant du type du ressaut, du nombre de Froude et de la hauteur relative de la marche.

## V.6 Conclusion

Ce dernier chapitre de notre étude bibliographique a été consacré aux principaux travaux entrepris dans le domaine de ressaut hydraulique contrôlé par marche positive dans un canal de section rectangulaire. Nous avons abordé dans cette étude, les travaux de Forster et Skrinde (1950) et ceux de Hager et Sinniger (1985), les auteurs montrent, dans un premier temps que le rapport des hauteurs conjuguées varie pour la marche positive en fonction du nombre de Froude amont  $F_1$  et de la hauteur adimensionnelle de la marche  $S = s/h_1$ . Dans un second temps, les auteurs montrent que trois thèmes sont abordés dans la comparaison globale des marches positives : la stabilité du ressaut, son efficacité et sa compacité.

Hager et Bretz (1987) montrent que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude  $F_1$ . L'étude montre que l'efficacité relative minimale est donnée par le ressaut hydraulique type A est celle la plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique type B. L'étude expérimentale, a permis aux auteurs de conclure enfin que la marche positive offre une meilleure compacité, et la zone de dissipation est plus courte.

L'étude de Abdel -Azim M. Negm (2000) révèle que la cavitation est possible aux alentours de la marche négative tel que le coefficient de la force de pression est négatif au niveau des marches négatives sous l'effet d'un ressaut hydraulique. Pour les marches positives, ce coefficient est toujours positif et ainsi aucune cavitation n'est attendue dans les alentours de la marche positive dans les deux cas des ressauts type A et type B.