

CONCLUSION GENERALE

Notre thèse de doctorat a été consacré à l'étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil continu, dans deux profils de canaux prismatiques à parois rugueuses : le canal triangulaire et le canal profilé en "U". Le manuscrit est divisé en deux parties : une première partie bibliographique et une seconde partie ayant concerné notre propre contribution.

La première partie a été divisée en trois chapitres :

A travers le premier chapitre nous avons abordé deux configurations du ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section triangulaire, il s'agit du ressaut triangulaire classique de type A et le ressaut triangulaire contrôlé par seuil. Pour la première configuration nous avons examiné l'étude expérimentale de Hager et Wanoschek (1987) qui a extrapolé les résultats issus d'un profil semi triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° . L'étude a concerné les longueurs caractéristiques du ressaut et les profils de surface. L'étude montre que les rapports Y expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs à ceux calculés par l'équation de la quantité de mouvement. Cette différence est attribuée à l'effet des frottements sur les parois du canal et l'équation de la quantité de mouvement est alors modifiée en tenant compte de ceux-ci. Hager et Wanoschek (1987) proposent une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut, en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois latérales. La répartition spatiale du ressaut est tridimensionnelle et la présence de la paroi verticale, telle que celle du profil semi triangulaire a contribué sans doute à modifier le comportement et les caractéristiques du ressaut.

Pour la deuxième configuration de ressaut nous avons présenté l'approche de Achour et Debabeche (2003) qui a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90° . le ressaut est contrôlé de telle sorte que sa longueur L_j soit approximativement égale à la longueur du bassin, délimité à l'amont par le pied du ressaut et à l'aval par le seuil.

Le ressaut est créé sous différentes hauteurs initiales et à débit volumes variables; chaque série de mesures est toutefois effectuée pour une hauteur initiale constante.

L'écoulement incident est généré à la sortie d'un convergent, spécialement conçu, de hauteur géométrique égale à la hauteur initiale du ressaut. L'expérimentation a eu pour objectif de corrélérer les différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. L'étude de Achour et

Debabeche (2003) montre que ces paramètres sont en nombre de cinq, et pouvant former trois produits adimensionnels $S=s/h_1$, F_1 et x/h_1 ; S est la hauteur relative du seuil et x/h_1 sa position relative. L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a pu mener à l'établissement de relations simples à l'emploi, liant les trois variables adimensionnelles ci-dessus citées.

Dans le deuxième chapitre de la partie bibliographique nous avons traité les travaux les plus importants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en "U". Deux types de ressaut ont été étudiés. Il a été abordé en premier lieu l'approche de HAGER de 1987 et son complément de 1989. Le ressaut hydraulique dans un canal en forme de "U" est décrit. Concernant le rapport des hauteurs conjuguées, de petites différences entre l'écoulement dans un canal en forme de "U" et un canal de forme circulaire sont trouvées, plusieurs profils de surfaces sont discutés. La longueur relative de ressaut hydraulique est approximativement $L_j/h_2=6\pm 1$. En outre, Pour une petite profondeur relative y_1 , un fond de séparation distinct apparaît.

Ce chapitre a traité en second lieu le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince en canal profilé en "U". Une étude a été proposée, celle de Debabeche et Achour (2000).

Cette étude a été consacrée à l'évaluation par voie expérimentale des caractéristiques essentielles intervenant dans un ressaut contrôlé par seuil à paroi mince en canal profilé en "U". L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation de la hauteur relative aval $y_2 = h_2/D$ en fonction du débit relatif Q^* , pour sept valeurs distinctes de y_1 . A l'exception d'un léger décalage, qui est probablement dû à la négligence des forces de frottement par la relation théorique de HAGER (1987), les mesures expérimentales vérifient bien les courbes théoriques de HAGER (1987). Dans un second temps l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer la variation de la longueur relative L_j/h_2 du ressaut en fonction de nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. En effet Hager (1987) montre que ce rapport est approximativement égal à 6. Cette même valeur a été également trouvée pour le cas d'un ressaut rectangulaire, seulement l'auteur précise que l'effet de h_1/D sur la longueur relative L_j/h_2 du ressaut, n'a pas été défini. Dans l'évaluation de la variation de cette même longueur relative L_j/h_2 en fonction de F_1 , Debabeche et Achour (2000) ont trouvé sept nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la hauteur relative y_1 , montrant l'influence de celle-ci sur la longueur relative L_j/h_2 du ressaut. La valeur 6 du rapport L_j/h_2 a été atteinte pour une valeur de la hauteur relative $y_1= 0,2449$.

L'étude a abordé ensuite la relation $y_2 = f(y_1, S)$. Les points de mesures s'ajustent parfaitement autour de la première bissectrice. Une relation liant y , y_1 et S a été ensuite déduite de cette dernière. L'analyse des mesures expérimentales a également montré qu'un ajustement linéaire avec une très bonne corrélation a permis d'obtenir une relation unique entre la hauteur relative s/h_1 du seuil et le nombre de Froude F_1 . Une relation unique a également été trouvée entre la position relative x/h_1 du seuil, le rapport y des hauteurs conjuguées et la hauteur relative amont y_1 . La dernière partie de cette étude expérimentale a eu pour objet de décrire, le ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en "U".

Le dernier chapitre de la partie bibliographique a mis l'accent sur deux travaux de Rajaratnam, le premier en (1968) et le second en (2002) concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire respectivement à fond rugueux et à fond ondulé. Pour la première approche une relation empirique liant le rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 , le nombre de Froude F_1 et de la rugosité relative ε / h_1 , a été trouvée. Il a été trouvé également que la longueur du ressaut est environ la moitié du ressaut lisse correspondent pour des rugosités relatives supérieures à 0,10 ; cela semble un avantage significatif du ressaut avec lit rugueux. Pour ce qui est de la seconde approche relative au ressaut hydraulique à fond ondulé, il a été montré également que la longueur du ressaut est relativement moindre par rapport à son homologue lisse.

La deuxième partie de notre travail a concerné notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique dans quelques profils de canaux prismatiques, par la voie théorique et expérimentale. Deux types de canaux sont étudiés : le canal triangulaire et le canal profilé en "U".

Cette partie a été divisée en deux chapitres : le premier chapitre a concerné l'étude du ressaut hydraulique en canal triangulaire à parois rugueuses d'un point de vue théorique et expérimentale. Le deuxième chapitre a traité l'étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique en canal profilé en "U" à fond rugueux.

Pour 'le ressaut triangulaire rugueux' l'étude théorique a abouti à une relation théorique, qui a fait l'objet d'analyse statistique afin d'aboutir à une relation approchée explicite en Y . Celle-ci permet de trouver le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient C_r de résistance des parois du canal et du nombre de Froude F_1 incident de

l'écoulement. En outre, l'étude a pu évaluer la relation liant le coefficient C_r de résistance et la rugosité absolue ε .

L'étude expérimentale a abordé l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses. Quatre rugosités équivalentes ont alors été testées comprises entre 4,53mm et 8,73mm. Pour chacune des rugosités équivalentes étudiées, l'expérimentation a été menée sous sept ouvertures de hauteurs : $1,8\text{cm} \leq h_1 \leq 5\text{cm}$ avec plusieurs seuils. Une large gamme de débit et de nombre de Froude a été ainsi obtenue. Dans un premier temps nous sommes intéressés à la variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de nombre de Froude F_1 incident pour quatre valeurs de rugosités. On a remarqué quatre nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la rugosité, montrant ainsi la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction de nombre de Froude F_1 incident. On a constaté que la longueur relative L_j/h_1 augmente avec l'augmentation de nombre de Froude et diminue avec l'augmentation de la rugosité équivalente. Par ailleurs, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal triangulaire à parois rugueuses a montré qu'un ajustement de type linéaire est possible entre L_j/h_1 et F_1 .

Dans un second temps, nous avons analysé la variation du rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 incident pour cinq valeurs différentes de rugosités ε : 0,00mm ; 4,53mm ; 6,04mm ; 7,11mm et 8,73mm. Il ressort que le rapport des hauteurs conjuguées augmente avec l'augmentation du nombre de Froude et diminue avec l'augmentation de la rugosité des parois du canal. En outre, il a été trouvé que l'ajustement statistique des points de mesures expérimentales du ressaut contrôlé à parois rugueuses est du type logarithmique. Une équation liant Y , F_1 et ε est obtenue avec une assez bonne corrélation. En outre, l'étude expérimentale s'est intéressée à la dissipation d'énergie cinétique. Celle-ci étant représentée par le rendement. En effet, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que le ressaut dans un canal triangulaire à parois rugueuses dissipe mieux l'énergie que son homologue à fond lisse. Le dernier volet de cette étude expérimentale a abordé le profil généralisé du ressaut. Ainsi, pour trois rugosités équivalentes $\varepsilon=6,04\text{mm}$; $\varepsilon=7,11\text{mm}$ et $\varepsilon=8,73\text{mm}$, la variation du rapport adimensionnel vertical y en fonction du rapport adimensionnel horizontal X montre que, pour le même X , la valeur de y augmente avec l'augmentation de la rugosité équivalente ce qui montre clairement l'effet de la réduction de la profondeur de l'écoulement.

Le dernier chapitre de notre thèse de doctorat a concerné l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en "U" à fond rugueux, également d'un point de vue théorique et expérimentale. Pour l'étude théorique on a trouvé une relation approchée explicite en remplacement à la relation semi théorique très implicite en (y_2, y_1) , préalablement trouvée. Celle-ci permet de trouver le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient C_r de résistance du fond demi circulaire du canal profilé en "U" et du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. D'autre part, nous avons pu évaluer la relation liant le coefficient C_r de résistance et la rugosité relative ε/D , et l'expression semi théorique $f(y_1, y_2, F_1, C_r)$ devient de la forme $f(Y, F_1, \varepsilon/D)$.

A travers l'étude expérimentale du dernier chapitre on a analysé expérimentalement le ressaut hydraulique dans un canal profilé en "U" à fond rugueux. Cinq rugosités équivalentes ont alors été expérimentées : 3,55mm ; $\varepsilon=4,50$ mm ; $\varepsilon =5,63$ mm ; $\varepsilon=7,14$ mm et $\varepsilon =9,11$ mm. Pour chacune des rugosités équivalentes étudiées, l'expérimentation a été menée sous quatre ouvertures de hauteurs et une large gamme de débit et de nombre de Froude.

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction de nombre de Froude F_1 incident pour quatre valeurs de rugosité testées. On a remarqué quatre nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la rugosité, montrant ainsi l'influence de la rugosité sur la relation longueur relative L_j/h_1 du ressaut et nombre de Froude F_1 incident. Il ressort que la longueur relative L_j/h_1 augmente avec l'augmentation du nombre de Froude F_1 .

Par ailleurs, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal profilé en "U" à fond rugueux a montré qu'un ajustement de type puissance est possible entre L_j/h_1 et F_1 . Par ailleurs, on a analysé les mesures expérimentales de la longueur relative du rouleau L_r/h_1 de surface en fonction du nombre de Froude F_1 incident pour différentes rugosités relatives ε/D . Un ajustement de type puissance a été également obtenu.

Par ailleurs, nous avons analysé la variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 incident pour quatre valeurs différentes de rugosité, il ressort que le rapport des hauteurs conjuguées augmente avec l'augmentation du nombre de Froude incident. L'effet réducteur de la rugosité aux profondeurs de l'écoulement est nettement remarqué. En outre, l'ajustement statistique de type linéaire des points de mesures du ressaut contrôlé à fond rugueux, a permis d'aboutir, avec une bonne corrélation, à une équation de type linéaire liant Y , F_1 et ε/D . L'étude expérimentale s'est intéressée aussi à

la dissipation d'énergie cinétique. En effet, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que le ressaut hydraulique dans un canal profilé en " U " à fond rugueux dissipe mieux l'énergie que son homologue à fond lisse.

Le dernier volet de cette étude expérimentale a abordé le profil généralisé du ressaut. En effet, pour trois rugosités équivalentes expérimentées : $\varepsilon=0,00\text{mm}$; $\varepsilon=3,55\text{mm}$ et $\varepsilon= 4,30\text{mm}$, la variation du rapport adimensionnel vertical y en fonction du rapport adimensionnel horizontal X montre que, pour le même X , la valeur de y augmente avec l'augmentation de la rugosité équivalente. Par conséquent, l'effet de la compacité du ressaut et de la réduction de la profondeur de l'écoulement est observé.