

### III.1. INTRODUCTION

Ce chapitre traitera des travaux les plus importants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond rugueux. Les études les plus connues dans ce domaine sont certainement celles de Rajaratnam de 1968 et 2002 correspondant respectivement au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond rugueux et le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond ondulé.

### III.2. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A FOND RUGUEUX

#### III.2.1. APPROCHE de RAJARATNAM (1968)

##### III.2.1.1. Description des essais

Les essais ont été réalisés dans un canal rectangulaire de largeur 0,311 m, de profondeur 0,61 m et de longueur 4,877 m avec des côtés lisses en plexiglas et un fond rugueux. Cinq valeurs de rugosité ont été testées :  $\varepsilon(\text{mm}) = 0,975 ; 2,225 ; 2,256 ; 2,469$  et 9,144.  $\varepsilon$  a été définie comme la rugosité équivalente des particules étendues uniformément sur le lit.

En tout, 37 essais ont été réalisés. Le profil moyen de surface d'eau, la longueur du rouleau de surface  $L_r$  et la longueur du ressaut  $L_j$  ont été mesurés. Selon Rajaratnam (1968), les mesures de rouleau sont très fiables, tandis que les mesures de la longueur de ressaut ont donné quelques erreurs (de manipulations) dans la fixation de la fin du ressaut.

##### III.2.1.2. Analyse des résultats

###### III.2.1.2.1. Hauteur finale $h_2$

Pour un ressaut sur un fond rugueux de rugosité absolue  $\varepsilon$ , avec un écoulement torrentiel de hauteur initiale  $h_1$  et de vitesse moyenne  $U_1$ , la hauteur finale  $h_2$  s'écrit comme suit :

$$h_2 = f_1(h_1, U_1, g, \rho, \nu, \varepsilon) \quad (3.1)$$

où  $\rho$  est la masse spécifique et  $\nu$  est la viscosité cinématique du liquide. En utilisant le principe d'analyse adimensionnelle, nous pouvons montrer, que l'équation (3.1) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_2 \left[ F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{g h_1}}, R = \frac{U_1 h_1}{\nu}, \frac{\varepsilon}{h_1} \right] \quad (3.2)$$

où  $R$  est le nombre de Reynolds. Quand la valeur de  $R$  est très grande, l'effet de la viscosité du liquide sur la diffusion turbulente est négligé et l'équation (3.2) se réduit sous la forme suivante :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_3 \left[ F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{g h_1}}, \frac{\varepsilon}{h_1} \right] \quad (3.3)$$

La Figure (3.1) indique la variation de  $h_2/h_1$  en fonction de  $F_1$  pour différents valeurs de la rugosité relative  $\varepsilon/h_1$ .

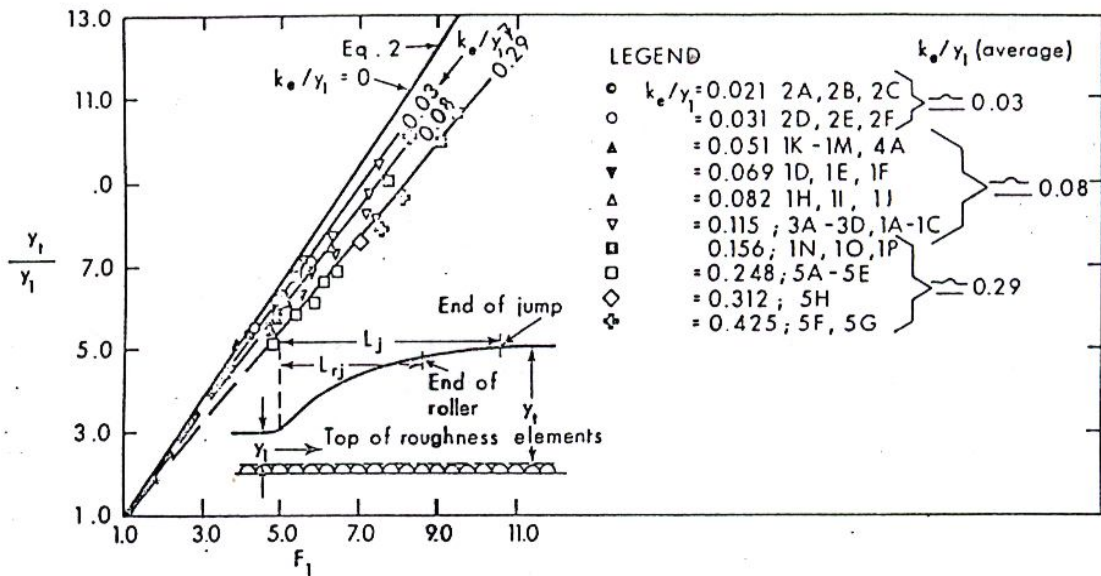


Figure 3.1 : Variation de  $h_2/h_1$  en fonction de  $F_1$ .

La courbe de l'équation (3.3) représentée dans la Figure (3.1), peut être considérée comme limite de la rugosité relative égale à zéro. Trois droites sont dessinées pour  $\varepsilon/h_1 = 0,03$  ;  $0,08$  et  $0,29$  ; Il se déduit les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
h_2/h_1 &= 1,30 F_1 - 0,3 \quad \text{pour} \quad \varepsilon/h_1 = 0,03 \\
h_2/h_1 &= 1,22 F_1 - 0,24 \quad \text{pour} \quad \varepsilon/h_1 = 0,08 \\
h_2/h_1 &= 1,10 F_1 - 0,10 \quad \text{pour} \quad \varepsilon/h_1 = 0,29
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Selon Rajaratnam (1968), il serait plus pratique de reformuler l'équation de Belanger sous la forme approximative suivante :

$$h_2/h_1 = 1,41 F_1 - 0,5 \tag{3.5}$$

Lorsqu'on élimine les constantes du coté droit des équations (3.4) et (3.5), l'erreur n'étant pas significative pour les grandes valeurs de  $F_1$ , on pourrait écrire ainsi :

$$\frac{h_2}{h_2^*} = \lambda \left[ \frac{\varepsilon}{h_1} \right] \tag{3.6}$$

où  $\lambda$  est fonction seulement de la rugosité relative. Pour les trois valeurs de  $\varepsilon/h_1$  dans l'équation 3.4,  $\lambda$  devient égal respectivement à 0,92 ; 0,864 et 0,78. Les résultats expérimentaux sont retracés dans la Figure (3.2) avec  $h_2/h_1$  en fonction de  $\varepsilon/h_1$  et une courbe moyenne pourrait en effet être tracée comme résultat préliminaire. Les trois valeurs moyennes mentionnées précédemment sont montrées aussi sur la Figure (3.2).

On observe que l'augmentation de la rugosité relative,  $h_2/h_2^*$  diminue de l'unité à  $\varepsilon/h_1 = 0$  jusqu'à environ 0,783 à  $\varepsilon/h_1 = 0,5$ . Ainsi la réduction de la hauteur finale  $h_2$  est tout à fait appréciable comparée à la hauteur finale classique, quand la rugosité est grande.

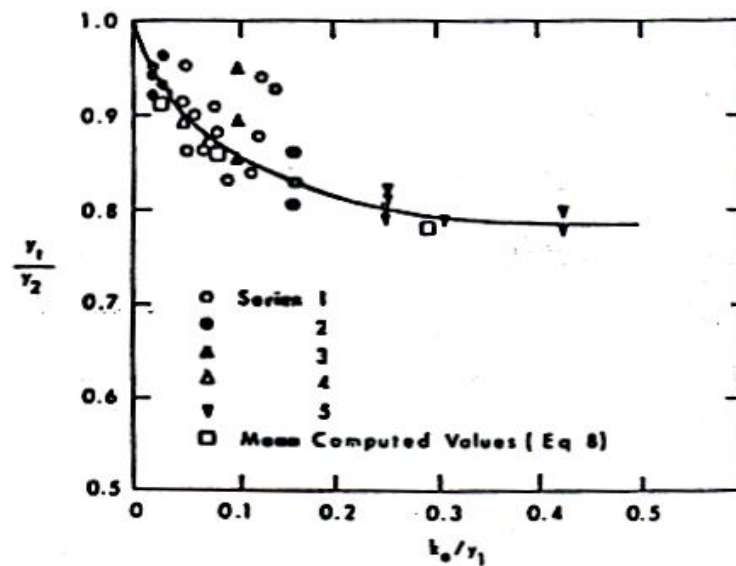


Figure 3.2 : Variation de  $h_2/h_2^*$  en fonction de  $\varepsilon/h_1$

### III.2.1.2.2. Longueur caractéristique

Les résultats expérimentaux de la longueur relative du rouleau de surface (par rapport à la hauteur conjuguée aval  $h_2$  du ressaut classique) sont indiqués dans la Figure (3.3, a) avec la courbe du ressaut classique. Une observation immédiate consiste à ce que pour  $\varepsilon/h_1$  plus grand que 0,05 environ, la longueur du rouleau du surface à fond rugueux est réduite de moitié environ comparée à son homologue lisse. Des conclusions semblables pourraient être déduites quand à la longueur du ressaut représentée à la Figure (3.3.b). Selon Rajaratnam (1968), les ressauts obtenus sont en accord au moins qualitativement avec les observations antérieures de Vyzgo et Kuzminov.

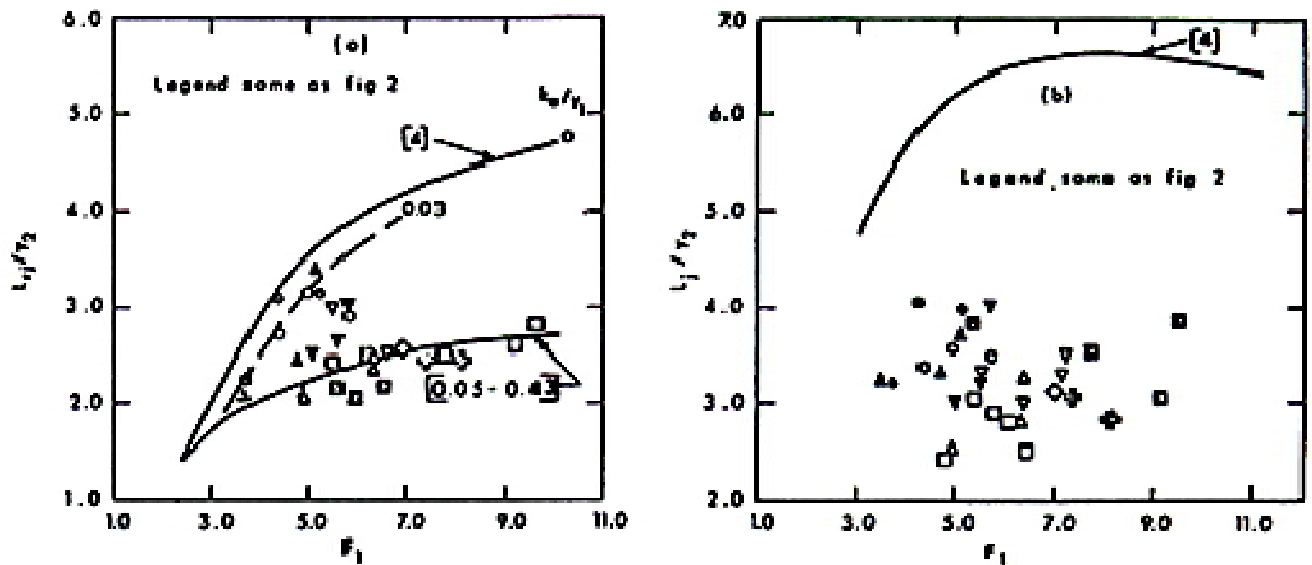


Figure 3.3 : Variation de la longueur relative : (a)  $L_r/h^*_2$  en fonction de  $F_1$  ; (b)  $L_r/h^*_2$  en fonction de  $F_1$ .

### III.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

#### A FOND ONDULE

#### III.3.1. Approche de RAJARATNAM (2002)

##### III.3.1.1. Description des essais

Le ressaut hydraulique est produit dans un canal de 0.446 m de largeur, 0.60 cm de profondeur et de longueur égale 7.6 m avec des parois en plexiglas. L'ondulation du fond du canal est réalisée par du métal en aluminium (Figure 3.4). Le lit ondulé crée des remous turbulents. La distance "s" entre les deux ondulations métalliques sinusoïdales est égale à 68 mm, et l'épaisseur "t" est de 13 à 22 mm. Trois pompes alimentent le réservoir lié au canal, et les débits sont mesurés par un débitmètre magnétique. L'eau entre dans le canal où un écoulement torrentiel uniforme est produit avec une profondeur  $h_1$ . Un obstacle est utilisé pour contrôler la profondeur amont de l'écoulement dans le canal.

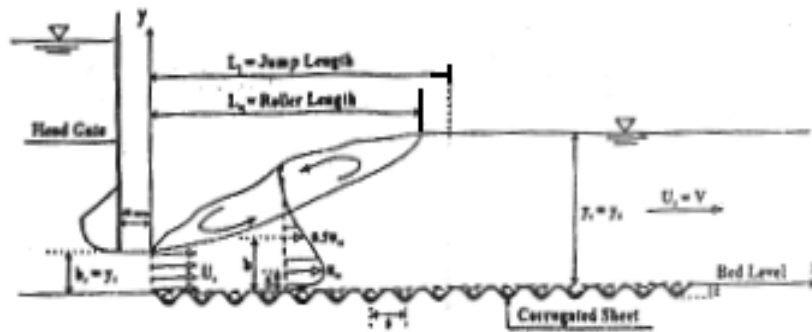


Figure 3.4 : Schéma de définition du ressaut hydraulique à fond ondulé

Le tube de Prandtl de diamètre extérieur 3.0 mm, est connecté au manomètre vertical, pour la mesure du temps moyen des vitesses longitudinales  $U$ . Les profils de vitesse sont mesurés dans plusieurs sections verticales à l'intérieur du ressaut, souvent à l'axe du canal au-dessus des crêtes de l'ondulation. Le nombre de Reynolds  $R_e = \frac{U_1 \times h_1}{\nu}$  est en suite entre 50800 et 206756.

Trois valeurs de la rugosité relative, définie comme le rapport entre l'épaisseur de l'ondulation " $t$ " et de la profondeur  $h_1$  de l'amont du ressaut de valeurs 0,50 ; 0,43 et 0,25 sont testées.

La profondeur relative  $y_{2*} = \frac{h_{2*}}{h_1}$  est donnée par l'équation de Belanger pour le canal rectangulaire à fond lisse :

$$\frac{h_{2*}}{h_1} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (3.7)$$

### III.3.1.2. Résultats expérimentaux

La Figure 3.5 (a) montre les profils de surface du ressaut à fond ondulé pour onze expériences effectuées, avec une précision des mesures de 0,01 mm.

Ces profils de surfaces permettent la détermination de la profondeur  $h_2$  à l'aval du surface du ressaut hydraulique et qui sont indiqués dans la Figure 3.5 (b) où le rapport  $\frac{[h(x) - h_1]}{(h_2 - h_1)}$  est fonction de  $\frac{x}{L_j}$ , telle que :  $h(x)$  est la profondeur de l'écoulement dans une section quelconque  $x$ .

La Figure 3.5 (b) montre aussi les profils de surface du ressaut qui sont approximativement semblables et peuvent être représentés par une courbe moyenne.

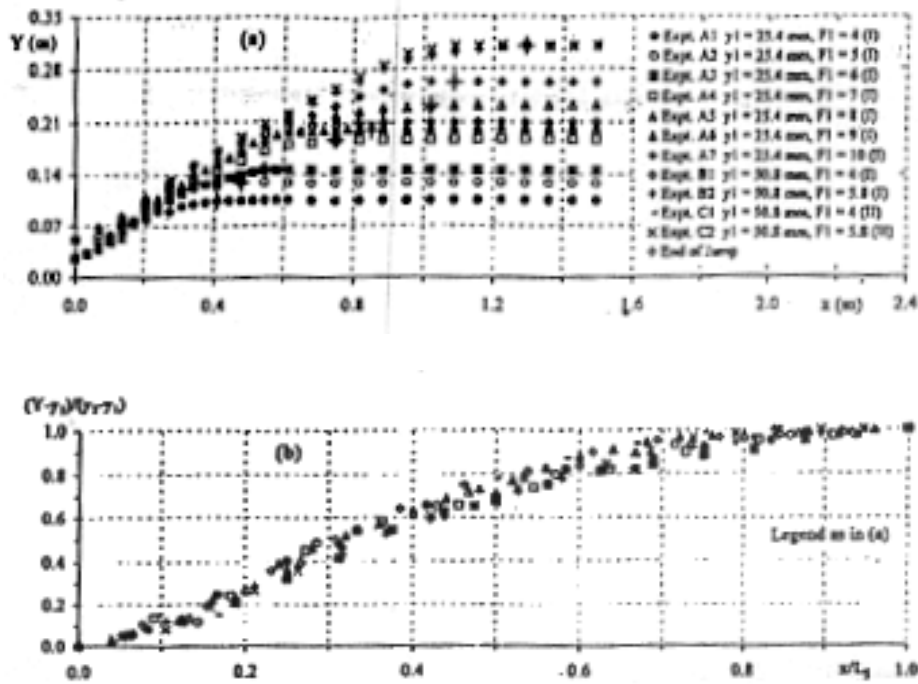


Figure 3.5 : (a) Profils de surface du ressaut ; (b) Profil généralisé de surface du ressaut

Pour un ressaut à fond ondulé, de rugosité d'épaisseur " $t$ ", avec un écoulement torrentiel de profondeur amont  $h_1$ , de vitesse moyenne  $U_1$ , la profondeur aval  $h_2$  peut être écrite comme suit :

$$h_2 = f_2 (h_1, U_1, g, \rho, \nu, t) \quad (3.8)$$

Où :  $\rho$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) : masse volumique du liquide et  $\nu$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) : viscosité cinématique.

La relation (3.8) peut être également reformulée comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_2 \left( F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, \text{Re} = \frac{U_1 h_1}{\nu}, \frac{t}{h_1} \right) \quad (3.9)$$

Pour de grandes valeurs du nombre de Reynolds, la viscosité cinématique peut être négligée. (Voir Rajaratnam 1976 ; Hager et Bremen 1989), l'équation (3.9) peut s'écrire comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_2 \left( F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, \frac{t}{h_1} \right) \quad (3.10)$$

Les résultats expérimentaux sont alors illustrés par la Figure 3.6, représentant la variation de  $\frac{h_2}{h_1}$  en fonction de  $F_1$ , en tenant compte de la rugosité relative  $\frac{t}{h_1}$ . L'équation (3.7) est également montrée dans la même figure. La Figure 3.6 montre aussi que la rugosité relative  $\frac{t}{h_1}$  n'a pas un effet significatif sur le rapport  $\frac{h_2}{h_1}$ .

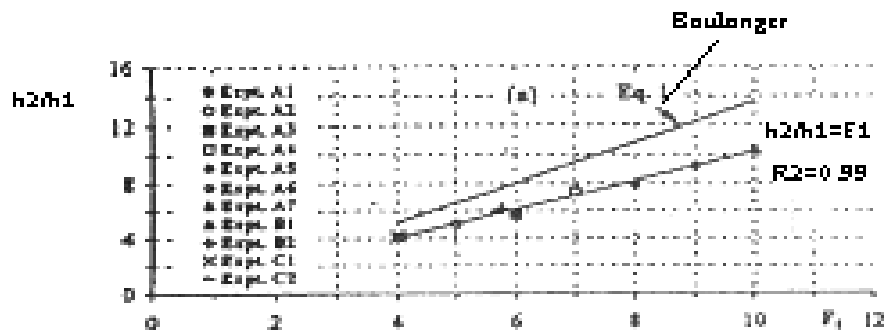


Figure 3.6 : Variation de  $\frac{h_2}{h_1}$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

Il a été trouvé aussi que le rapport des hauteurs conjuguées  $\frac{h_2}{h_1}$  est approximativement égal au nombre de Froude incident  $F_1$ . Selon Hence l'équation 3.10 peut être réécrite comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} \cong F_1 \quad (R^2 = 0,99) \quad (3.11)$$

Par contre, pour les expériences effectuées par Rajaratnam (1968), pour le cas du canal rectangulaire à fond rugueux, la rugosité relative s'avère un paramètre important.

Par ailleurs, pour des valeurs relativement grandes du nombre de Froude incident, le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique peut être écrit comme suit :

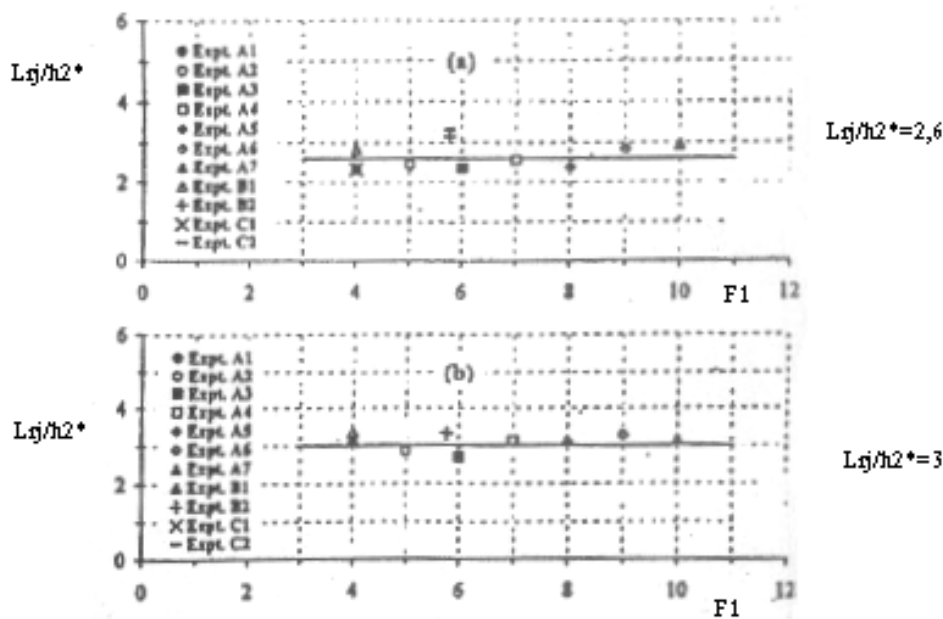
$$\frac{h_2^*}{h_1} = \sqrt{2}F_1 - 1 \cong \sqrt{2}F_1 \quad (3.12)$$

Les résultats expérimentaux pour la longueur de rouleau de surface  $L_r$  et la profondeur aval  $h_2^*$  du ressaut hydraulique classique sont montrés dans la Figure 3.7 (a) où il a été montré que le rapport  $L_r/h_2^*$  est approximativement égal à 2,6.



La Figure 3.7 (b) illustre la variation de la longueur relative  $L_j/h_2^*$  du ressaut hydraulique avec le nombre de Froude incident  $F_1$  où on voit que  $L_j/h_2^*$  est presque égal 3,0.

Il est intéressant d'observer que la longueur du ressaut avec un lit ondulé est approximativement la moitié que son homologue du ressaut classique.



**Figure 3.7 :** Variation de la longueur relative en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .  
(a) du rouleau de surface ; (b) du ressaut.

### III.4. CONCLUSION

En se basant sur les résultats expérimentaux obtenus par Rajaratnam (1968) pour les ressauts formés dans un canal rectangulaire horizontal avec un lit rugueux, dans lequel la rugosité relative  $\varepsilon/h_1$  a été variée de 0,02 à 0,43 et le nombre de Froude incident de 3 à 10, quelques conclusions sont alors déduites. En effet, pour un ressaut formé sur un lit rugueux, le rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  est fonction du nombre de Froude incident  $F_1$  et de la rugosité relative  $\varepsilon/h_1$ . En considérant  $h_2^*$  comme la hauteur conjuguée aval du ressaut correspondant au ressaut sur un fond lisse alors  $h_2/h_2^*$  a été trouvé comme étant fonction seulement de la rugosité relative. Il a été trouvé également que la longueur du ressaut rugueux est environ la moitié relativement au fond lisse, pour des rugosités relatives supérieures à 0.10, cela semble un avantage significatif du ressaut à fond rugueux.

Par ailleurs, des expérimentations ont été faites par Rajaratnam (2002) au niveau du laboratoire sur le ressaut hydraulique à fond ondulé pour une gamme de nombre de Froude variant entre 4 et 10 et trois valeurs de la rugosité relative  $t/h_1$  : 0,25 au 0,50. Il a été montré que le rapport  $h_2/h_1$  des profondeurs du ressaut à fond ondulé pour une gamme de nombre de Froude, est plus petit que son homologue à fond lisse. Ceci montre que le fond ondulé paraît une idée attirante qui pourrait être très utile aux recherches de future. La raison de la réduction de la profondeur du ressaut est due à l'interaction de l'écoulement torrentiel avec le lit ondulé.