

4.4.4 Ressaut hydraulique

1° Le ressaut hydraulique, plus brièvement appelé ressaut (voir Fig. 4.17) :

- se produit si un écoulement passe (brusquement) du régime (amont) sur-critique, $Fr_1 > 1$, au régime (aval) sous-critique, $Fr_2 < 1$;
- se manifeste par une brusque surélévation (discontinuité) du niveau d'eau, $(h_2 - h_1)$, sur une très courte distance;
- occupe une position fixe - onde stationnaire - dans le canal, si l'écoulement est permanent;
- est accompagné par des mouvements très turbulents avec des instabilités à la surface (ondulation et entraînement d'air);
- provoque une dissipation importante de l'énergie mécanique, $h_{RH} = H_{s2} - H_{s1}$;
- se présente souvent sous la forme d'une barre d'écume déferlant en rouleaux.

Des exemples où l'on peut rencontrer un ressaut hydraulique sont donnés sur la Fig. 4.2a.

2° Les profondeurs, h_2 et h_1 , sont appelées *profondeurs conjuguées*; elles encadrent un ressaut. La *hauteur* d'un ressaut est donnée par la différence des profondeurs conjuguées, $(h_2 - h_1)$.

3° La *théorie* du ressaut a pour objet la détermination d'une relation entre les profondeurs conjuguées, h_2 et h_1 , pour un canal et un débit donnés.

L'équation d'énergie, éq. 2.10, ne sera pas d'une grande aide pour établir cette relation; la perte de charge est très importante et, de plus, on ne la connaît pas. L'équation de la quantité de mouvement, éq. 4.39, sera par contre très intéressante, les forces extérieures intervenant.

- i) On considère un canal prismatique avec deux sections, S_1 et S_2 , situées de part et d'autre du ressaut, suffisamment éloignées pour qu'on puisse considérer la pression comme hydrostatique, mais toutefois assez rapprochées pour qu'on puisse négliger les forces de frottement, F_F , sur les parois.
- ii) L'équation de la quantité de mouvement permanent énonce que la quantité de mouvement sortant à travers la surface d'un volume fluide est équivalente à la somme des forces qui lui sont appliquées (voir *Graf & Altinakar*, 1991, p. 145).

En projection dans la direction du canal (voir Fig. 4.17), on écrit :

$$\Sigma F_x = F_{P_1} - F_{P_2} + W \sin \alpha - F_F = \rho Q (U_2 - U_1) \quad (4.39)$$

où F_{P_2} et F_{P_1} sont les forces de pression agissant sur les sections de sortie et d'entrée, $W \sin \alpha$ la force de la pesanteur et F_F la force de frottement sur les parois. Les deux dernières forces (ensemble) peuvent souvent être négligées.

iii) Pour un canal de section rectangulaire, en introduisant :

$$S_1 = h_1 B, S_2 = h_2 B \quad ; \quad q = Q/B \quad ; \quad F_{P_2} = \gamma(h_2/2)S_2, F_{P_1} = \gamma(h_1/2)S_1$$

l'éq. 4.39 s'écrit (voir *Bakhmeteff*, 1932, p. 240) :

$$\frac{q^2}{gh_1} + \frac{h_1^2}{2} = \frac{q^2}{gh_2} + \frac{h_2^2}{2} \quad (4.40)$$

iv) Cela revient à dire qu'une fonction de l'impulsion totale définie ainsi :

$$M = \frac{q^2}{gh} + \frac{h^2}{2}$$

prend la même valeur de part et d'autre du ressaut, c.-à-d. $M_1 = M_2$. On peut procéder par résolution graphique (voir Fig. 4.17); les courbes, $M = f(h)$, seront généralement tracées par points pour les différents débits; chaque courbe a deux branches et passe à la profondeur critique, h_c , par un minimum. A chaque verticale d'une courbe correspondent deux profondeurs conjuguées, h_1 et h_2 .

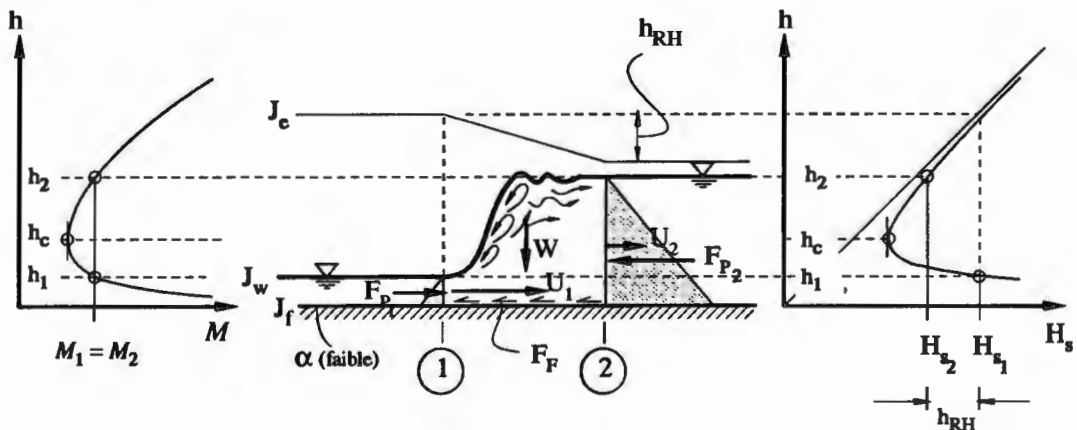


Fig. 4.17 Schéma d'un ressaut hydraulique.

v) En utilisant une relation de continuité, $q = U_1 h_1 = U_2 h_2$, l'éq. 4.40 peut s'écrire :

$$\frac{1}{2} (h_2^2 - h_1^2) = \frac{U_1^2}{g} h_1 \left(1 - \frac{h_1}{h_2}\right)$$

et après division par $(h_2 - h_1)$, on a :

$$h_2^2 + h_2 h_1 - 2h_1 \frac{U_1^2}{g} = 0 \quad (4.40a)$$

Des deux racines de l'équation, une seule est positive et convient :

$$h_2 = -\frac{1}{2} h_1 \left(- \sqrt{\frac{h_1^2}{4} + 2h_1 \frac{U_1^2}{g}} \right) \quad (4.41)$$

En la rendant adimensionnelle, on a :

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 Fr_1^2} - 1 \right) \quad (4.41a)$$

ou :

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 Fr_2^2} - 1 \right) \quad (4.41b)$$

avec les nombres de Froude donnés par :

$$Fr_1^2 = \frac{U_1^2}{gh_1} \quad \text{et} \quad Fr_2^2 = \frac{U_2^2}{gh_2}$$

Les dernières relations – connues sous le nom d'équation de *Bélanger* (voir *Resch et Leutheusser*, 1972) – permettent pour un débit, Q , donné, de calculer l'une des profondeurs d'eau, h_1 ou h_2 , si l'on connaît l'autre, h_2 ou h_1 . On peut aussi vérifier que la profondeur critique, $h_1 = h_2 = h_c$, satisfait aux équations, éq. 4.41a.

- vi) Pour un ressaut dans un canal à *fond incliné*, la force de la pesanteur ne doit pas être négligée (voir éq. 4.39). Le rapport des profondeurs conjuguées, h_2/h_1 , se calcule (voir *Ranga Raju*, 1981, p. 183) avec :

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \chi_{RH} Fr_1^2} - 1 \right)$$

Si α est l'angle du fond du canal en degrés, $\chi_{RH} = (10^{0.027} \alpha)$ représente un coefficient empirique de Rajaratnam.

- vii) Les ressauts dans les canaux de section non rectangulaire ont été étudiés et sont résumés dans *Silvester* (1964).

4° Le ressaut provoque une importante dissipation d'énergie mécanique; ce phénomène est irréversible. Les caractéristiques turbulentes sont très complexes et dépendent fortement des conditions de l'écoulement supercritique amont (voir *Resch et Leutheusser*, 1972).

- i) Dans un canal rectangulaire, on peut calculer la *perte d'énergie*, h_{RH} , à travers la courte distance du ressaut. La variation de la charge spécifique (voir Fig. 4.17) s'écrit :

$$h_{RH} = H_{s1} - H_{s2} = \left(h_1 + \frac{U_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{U_2^2}{2g} \right)$$

d'où l'on tire, en tenant compte de l'éq. 4.40a :

$$h_{RH} = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2} \quad (4.42)$$

- ii) On définit le rendement du ressaut comme le ratio de l'énergie potentielle reçue à l'énergie cinétique perdue, donc :

$$\eta = \frac{h_2 - h_1}{U_1^2/2g - U_2^2/2g} = \frac{4h_1h_2}{(h_1 + h_2)^2} \quad (4.43)$$

Pour une forte différence de niveau, η est faible; pour une faible différence, η s'approche de l'unité.

- 5° On distingue différentes formes du ressaut (voir Fig. 4.18) dépendant de l'exhaussement plus ou moins important de la surface d'eau (voir *Jaeger*, 1954, p. 158).

- i) Un ressaut *ordinaire* peut être d'une grande hauteur; il se manifeste habituellement pour $h_1/h_c < 0.61$. On constate la formation d'un ou de plusieurs rouleaux de surface dont l'axe horizontal se trouve au-dessus de l'écoulement divergent qu'il recouvre. Si le nombre de Froude amont est de $1.7 < Fr_1 < 2.5$, on parle d'un ressaut faible; pour $Fr_1 > 4.5$, on a affaire à un ressaut fort et bien stationnaire.

- ii) Un ressaut *ondulé* dont les profondeurs conjuguées, h_1 et h_2' , sont voisines de la profondeur critique, h_c , est délimité par $h_1/h_c > 0.67$. Le rouleau de surface n'existe plus; il est remplacé par une suite d'ondulations de surface. Le nombre de Froude est faible, $Fr_1 < 1.7$.

- 6° La *longueur* d'un ressaut, L_{RH} , est la distance entre les deux sections terminales (voir Fig. 4.18); elle est assez bien définie pour un ressaut ordinaire, mais mal définie pour un ressaut ondulé.

La longueur d'un ressaut ordinaire dans un canal rectangulaire est donnée empiriquement par :

$$5 < \left(\frac{L_{RH}}{h_2 - h_1} \right) < 7 \quad (4.44)$$

D'autres expériences (voir *Henderson*, 1966, p. 219) montrent que la longueur peut être prise ainsi :

$$L_{RH} \approx 6.1 h_2 \quad (4.45)$$

pour $4.5 < Fr_1 < 13$. En dehors de cette gamme de nombres de Froude, Fr_1 , les valeurs sont plus petites. Pour les canaux non rectangulaires, il faut consulter la littérature (voir *Silvester*, 1964).

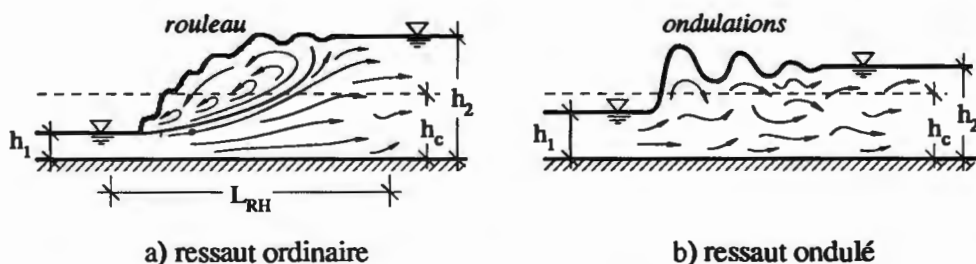


Fig. 4.18 Formes d'un ressaut hydraulique.

7° Lorsqu'un régime passe du type torrentiel, $Fr_1 > 1$, au type fluvial, $Fr_2 < 1$, il se forme toujours un ressaut. Pour déterminer la *position du ressaut* (voir Fig. 4.19), il faut tracer la ligne d'eau en amont et celle en aval. Le ressaut se placera au droit, où se trouve la section dont les profondeurs sont conjuguées, h_1 et h_2 , et liées par la relation de l'éq. 4.41. Prenons le cas où l'emplacement du ressaut est contrôlé par la situation hydraulique aval. Si l'on fait monter le niveau aval, le ressaut se déplacera vers l'amont; si l'on fait baisser le niveau aval, il se déplacera vers l'aval.

On peut procéder par résolution graphique (voir Fig. 4.19) - on prend ici un canal à pente faible - :

- on trace les lignes d'eau amont et aval,
- on trace la courbe conjuguée (voir éq. 4.41) de la ligne d'eau amont,
- le ressaut s'installe à l'intersection de la ligne aval et de cette courbe conjuguée,
- le ressaut d'une longueur, L_{RH} , nulle s'établit entre les points A' et Z',
- on fixe la longueur, L_{RH} , du ressaut (voir éq. 4.45),
- on localise le ressaut de manière que la droite, Z''Z', parallèle au fond du canal ait une longueur égale à celle du ressaut,
- un ressaut, d'une longueur, L_{RH} , s'établit entre les points A et Z.

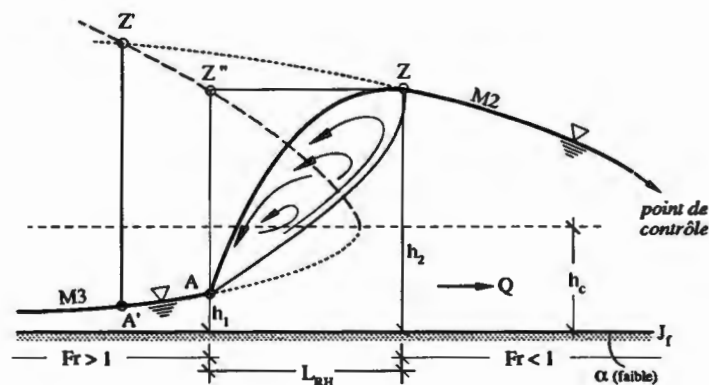


Fig. 4.19 Position du ressaut hydraulique.

- 8° Un ressaut hydraulique est souvent *utilisé* dans les constructions hydrauliques comme dissipateur d'énergie. L'énergie cinétique existant en amont d'un ressaut est considérablement réduite (voir Fig. 4.17) sur une faible distance; le ressaut entraîne une perte de charge appréciable.

Pour les grandes vitesses, $Fr_1 > 1$, les canaux à fond mobile s'éroderaient (voir sect. 3.4.2); par conséquent, une protection du lit par un radier artificiel, appelé *bassin d'amortissement*, s'impose. La longueur du ressaut (pour tous les débits possibles) y est contenue, de sorte qu'une vitesse raisonnable, $Fr_2 < 1$, quitte le bassin.

Pour contrôler ou provoquer le ressaut, on peut installer des seuils (dentés) ou des décrochements (voir sect. 4.5) au fond du canal.

Les différentes configurations des bassins d'amortissement et leur comportement hydraulique sont présentés dans les livres de *Chow* (1959, chap. 15), de *Hoffmann* (1977, chap. 9), de *Sinniger et Hager* (1989, chaps. 16 et 17) et de *Naudascher* (1987, chap. 2).

Un ressaut peut aussi être utilisé comme *mélangeur* du fait de son action violente dans les rouleaux qui brassent l'eau avec l'air ou avec un autre fluide (contenant des produits chimiques) ajouté.

4.5 TRANSITIONS

- 1° Une transition, qui est le bref passage d'un écoulement uniforme à un autre, représente le cas général d'un écoulement rapidement varié sur une courte distance (voir sect. 4.4) dans un canal non prismatique où la section est variable. L'écoulement ne traverse pas forcément une section où la profondeur est critique.