

Chapitre I

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

I.1 Introduction

Le ressaut hydraulique est défini comme le passage de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial. Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur L_r appelée longueur du rouleau. Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible. C'est le profil de référence qui a servi de base à l'étude du phénomène tant du point de vue théorique qu'expérimental.

Les caractéristiques du ressaut sont essentiellement :

⇒ les longueurs L_r^* et L_j^* qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut.

⇒ les hauteurs initiale h_1 et finale h_2^* , appelées également hauteurs conjuguées.

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ses sections initiale et finale à la charge totale dans sa section initiale.

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un nombre de Froude $F_1 > 1$ étroitement lié au débit volume, à la hauteur initiale h_1 ainsi qu'à la forme géométrique du canal.

On s'accorde à dire que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation liant le rapport $Y^* = h_2^*/h_1$ des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 .

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse, continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative. Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau à l'aval, de contrôler sa position lors de changements des paramètres de l'écoulement tels que les débits et contribuer enfin à une meilleure compacité du bassin.

Dans ce chapitre nous examinerons le ressaut hydraulique classique, où nous citerons essentiellement les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

I.2 Ressaut hydraulique classique

Les travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique sont nombreux et le présent sous chapitre se propose de passer en revue les principaux d'entre eux.

I.2.1 Forme du ressaut classique

Selon la classification proposée par Bradley et Peterka (1957), le ressaut classique peut se présenter sous quatre formes distinctes. Cette classification se base essentiellement sur la valeur du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, en excluant les formes obtenues pour $F_1 < 1,7$.

Ces dernières sont décrites par plusieurs auteurs dont Anderson (1978) et ne répondent pas aux exigences d'un bassin de dissipation d'énergie ; les ressauts correspondants sont dits ondulés présentant tantôt une surface libre régulièrement perturbée et lisse ($1 < F_1 < 1,4$), tantôt une surface libre irrégulièrement ondulée ($1,4 < F_1 < 1,7$).

Selon la classification de Bradley et Peterka (1957) on distingue :

1. LE PRE-RESSAUT obtenu pour la gamme $1,7 < F_1 < 2,5$ (figure 1,a).

La surface du ressaut est composée d'une série de petits rouleaux pour $F_1 = 1,7$; ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible.

2. LE RESSAUT DE TRANSITION obtenu pour la gamme $2,5 < F_1 < 4,5$ (figure 1,b). Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

3. LE RESSAUT STABLE obtenu pour la gamme $4,5 < F_1 < 9$ (figure 1,c). C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans les bassins de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

4. LE RESSAUT AGITE OU CLAPOTEUX obtenu pour $F_1 > 9$ (figure 1,d). Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très élevée. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.

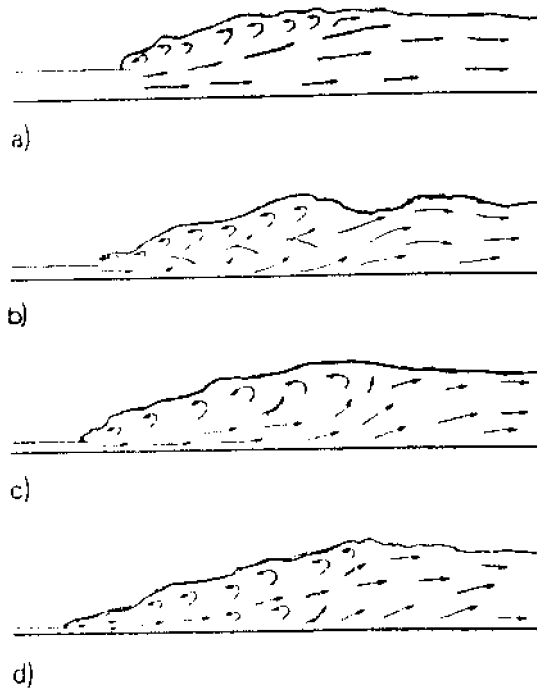


Figure 1.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). a) pré-ressaut, b) ressaut de transition, c) ressaut stable et d) ressaut agité.

I.2.2 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure 1.2 montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiale et finale 1 et 2.

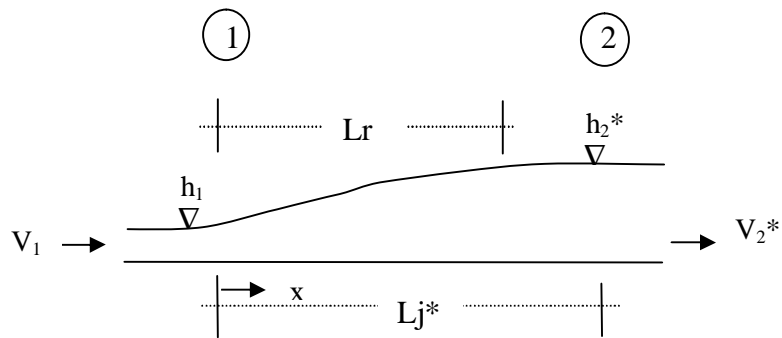


Figure 1.2 : Ressaut hydraulique classique.

L'écoulement à l'amont du ressaut (à l'origine) est caractérisé par une profondeur h_1 et une vitesse moyenne V_1 . L'équation de continuité permet d'écrire :

$$V_1 = Q/A_1 \quad (1.1)$$

Q est le débit volume et A_1 l'aire de la section mouillée initiale qui s'exprime par :

$$A_1 = b.h_1 \quad (1.2)$$

b est la largeur du canal rectangulaire.

Comme nous l'avons déjà dit le ressaut est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale ; c'est en fait la seconde loi de Newton qui est appliquée énonçant que la variation de la quantité de mouvement s'opérant entre les sections 1 et 2 est égale à la somme des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement. L'application de cette loi a nécessité quatre hypothèses simplificatrices :

1. la répartition des pressions dans la section finale et initiale est hydrostatique ;
2. la distribution des vitesses y est uniforme ;
3. la perte de charge par frottement est négligeable ;
4. la résistance de l'air est négligeable.

Sachant que $\rho.Q.V$ représente la quantité de mouvement, l'application de la loi de Newton mène à écrire :

$$\varpi.b.h_1^2/2 + \rho.Q.V_1 = \varpi.b.h_2^{*2}/2 + \rho.Q.V_2^* \quad (1.3)$$

où $\varpi = \rho.g$, ρ est la masse volumique du liquide et g l'accélération de la pesanteur.

En tenant compte des relations (1.1) et (1.2) et sachant que le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut est tel que :

$$F_1^2 = Q^2 / (g.b^2.h_1^3) \quad (1.4)$$

La relation (1.3) conduit à écrire :

$$Y^* = h_2^*/h_1 = 0,5 \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (1.5)$$

La relation (1.5) est connue sous le nom d'équation de Bélanger et permet d'évaluer le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 . Hager et Sinniger (1985) proposent une relation approchée applicable pour les nombres de Froude $F_1 > 2$:

$$Y^* = h_2^*/h_1 = \sqrt{2} . F_1 - 1/2 \quad (1.6)$$

I.2.3 Longueurs caractéristiques du ressaut

Le ressaut hydraulique est caractérisé par la longueur L_r^* de son rouleau ainsi que par la longueur L_j^* sur laquelle il s'étend. Ces caractéristiques n'ont pu être évaluées que par la voie de l'expérimentation.

I.2.3.1 Longueur du rouleau

En 1990 Hager et al (1990) définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisant ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé. La figure 1.3 montre ces deux types de ressaut et les longueurs L_r qui leur correspondent.

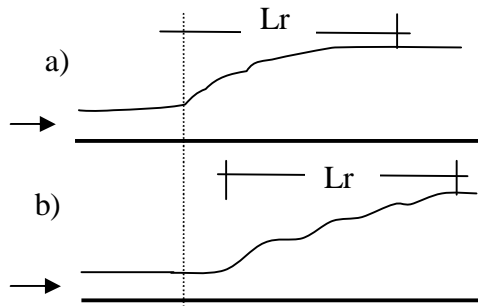


Figure 1.3 : Aspect du ressaut classique.
a) rouleau développé. b) rouleau non développé.

Le rouleau non développé est caractérisé par une longueur plus courte que celle du rouleau développé et sa surface à l'aval se présente sous l'aspect de vagues. Au fond de la masse liquide en mouvement, on peut distinguer une zone de rouleau dite de séparation formant un tourbillon de fond. En raison de la présence de cette zone, le jet entrant dans la section initiale du ressaut est dévié vers la surface libre.

Le rouleau développé présente une surface relativement lisse et est caractérisé par une quasi-stabilité. Le jet entrant dans la section initiale du ressaut adhère sur une certaine distance au fond du canal puis diverge en s'orientant vers l'aval.

Les essais effectués par Hager et al. (1990) montrent que, pour le cas du ressaut classique, le rapport $\lambda_r^* = L_r/h_1$ dépend du nombre de Froude F_1 et du rapport d'aspect $w = h_1/b$. Les auteurs proposent les relations suivantes :

$$\lambda_r^* = -12 + 160 \operatorname{Tgh}(F_1/20) \text{ pour } w = h_1/b < 0,1 \quad (1.7)$$

$$\lambda_r^* = -12 + 100 \operatorname{Tgh}(F_1/12,5) \text{ pour } 0,1 < w < 0,7 \quad (1.8)$$

« Tgh » désigne la tangente hyperbolique.

Les auteurs notent que pour $F_1 < 8$, les relations (1.7) et (1.8) peuvent être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

$$\lambda_r^* = L_r^*/h_1 = 8.(F_1 - 1,5) \quad , \quad 2,5 < F_1 < 8 \quad (1.9)$$

I.2.3.2 Longueur du ressaut

La seconde caractéristique du ressaut est la longueur L_j^* sur laquelle il s'étend. Comme la longueur du rouleau, la longueur L_j^* n'a pas pu être quantifiée que par voie expérimentale et sa définition varie d'un auteur à un autre. En effet, on estime que la longueur L_j^* doit être mesurée toujours par la section à l'aval du ressaut où :

1. la surface libre est pratiquement horizontale
2. la surface de turbulence du rouleau est faible

3. les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.
4. l'écoulement graduellement varié apparaît à l'extrémité aval du rouleau.

Toutes les définitions ont pour but d'indiquer la limite aval du ressaut au-delà de laquelle la protection ou le rendement du bassin amortisseur n'est pas nécessaire.

Les essais de Bradley et Peterka (1957) ont permis à Hager et al. (1990) de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur L_j^* du ressaut. Celle-ci, rapportée à la hauteur initiale h_1 du ressaut, peut s'écrire :

$$L_j^*/h_1 = 220.Tgh [(F_1-1)/22] \quad (1.10)$$

D'après Hager et al. (1990), la variation de la longueur relative L_j^*/h_2^* en fonction du nombre de Froude F_1 indique que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à 6 pour la gamme pratique $4 < F_1 < 12$. Ce résultat est encore admis de nos jours.

$$L_j^*/h_2^* = 6 \quad (1.11)$$

I.2.4 Rendement du ressaut

La figure 1.4 montre la ligne de charge totale le long de la longueur L_j sur laquelle s'étend le ressaut classique.

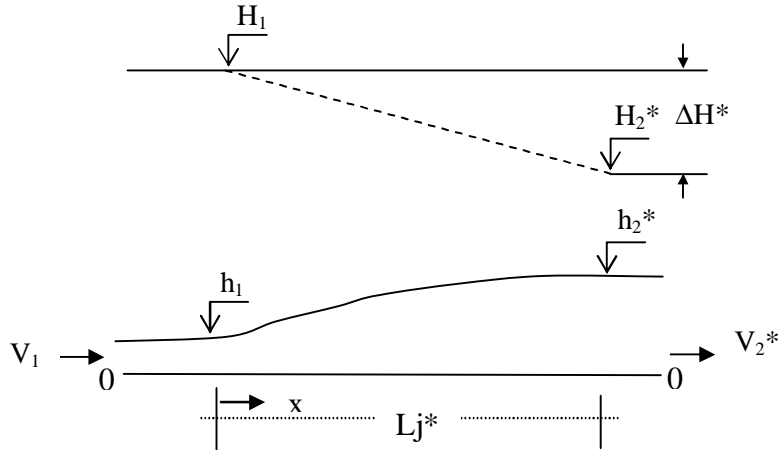


Figure 1.4 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

En se référant au plan 0-0, la charge totale dans la section initiale du ressaut s'écrit :

$$H_1 = h_1 + \alpha_1.V_1^2/(2.g) \quad (1.12)$$

Tandis que la charge totale dans la section finale est :

$$H_2^* = h_2^* + \alpha_2.V_2^{*2}/(2.g) \quad (1.13)$$

α désigne le facteur de correction de l'énergie cinétique dont on admet que sa valeur est égale à l'unité.

La perte de charge ΔH^* due au ressaut est la différence des charges totales initiale et finale :

$$\Delta H^* = H_1 - H_2^* \quad (1.14)$$

En raison du caractère permanent de l'écoulement, l'équation de continuité reste en vigueur et l'on peut écrire :

$$Q = V_1.A_1 = V_2^*.A_2^* \quad (1.15)$$

Où $A_1=b.h_1$ et $A_2^*=b.h_2^*$. En tenant compte des relations (1.12), (1.13) et (1.14), (1.15) s'écrit :

$$\Delta H^* = (h_1-h_2^*) + (h_1^{-2} - h_2^{*-2}).(q^2/(2.g)) \quad (1.16)$$

$q = Q/b$ est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'équation de la quantité de mouvement définie par (1.3) :

$$q^2/(2.g) = (h_1.h_2^{*2} + h_1^2.h_2^*)/4 \quad (1.17)$$

Ainsi, l'équation (1.16) s'écrit sous sa forme définitive :

$$\Delta H^* = (h_2^* - h_1)^3/(4.h_2^*.h_1) \quad (1.18)$$

La relation (1.18) exprime la perte de charge due au ressaut classique en fonction des hauteurs conjuguées de celui-ci.

On exprime souvent la capacité de dissipation du ressaut par le rapport $\eta^* = \Delta H^*/H_1$, qui représente en fait son rendement. En tenant compte de la relation (1.4), les charges totales initiale et finale du ressaut peuvent s'écrire respectivement :

$$H_1 = h_1[1+F_1^2/2] \quad (1.19)$$

$$H_2^* = h_1[Y^*+F_1^2/(2Y^{*2})] \quad (1.20)$$

Où Y^* est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par l'équation (1.5) de Bélanger. Ainsi, le rendement η^* s'écrit :

$$\begin{aligned} \eta^* &= \Delta H^*/H_1 = (H_1 - H_2^*)/H_1 \\ \eta^* &= 1 - [Y^* + F_1^2/(2.Y^{*2})]/(1+F_1^2/2) \end{aligned} \quad (1.21)$$

Bien que la relation (1.21) permet le calcul explicite du rendement η^* , Hager et Sinniger (1986) proposent une expression approchée, applicable pour $F_1 > 2$:

$$\eta^* = [1 - \sqrt{2}/F_1]^2 \quad (1.22)$$

Les relations (1.21) et (1.22) sont représentées graphiquement dans le système d'axes de coordonnées cartésiennes de la figure (1.5).

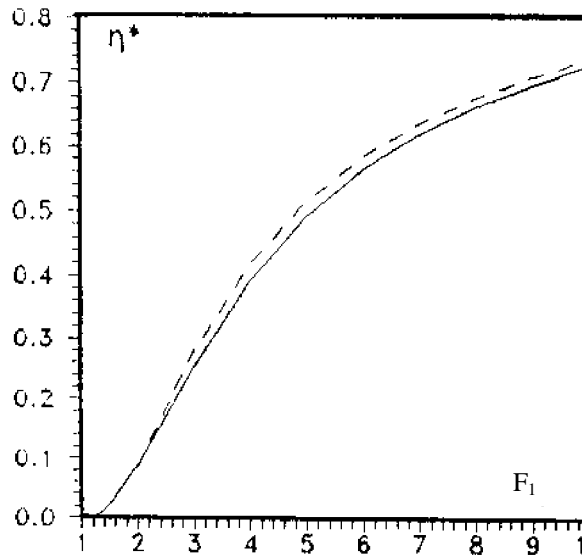


Figure 1.5 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude. (—) Courbe tracée selon la relation (1.21). (---) Courbe tracée selon la relation (1.22).

La figure (1.5) montre d'une part que le rendement η^* du ressaut classique est supérieur à 50% pour $F_1 \geq 5,1$ et que les rendements calculés en application de la relation approchée (1.21) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.22) d'autre part ; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

I.3 Conclusion

Ce chapitre a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire. Nous avons examiné les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut.

Le chapitre suivant s'intéressera au ressaut hydraulique classique en canal triangulaire, où nous parlerons des travaux de Hager et Wanoschek (1987) concernant le ressaut "triangulaire" évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° .