

## I.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons examiner les travaux les plus intéressants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire. Deux types de ressaut seront alors étudiés :

- Le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons des travaux de HAGER et WANOSCHEK (1987) concernant le ressaut "triangulaire" du type A évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de  $90^\circ$ . A travers une étude expérimentale assez particulière, les auteurs proposent, notamment, une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut  $L_r/h_2$  et  $L_j/h_2$ , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de  $m$ .

En fait, HAGER et WANOSCHEK (1987) extrapole les résultats issus d'un profil semi triangulaire à angle d'ouverture de  $45^\circ$  au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ .

- Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de  $90^\circ$ . Nous examinerons en particulier l'approche de DEBABECHE et ACHOUR (2003), consacrée à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par seuil à paroi mince . L'étude concernera l'analyse des différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. Des relations simples à l'emploi, liant des paramètres adimensionnels, seront alors proposées.

## I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

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 triangulaire de pente nulle ou faible.

Les caractéristiques du ressaut sont principalement :

Les longueurs  $L_r$  et  $L_j$  qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut

Les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$ , 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.

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

Il a été établi que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation  $Y = \frac{h_2}{h_1}$  des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude incident  $F_1$ .

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse, continu ou discontinu, ainsi que contrôlé 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 changement des paramètres de l'écoulement tels que les débits et de contribuer enfin à une meilleure compacité du bassin.

### I.2.1. Forme du ressaut classique

Selon la classification proposée par BRADLEY et PETERKA (1957), le ressaut classique peut se présenter sous quatre configurations distinctes. Cette classification se base principalement 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 tel que 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 quatre configurations de ressaut :

#### a. Le pré - ressaut

Il est obtenu pour la gamme  $1,7 < F_1 < 2,5$  (Figure 1.1,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.

b. Ressaut de transition

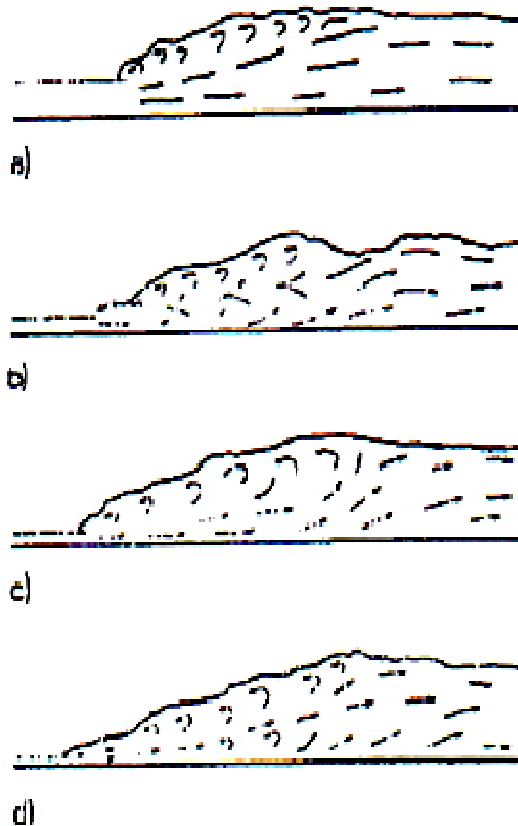
Le ressaut de transition est obtenu pour la gamme  $2,5 < F_1 < 4,5$  (Figure 1.1,b). Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

c. Ressaut stable

Il est obtenu pour la gamme  $4,5 < F_1 < 9$  (Figure 1.1,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.

d. Ressaut agité ou clapoteux

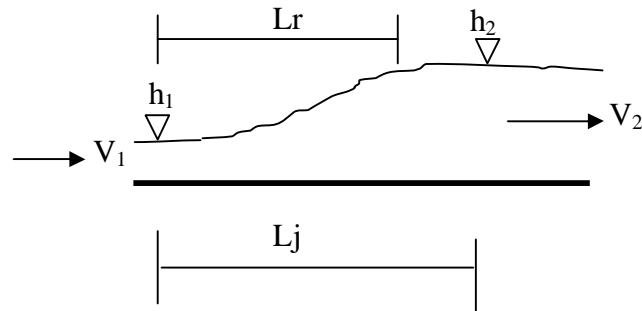
Obtenu pour  $F_1 > 9$  (Figure 1.1,d). Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très grande. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.



**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, 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 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 volumique et  $A_1$  l'aire de la section mouillée initiale qui s'exprime par :

$$A_1 = m h_1^2 \quad (1.2)$$

$m$  : cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal à section droite triangulaire symétrique par rapport à l'horizontal.

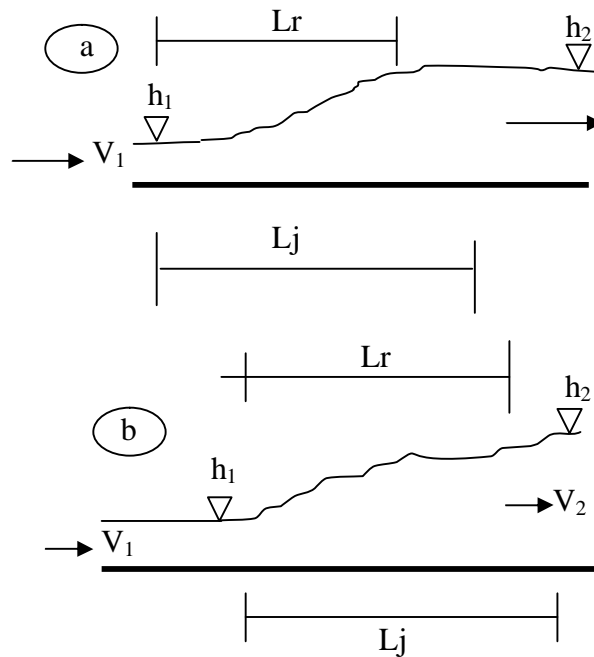
#### I.2.2.1. Longueurs caractéristiques du ressaut

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.2.2.2. Longueur du rouleau

En 1990 HAGER définit 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) Développé. b) 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 (Debabeche, 2003).

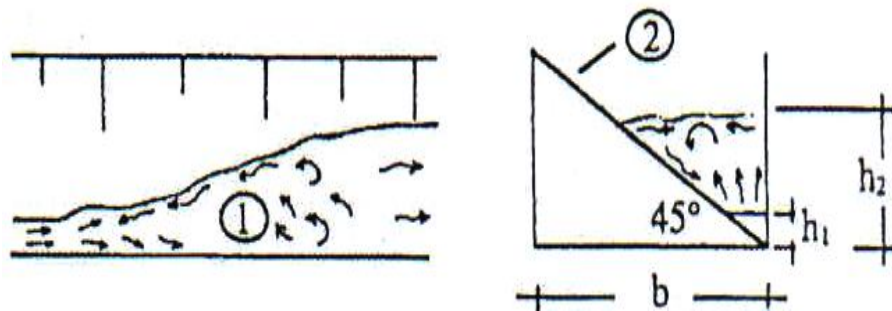
Le rouleau développé présente une surface relativement lisse et est caractérisé par une quasi-stabilité. Le jet entrant dans la section initiale du ressaut adhère sur une certaine distance au fond du canal puis diverge en s'orientant vers l'aval.

### I.2.3. Approche de Hager et Wanoschek

Hager et Wanoschek (1987) ont étudié le ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal de forme triangulaire du type A évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de  $45^\circ$ . A travers une étude expérimentale, les auteurs proposent, notamment, une relation générale pour le calcul des longueurs caractéristiques du ressaut  $L_r/h_2$  et  $L_j/h_2$ , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de  $m$ .

Hager et Wanoschek (1987) extrapolent les résultats issus d'un profil semi-triangulaire à angle d'ouverture de  $45^\circ$  au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ .

Les essais de Hager et Wanoschek (1987) sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire ont été réalisés dans un canal rectangulaire de largeur  $b = 30$  cm dans lequel a été insérée une paroi en PVC inclinée d'un angle de  $45^\circ$  par rapport à l'horizontal. Le profil obtenu est devenu alors de forme semi-triangulaire comme l'indique la Figure (1.4).



**Figure 1.4:** Ressaut hydraulique en canal semi-triangulaire selon Hager et Wanoschek(1987).

1) Vue en plan du ressaut. 2) Coupe transversale d'une paroi en PVC inclinée de  $45^\circ$ .

$h_1$  et  $h_2$  : Hauteurs conjuguées du ressaut.

## I.2.4. Analyse des résultats

### I.2.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées

Sous l'hypothèse de l'uniformité des pressions et des vitesses, l'application de l'équation de la quantité de mouvement, entre les sections initiale et finale d'un ressaut évoluant dans un canal horizontal de section droite trapézoïdale, mène à écrire:

$$\frac{b.h_1^2}{2} + \frac{m.h_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b.h_1 + m.h_1^2)} = \frac{b.h_2^2}{2} + \frac{m.h_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b.h_2 + m.h_2^2)} \quad (1.3)$$

$h_1$  et  $h_2$  sont respectivement les hauteurs initiale et finale du ressaut,  $b$  est la base du canal trapézoïdal,  $Q$  désigne le débit volume,  $m$  représente la cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontal et  $g$  est l'accélération de la pesanteur.

L'équation (1.1) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme :

$$F_1^2 \left[ 1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)} \left[ Y^2 \left( 1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left( 1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (1.4)$$

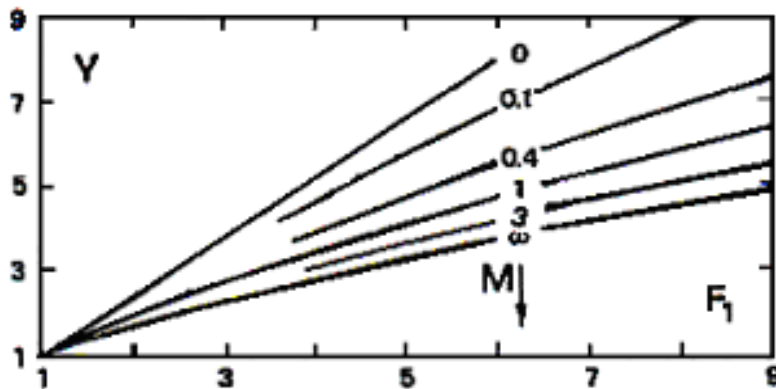
dans laquelle  $F_1$  représente le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut,  $Y$  est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut et  $M$  désigne la hauteur relative initiale du ressaut :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b + 2mh_1)}{g(bh_1 + mh_1^2)^3}, \quad Y = \frac{h_2}{h_1}, \quad M = \frac{mh_1}{b} \quad (1.5)$$

La relation (1.4) exprime la variation du nombre de Froude à l'amont du ressaut en fonction du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées et de la hauteur relative  $M$ , dans un canal trapézoïdal. Les équations régissant les ressauts en canal de section rectangulaire et triangulaire peuvent être déduites de la relation (1.4). Le canal de section droite rectangulaire constante est un cas particulier du canal trapézoïdal pour lequel l'angle d'inclinaison du talus par rapport à l'horizontal est de  $90^\circ$  ; ceci correspond donc à  $m = \cotg 90^\circ = 0$ , ou bien à  $M=0$ . Par contre, le profil triangulaire correspond à un profil trapézoïdal de base  $b=0$ , soit  $M \rightarrow \infty$ , l'équation (1.4) s'écrit :

$$Y^* = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F - \frac{1}{2} \quad (1.6)$$

Sur la Figure (1.5) est représentée graphiquement, dans un système d'axes de coordonnées cartésiennes, la relation (1.4) :



**Figure 1.5 :** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et de la hauteur relative  $M$ .

$M=0$  : profil rectangulaire.

$M \rightarrow \infty$  : profil triangulaire .

$0 < M < \infty$  : profils trapézoïdaux.

La Figure 1.5 montre nettement que la plus faible valeur de rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut est obtenue dans le cas du profil triangulaire, pour une même valeur du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. L'équation de la courbe enveloppe inférieure de la Figure (1.5) traduit la variation du rapport  $Y$  du ressaut dans un canal de section droite triangulaire en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

$$F_{1T}^2 = \frac{2Y_T^2(Y_T^2 + Y_T + 1)}{3(Y_T + 1)} \quad (1.7)$$

L'indice '  $T$  ' indique le profil triangulaire. L'équation (1.7) montre que  $Y_T$  s'exprime de manière fortement implicite en fonction de  $F_{1T}$ . HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent alors la relation approchée :

$$Y_T = \left( \frac{3}{2} F_{1T}^2 - 1 \right)^{1/3} \quad (1.8)$$

#### I.2.4.2. Equation de la quantité de mouvement

Les essais effectués par HAGER et WANOSCHEK(1987) dans un canal semi-triangulaire d'angle d'ouverture de  $45^\circ$ , extrapolés ensuite au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ , ont montré que les rapports  $Y$  expérimentaux sont légèrement inférieurs aux rapports  $Y$  théoriques obtenus par application de la relation (1.8) ; cet écart est attribué à l'effet des frottements sur les parois du canal et les auteurs proposent alors de modifier l'équation de quantité de mouvement en tenant compte des pertes de charge le long des parois du canal. Le gradient de pertes de charge  $S_f$  est évalué par la formule de BLASIUS :



$$S_f = \frac{0,3164 \cdot V^2}{R_e^{0,35} \cdot 8 \cdot g \cdot R_h} \quad (1.9)$$

Avec :

$$R_e = \frac{4R_h \times V}{\nu} \quad : \text{Nombre de Reynolds.}$$

$$R_h = \frac{mh}{2\sqrt{1+m^2}} \quad : \text{Rayon hydraulique correspondant au profil semi triangulaire et } \nu \text{ la}$$

viscosité cinématique.

Le profil de surface du ressaut suit approximativement la loi  $h(x) = h_1 + (h_2 - h_1) X^2$ , dans laquelle  $x$  représente la coordonnée longitudinale comptée à partir du début du ressaut et  $X$  est la coordonnée  $x$  rapportée à la longueur  $L_j$  du ressaut, soit  $X=x/ L_j$ . La coordonnée  $x$  est telle que  $0 \leq x \leq L_j$  et par suite  $0 \leq X \leq 1$ .

La force de frottement agissant sur le volume de contrôle correspondant à  $0 \leq x \leq L_j$  par définition :

$$W_x = \varpi \int A(x) \cdot S_f \quad (1.10)$$

$\varpi = \rho \cdot g$  est le poids volumique du liquide,  $A(x)$  l'aire de la section mouillée correspondant à  $x$ . Pour le cas du profil semi triangulaire d'angle d'ouverture de  $45^\circ$  ( $m=1$ ), la relation (1.9) devient :

$$S_f = \left[ \frac{2Q}{mh_1^2} \right]^{7/4} \frac{\nu^{1/4}}{5gh_1^2} \left[ \frac{h(x)}{h_1} \right] \quad (1.11)$$

La relation (1.11) s'écrit alors :

$$W_x = (\varpi \cdot m \cdot h_1^2 / 2) \cdot L_j \cdot S_f \cdot I(Y) \quad (1.12)$$

$$I(Y) = \int \frac{dx}{[1+(Y-1)X^2]^{1/4}} \quad (1.13)$$

$$\text{Soient : } Y = \frac{h_2}{h_1} ; \quad X = \frac{x}{L_j}$$

$$S_f = S_f \cdot \left[ \frac{h(x)}{h_1} = 1 \right] \quad (1.14)$$

L'intégration numérique de  $I(Y)$  donne approximativement :

$$I(Y) = \frac{1}{7} \left( 1 + \frac{6}{Y} \right) \quad (1.15)$$

Pour les nombres de Froude  $F_1 < 15$ , correspondant à des rapports  $Y < 7$ , l'application de la relation approchée (1.15) occasionne une erreur relative inférieure à 5% par rapport à la valeur exacte calculée par l'équation (1.13).

En tenant compte de la force  $W_x$  l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre les sections initiale et finale du ressaut évoluant dans un canal à section droite semi triangulaire s'écrit :

$$\frac{mh_1^3}{6} + \frac{Q^2}{g(mh_1^2)} = \frac{mh_2^3}{6} + \frac{Q^2}{g(mh_2^2)} + W_x \quad (1.16)$$

En désignant par :

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{gmh_1^5}, \quad A = \left[ \frac{vmh_1}{2Q^2} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad S_f = A \left( \frac{F_1^2}{10} \right)$$

La relation (1.16) s'écrit en termes adimensionnels :

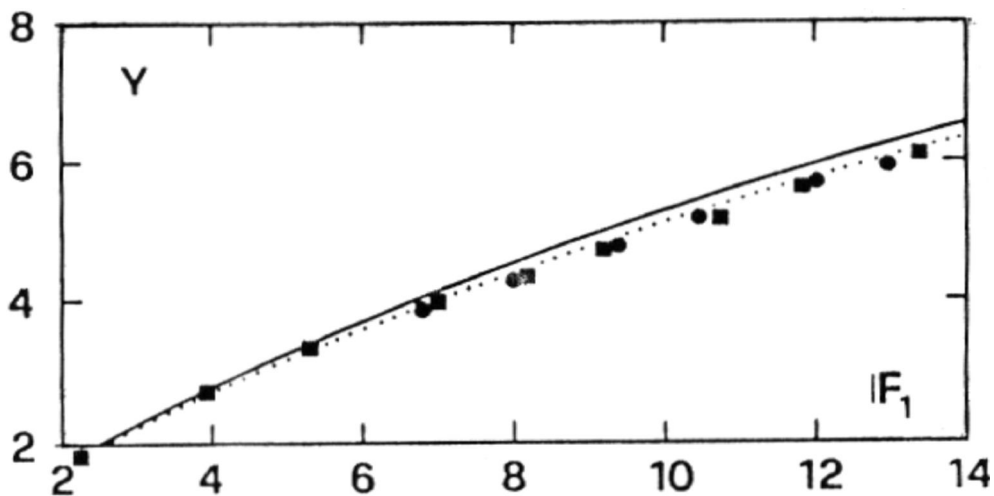
$$1 + \frac{3}{2} F_1^2 = Y^3 + \frac{3F_1^2}{2Y^2} + \frac{3AL_j}{70h_1} \left( 1 + \frac{Y}{6} \right) F_1^2 \quad (1.17)$$

La longueur relative  $L_j/h_1$  dans la relation (1.17) peut s'écrire :  $L_j/h_1 = Y \cdot (L_j/h_2)$ . HAGER et WANOSCHEK (1987) estiment que pour un canal triangulaire correspondant à  $m=1$ ,  $L_j/h_2 \approx 6$ . Par suite, la relation (1.17) s'écrit en définitive :

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^3 - 1)}{3 \left[ Y^2 - 1 - \frac{AY^2}{6}(6 + Y) \right]} \quad (1.18)$$

Cette relation finale explique donc la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut dans un canal de section droite triangulaire ( $m = 1$ ) en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, en tenant compte de l'effet des frottements sur les parois du canal. Cet effet est traduit par le paramètre adimensionnel  $A$ . lorsque  $A \rightarrow 0$ , l'effet des frottements est négligeable et la relation (1.7) est reproduite. HAGER et WANOSCHEK (1987) ont montré que l'écart maximal observé entre les valeurs expérimentales des rapports  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut et celles obtenues de l'application de la relation (1.18) ne dépasse guère 3 %.

la Figure (1.6) montre les mesures expérimentales de HAGER et WANOSCHEK (1987) comparées à la fois aux valeurs théoriques obtenues par l'application de la relation (1.7) pour ( $A \rightarrow 0$ ) et à celles issues de l'équation (1.16) pour  $A > 0$ .



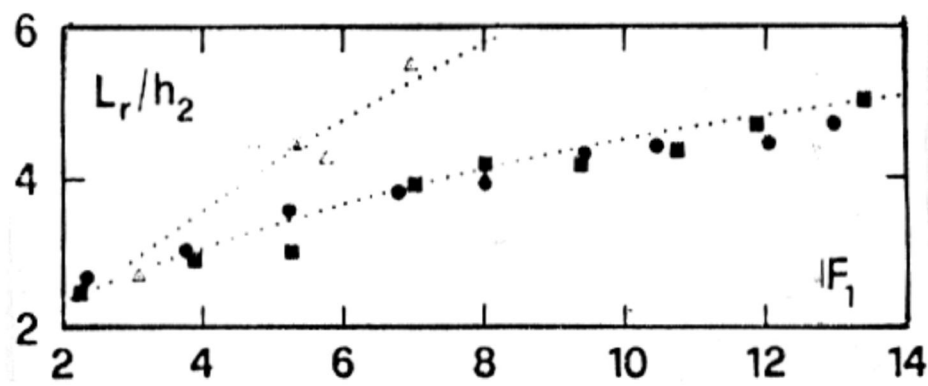
**Figure 1.6 :** Variation des rapports  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut triangulaire ( $m=1$ ) en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , selon HAGER et WANOSCHEK (1987). (—) Courbe tracée selon la relation (1.7).  $A=0$   
(----) Courbe tracée selon la relation (1.18).  $A>0$ .

#### I.2.4.3 . Longueur caractéristique du ressaut

La longueur  $L_j$  du ressaut est définie comme étant la distance entre le pied du ressaut et la section à l'aval où la surface libre de l'écoulement est maximale et tend à devenir

parallèle au fond du canal. Par contre, la longueur  $L_r$ , est la longueur sur laquelle s'étend le rouleau de surface.

Sur la Figure (1.7) sont représentées les mesures expérimentales de RAJARATNAM (1964) ( $m=0,58$ ) et celles de HAGER et WANOSCHEK (1987) ( $m=1$ ), qui concernent la longueur relative  $L_r/h_2$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. Il apparaît ainsi que la longueur relative  $L_r/h_2$  dépend uniquement de  $m$  et de  $F_1$ . La Figure (1.7) montre également que la longueur relative  $L_r/h_2$  croît au fur et à mesure que  $F_1$  augmente et qu'elle décroît avec l'augmentation de  $m$ .



**Figure 1.7 :** Longueur relative  $L_r/h_2$  du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude  $F_1$  selon HAGER et WANOSCHEK ( 1987 ) (●) ( $m = 1$ ).  
( Δ ) :  $m = 0,58$  selon Rajaratnam (1964).

En tenant compte des mesures de RAJARATNAM (1964) ( $m=0,58$ ), HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent une relation générale permettant d'évaluer la longueur relative  $L_r/h_2$  en fonction de  $F_1$  et de  $m$ .

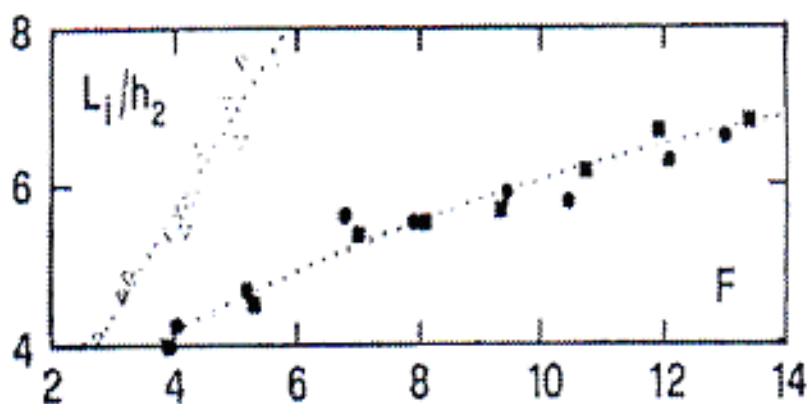
$$\frac{L_r}{h_2} = 1,8(m)^{0,5} F_1^{\frac{0,4}{m}} \quad 0,4 < m < 1 \quad (1.19)$$

Ainsi, dans la gamme pratique des nombres de Froude de l'écoulement incident tels que  $6 \leq F_1 \leq 9$ , la longueur relative  $L_r/h_2$  du rouleau, pour le cas d'un canal triangulaire à angle d'ouverture de  $90^\circ$  ( $m=1$ ), est telle que  $3,7 < L_r/h_2 < 4,35$ .

En ce qui concerne la longueur relative  $L_r/h_2$  du ressaut dans un canal triangulaire, les mesures expérimentales de HAGER et WANOSCHEK (1987) ainsi que celles d'ARGYROPOULOS (1962) sont représentées sur la Figure (1.8), en fonction du nombre de

Froude  $F_1$ . Nous pouvons alors remarquer, comme pour  $L_r/h_2$ , que la longueur relative  $L_j/h_2$  dépend à la fois du nombre de Froude  $F_1$  et du paramètre  $m$ . La Figure (1.8) montre en outre que  $L_j/h_2$  varie dans le même sens que  $F_1$  et en sens inverse de  $m$ . En incluant les mesures d'ARGYROPOULOS (1962), HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent de calculer  $L_j/h_2$  par application de la relation :

$$\frac{L_j}{h_2} = 2,4 \cdot (m)^{0,5} \cdot F_1^{\frac{0,4}{m}}, \quad 0,4 < m < 1 \quad (1.20)$$



**Figure 1.8** : Longueur relative  $L_j/h_2$  du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , selon HAGER et WANOSCHEK (1987) (•)( $m=1$ ).  
(∇) :  $m = 0,44$  selon ARGYROPOULOS (1962).

#### I.2.4.4. Profil de surface généralisé du ressaut

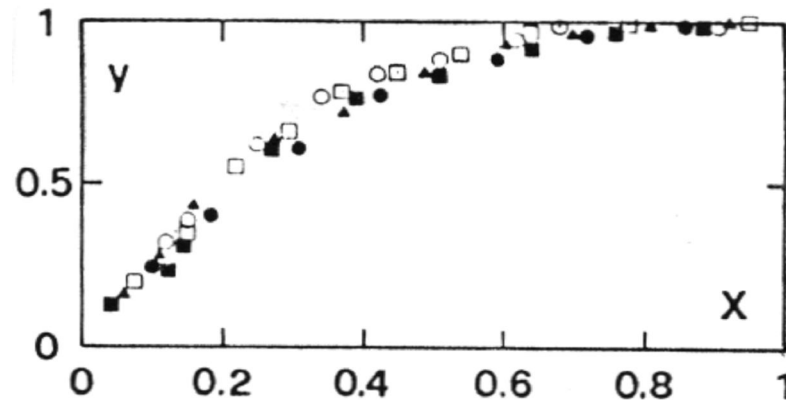
L'introduction des variables  $X=x/L_j$  et  $y(x) = [h(x) - h_1] / (h_2 - h_1)$  permet de tracer le long de l'axe longitudinal du canal, le profil de surface du ressaut sous la forme adimensionnelle ;  $h(x)$  désigne la hauteur du ressaut à la distance  $x$  comptée à partir du pied du ressaut. Pour  $x=0$ , correspondant à  $X=0$ , nous pouvons écrire que  $h(x)=h_1$  et par suite  $y=0$ . Par contre, pour  $x=L_j$ , correspondant à  $X=1$ , nous pouvons écrire que  $h(x)=h_2$  et  $y=1$ . Les variables adimensionnelles  $X$  et  $y(x)$  décrivant le profil de surface du ressaut le long de l'axe longitudinal du canal sont telles que  $0 \leq X \leq 1$  et  $0 \leq y \leq 1$ .

La Figure (1.9) représente les mesures expérimentales de HAGER et WANOSCHEK (1987) concernant le profil de surface généralisé du ressaut en canal triangulaire le long de l'axe longitudinal du canal.

Les points de mesures, obtenus pour  $6,8 \leq F_1 \leq 11,8$  ; se situent ainsi sur une courbe d'équation approchée:

$$Y(X) = (1 + \alpha X) \cdot \tanh(\beta X) \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (1.21)$$

où '*tanh*' désigne la tangente hyperbolique.



**Figure 1.9** : Profil de surface généralisé  $Y(X)$  le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ( $m = 1$ ), selon HAGER et WANOSCHEK (1987).

La Figure (1.9) montre que le profil de surface généralisé est quasiment linéaire pour la gamme  $0 \leq X \leq 0,2$ . La droite, représente la partie linéaire du profil passe par le point de coordonnées  $(0,0)$  et coupe approximativement l'axe parallèle à  $X$  au point de coordonnées  $(0,4 ; 1)$  ; le paramètre  $\beta$  figurant dans la **relation (1.21)** a donc pour valeur :  $\beta = (1-0)/(0,4-0) = 1/0,4$  ; soit  $\beta = 2,5$ . Ainsi, le paramètre  $\alpha$  peut être déterminé en écrivant que  $Y(X) = 1$ , soit  $1 = (1 + \alpha) \cdot \tanh(2,5)$ , par suite  $\alpha = 0,014$ . Le profil de surface généralisé accepte ainsi pour équation :

$$Y(X) = (1 + 0,014 \cdot X) \cdot \tanh(2,5 \cdot X) \quad , \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (1.22)$$

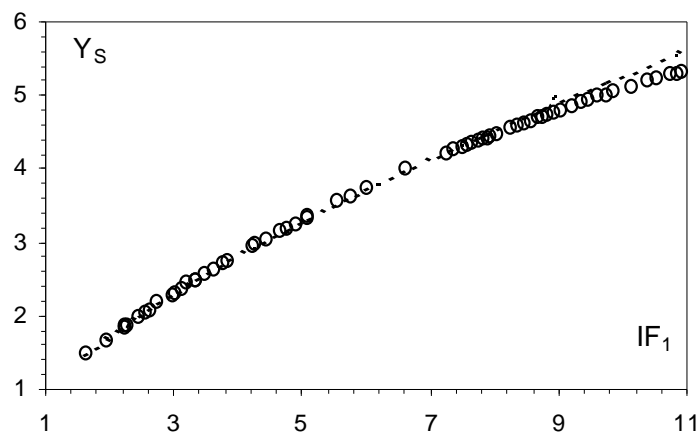
### I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL MINCE DANS UN CANAL TRIANGULAIRE.

#### I.3.1. Approche de Achour et Debabeche (2003)

### I.3.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Lors du contrôle du ressaut, la mise en place du seuil à l'aval n'a théoriquement aucun effet réducteur sur le rapport  $Y^*$  des hauteurs conjuguées du ressaut classique. Sous les mêmes conditions de l'écoulement amont, c'est à dire sous la condition de l'identité des débits volumes et des hauteurs initiales du ressaut, la hauteur finale  $h_2^*$  du ressaut classique est théoriquement égale à celle du ressaut contrôlé par un seuil.

La figure 1.10 montre à la fois la variation de  $Y^*$  et de  $Y_s$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  caractérisant l'écoulement incident.

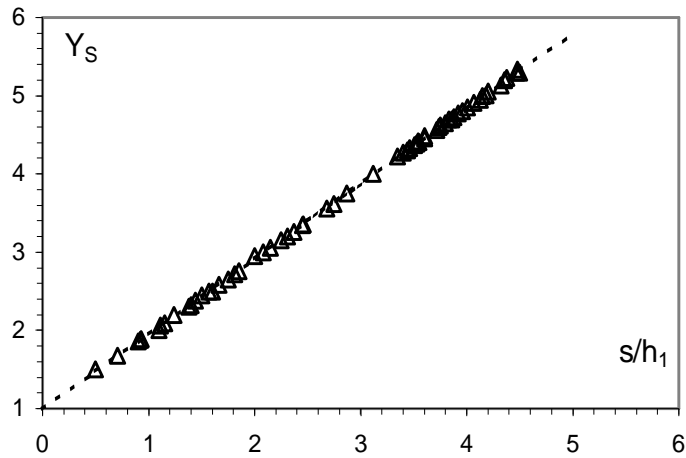


**Figure 1.10** : Variation du rapport  $Y_s = f(F_1)$  dans un canal triangulaire.

(---) Ressaut classique. (o) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

La figure 1.10 montre que l'égalité  $Y^* = Y_s$  n'est vérifiée que pour une certaine gamme de valeurs du nombre de Froude  $F_1$ . L'influence du seuil à paroi mince se manifeste à des valeurs du nombre de Froude  $F_1$  supérieures à 7,5. Cette influence s'accroît au fur et à mesure que  $F_1$  augmente, mais ne semble pas être significative. La représentation graphique des points expérimentaux des rapports  $Y_s$  en fonction de la hauteur relative  $S=s/h_1$  du seuil a abouti à une courbe unique, comme l'indique la figure 1.11. Celle-ci montre clairement que les points expérimentaux obtenus s'alignent suivant une droite passant par le point (0,1). Suite à un ajustement linéaire. Achour et Debabeche (2003) ont déterminé la relation suivante :

$$Y_s = 1 + 0,96 \cdot S \quad (1.23)$$



**Figure 1.11** :Variation expérimentale de  $Y_s = f(S)$  lors du contrôle d'un ressaut triangulaire.

( $\Delta$ ) Points expérimentaux. (---) Courbe tracée selon la relation (1.23).

### I.3.1.2. Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude

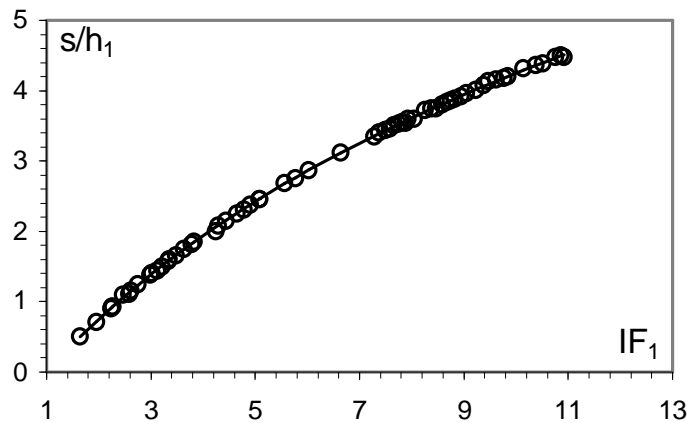
Achour et Debabeche (2003) ont montré précédemment que l'influence du seuil sur la hauteur finale du ressaut, et de même pour le rapport  $Y$ , n'était pas significative. Il a trouvé également qu'une relation unique existe entre la hauteur relative  $S=s/h_1$  du seuil et le rapport  $Y_s$  des hauteurs conjuguées du ressaut. Ces considérations laissent l'auteur penser qu'une relation unique peut être obtenue entre la hauteur relative  $S=s/h_1$  du seuil et le nombre de Froude  $F_1$ .

La figure 1.12 montre en conséquence que les points de mesures expérimentaux obtenus suivent, dans leur totalité, la variation d'une courbe unique de type logarithmique. L'ajustement des couples de valeurs  $(F_1, S)$ , suivant la méthode des moindres carrés non linéaires, à donner la relation :

$$S=s/h_1 = 4,125 \cdot \text{Ln}[(F_1 + 4)/5] \quad (1.24)$$

« Ln » désigne le logarithme népérien.





**Figure 1.12** : Variation expérimentale de la hauteur relative  $S$  du seuil, en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . (o) Points expérimentaux  
(---) relation d'ajustement

La relation ci-dessus, ainsi que la tendance des mesures expérimentales représentées par la figure 1.12, montre que pour  $F_1 = 1$  la hauteur relative  $S$  du seuil est nulle.

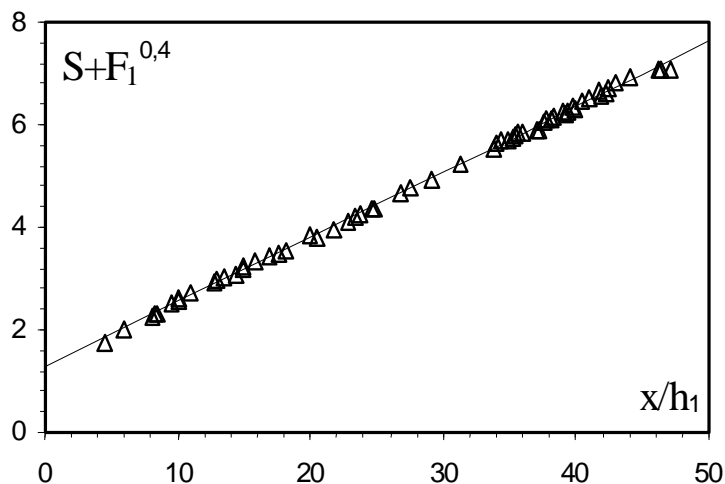
Comparée à la courbe expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil mince dans un canal rectangulaire, la figure 1.12 indique que pour le cas du ressaut triangulaire la hauteur relative  $s/h_1$  ne dépend nullement de la position  $x/h_2$  du seuil.

En outre, le contrôle du ressaut rectangulaire nécessite des hauteurs relatives  $s/h_1$  beaucoup plus importantes, pour un même nombre de Froude  $F_1$ .

### I.3.1.3. Relation générale régissant le contrôle du ressaut

Selon Achour et Debabeche (2003), l'analyse adimensionnelle montre qu'il existe une relation générale liant les paramètres  $F_1$ ,  $s/h_1$  et  $x/h_1$ . Cette dernière peut s'écrire sous la forme  $f(s/h_1, F_1, x/h_1) = 0$ . L'analyse des mesures expérimentales obtenues a montré que la meilleure représentation graphique adimensionnelle de la fonction  $f$  est celle indiquée par la figure 1.13. Les points expérimentaux se situent en fait, pour  $x/h_1 \geq 4$  (condition largement réalisée dans la pratique), sur une droite d'équation :  $(S + F_1^{0.4}) = a.(x/h_1) + b$ . Les valeurs des constantes  $a$  et  $b$  ont été obtenues par un ajustement linéaire. Donc, la relation générale régissant le contrôle du ressaut triangulaire en présence d'un seuil à paroi mince s'écrit :

$$S + F_1^{0.4} = 0,127.(x/h_1) + 1,269 \quad , x/h_1 \geq 4 \quad (1.25)$$



**Figure 1.13** : Variation de  $(S+F_1^{0,4})$  en fonction de la position relative  $x/h_1$  du seuil  
 ( $\Delta$ ) points expérimentaux (---) droite d'ajustement

#### I.3.1.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé, au premier lieu, les travaux de HAGER et WANOSCHEK (1987) ; ces études ont concerné le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture  $90^\circ$ . Les auteurs ont suivi une démarche expérimentale un peu particulière, car ils ont extrapolé les résultats issus d'un profil semi-triangulaire à angle d'ouverture de  $45^\circ$  à un canal symétrique à angle d'ouverture de  $90^\circ$ .

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. L'effet des frottements est traduit par le paramètre adimensionnel  $A = [vmh_1/(2Q)]^{1/4}$ . Lorsque  $A = 0$ , aucun effet des frottements n'est observé et l'équation de quantité de mouvement sous sa forme classique est applicable.

HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut  $L_r/h_2$  et  $L_j/h_2$ , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de  $m$ .

Enfin, L'étude aborde le profil de surface généralisé du ressaut. Une équation représentative du profil de surface généralisé le long de l'axe du canal est alors proposée.

Nous avons présenté par la suite 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  $90^\circ$ . 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. 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, **pour le type de seuil considéré.**