

N° d'ordre :
Série :

Département d'Hydraulique



Laboratoire LARHYSS

MEMOIRE DE MAGISTER EN HYDRAULIQUE

Option : Sciences Hydrauliques

Présenté par :

Mr MANSRI Naïm

Ingénieur d'Etat en Hydraulique

THEME

RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR MARCHE POSITIVE DANS UN CANAL TRIANGULAIRE

Soutenu le :/...../2006

Devant le jury :

Président :	Bachir ACHOUR	Professeur	Université de Biskra
Examineur :	Boualem REMINI	Professeur	Université de Blida
Examineur :	Noureddine MOUMMI	Maître de conférences	Université de Biskra
Examineur :	Abdelhafid MOUMMI	Docteur, MACC	Université de Biskra
Rapporteur :	Mahmoud DEBABECHE	Maître de conférences	Université de Biskra

INTRODUCTION GENERALE

Le ressaut hydraulique est obtenu, suite à la transition de l'écoulement d'un régime torrentiel à un régime fluvial. Ce phénomène peut se produire dans un bassin de dissipation à l'aval d'un ouvrage hydraulique. C'est le moyen le moins onéreux et le plus pratique pour dissiper l'énergie emmagasinée dans cet ouvrage, afin d'éviter d'importantes modifications du lit de la rivière situé à l'aval.

Ces dernières années, le ressaut hydraulique a fait l'objet de nombreuses recherches fondamentales et appliquées. Les recherches expérimentales ont d'abord confirmé que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale.

La bibliographie montre que la modification des conditions à l'amont (débit, hauteurs,...etc.) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur,...etc.), peut conduire à différentes configurations de ressaut.

Pour notre cas il s'agit de deux types de ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire à angle d'ouverture 90° , muni d'une marche positive, à savoir, le ressaut contrôlé et le ressaut de type A .

Par ailleurs, le ressaut hydraulique contrôlé par marche n'a connu que très peu d'études, ces derniers concernent surtout le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive en canal rectangulaire. Les études les plus connues dans ce domaines sont certainement celles de Forster et Skrinde (1950), de Hager et Sinniger (1985) et de Hager et Bretz (1987), qui ont concerné le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive dans un canal de section droite rectangulaire

Par ailleurs, il est nécessaire de noter qu'à ce jour, il n'y a pas du tout de documentation sur l'évaluation des caractéristiques de ce type de ressaut dans le canal de section droite triangulaire. Les études antérieures les plus récentes qui ont concerné le ressaut hydraulique en canal triangulaire, sont celles de Hager et Wanoschek (1986), Debabeche (2003), Achour et Debabeche (2003) et plus récemment Debabeche et Achour (2006)

L'étude proposée a pour but d'analyser théoriquement et expérimentalement le ressaut hydraulique contrôlé et forcé de type A par marche positive en canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° . L'étude nécessitera trois grandes parties :

Une première partie bibliographique à travers laquelle nous passerons en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique, dans deux profils de canaux : triangulaire et rectangulaire.

Cinq chapitres seront nécessaires, à travers lesquels nous aborderons le ressaut hydraulique classique, contrôlé, et l'influence du seuil sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire, ainsi le ressaut hydraulique classique, et contrôlé par marche positive dans un canal de section droite rectangulaire.

Une deuxième partie concernant notre propre contribution dans cette étude, se proposera d'examiner par voie expérimentale, le ressaut contrôlé et le ressaut de type A forcé par marche positive dans un canal de section droite triangulaire. Des relations fonctionnelles, en termes adimensionnels, liants les différentes caractéristiques du ressaut seront également proposées. Une étude comparative avec le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince et épais sera effectuée.

La troisième et dernière partie, fera l'objet d'un développement théorique du problème étudié, permettant l'élaboration de la relation théorique $f(Y_A, F_1, S) = 0$, où Y_A est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut de type A, F_1 est le nombre de Froude de l'écoulement incident et S est la hauteur relative de la marche positive. Cette théorie sera ensuite vérifiée les données expérimentales.

INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE

La première partie de notre étude se propose d'exposer, une synthèse bibliographique des travaux les plus intéressants liés au sujet traité.

Cette partie bibliographique est divisée en cinq (05) chapitres. Le premier chapitre concerne le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Le deuxième et le troisième chapitre, seront consacrés à l'étude du ressaut hydraulique en canal triangulaire. Le quatrième chapitre aura pour objectif l'étude de l'influence du seuil sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire. L'étude du ressaut hydraulique contrôlé par une marche positive dans un canal rectangulaire fera l'objet du dernier chapitre.

- § Le premier chapitre de cette partie de notre étude sera consacré à l'étude du ressaut hydraulique classique dans un canal de section droite rectangulaire, où nous citerons essentiellement les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager et al (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.
- § L'étude du ressaut hydraulique classique, fera l'objet du second chapitre où nous parlerons des travaux de Hager et Wanoschek (1987) concernant le ressaut triangulaire classique évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° .
- § Le troisième chapitre, concernera le travail de Debabeche (2003) relatif à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dénoyé à paroi mince, dans un canal de section droite triangulaire à angle d'ouverture de 90° .
- § Le quatrième chapitre, sera consacré à l'étude expérimentale de l'influence du seuil sur le ressaut hydraulique dans un canal de section droite triangulaire à angle d'ouverture de 90° . Une étude comparative, d'une part, entre le ressaut contrôlé par seuil mince et par seuil épais, et d'autre part entre le ressaut contrôlé et le ressaut forcé sera effectuée. L'unique étude dans ce domaine est celle de Debabeche et Achour (2006).
- § Dans le cinquième et dernier chapitre de cette première partie, nous aborderons les travaux de Forster et Skrinde (1950), ceux de Hager et Sinniger (1985) et ceux de Hager et Bretz (1987), qui ont été consacrés à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par une marche positive dans un canal de section rectangulaire. Nous aborderons également, un aperçu sur l'étude réalisée par Abdel-Azim M. Negm (2000) relative à la cavitation sur les marches positive et négative dans un canal rectangulaire à forte pente pour les ressauts forcés type A et B sera présentée.

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.

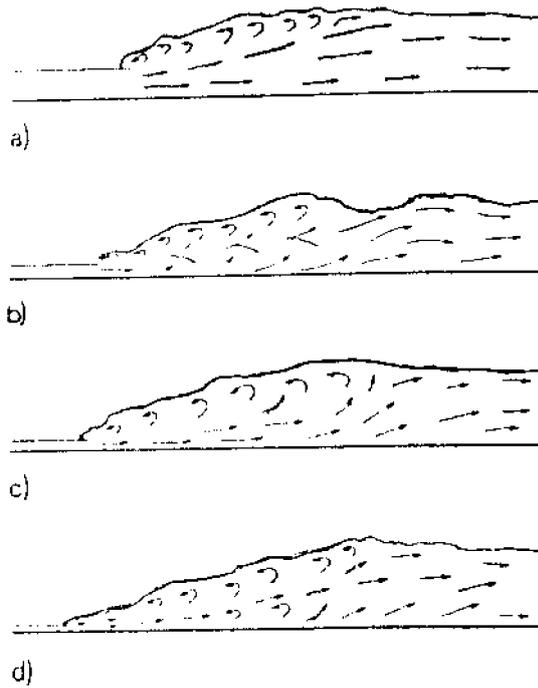


Figure 1.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). a) pré-ressaut, b) ressaut de transition, c) ressaut stable et d) ressaut agité.

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.

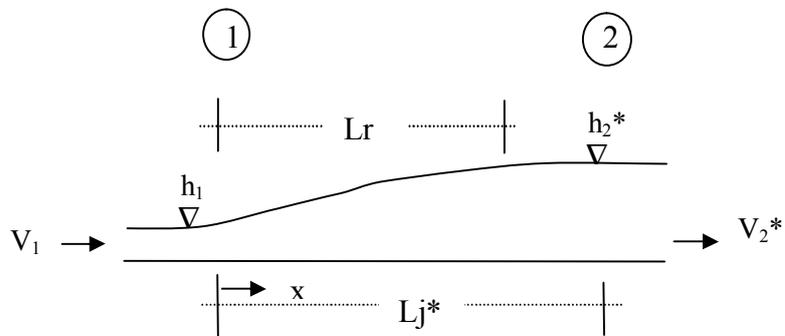


Figure 1.2 : Ressaut hydraulique classique.

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 $F_1 > 2$:

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

1.2.3 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.

1.2.3.1 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.

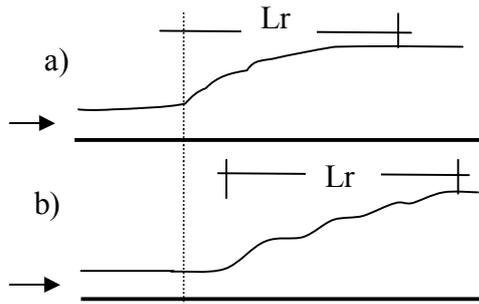


Figure 1.3 : Aspect du ressaut classique.
a) rouleau développé. b) rouleau non développé.

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.

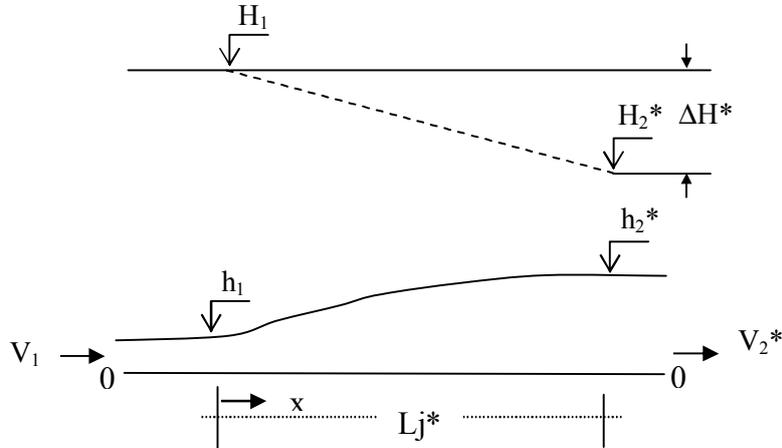


Figure 1.4 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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 :

$$\eta^* = \Delta H^*/H_1 = (H_1 - H_2^*)/H_1$$

$$\eta^* = 1 - [Y^* + F_1^2/(2.Y^{*2})]/(1+F_1^2/2) \quad (1.21)$$

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).

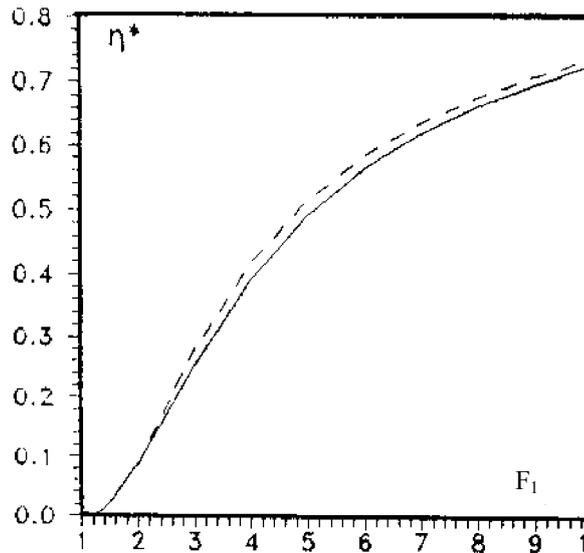


Figure 1.5 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude. (—) Courbe tracée selon la relation (1.21). (---) Courbe tracée selon la relation (1.22).

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° .

Chapitre II

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRIANGULAIRE

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons examiner le ressaut hydraulique classique, 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° .

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) extrapolent les résultats issus d'un profil semi-triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° .

II.2 Ressaut hydraulique classique

II.2.1 Approche de Hager et Wanoschek

Les essais entrepris par Hager et Wanoschek (1987) sur le ressaut "triangulaire" ont été réalisés dans un canal rectangulaire de largeur $b=30\text{cm}$ dans lequel a été insérée une paroi en PVC inclinée d'un angle de 45° par rapport à l'horizontale. Le profil obtenu est alors de forme semi-triangulaire comme l'indique la figure 2.1.b.

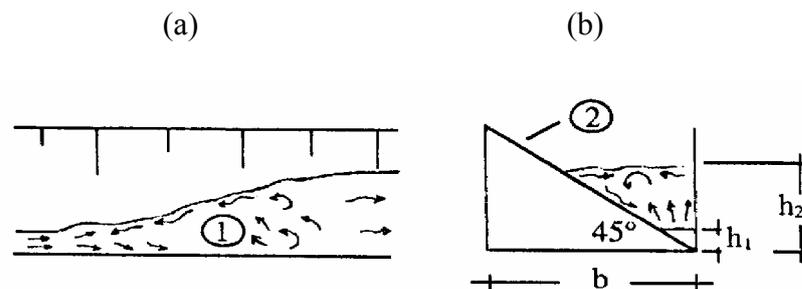


Figure 2.1 : Ressaut en canal semi-triangulaire selon Hager et Wanoschek (1987). (a) vue en plan, (b) coupe transversale.
1. vue en plan du ressaut. 2. paroi en PVC inclinée de 45° .
 h_1 et h_2 : hauteurs conjuguées du ressaut.

La paroi verticale du canal est en verre, ce qui permet la visualisation de l'écoulement. L'angle d'ouverture du canal triangulaire est d'environ 45° ($44,7^\circ$), ce qui correspond à un angle de 90° pour le canal triangulaire symétrique.

Les débits volumes Q ont été variés entre 4 et 20 l/s suivant des pas de $\Delta Q = 2$ l/s. Les essais ont été effectués sous des vitesses de l'écoulement incident variant entre 1,7 et 8,6 m/s et des profondeurs initiales h_1 entre 70 et 76 mm correspondant à des nombres de Froude $2 \leq F_1 \leq 14$ approximativement. En raison du caractère fortement torrentiel de l'écoulement incident, la mesure limnimétrique des profondeurs h_1 a été très délicate.

La mesure limnimétrique des profondeurs de l'écoulement à l'aval du ressaut a été faite avec une incertitude de plus ou moins 2 à 3 cm, en raison de violentes perturbations de la surface libre observées notamment à des nombres de Froude $F_1 > 10$.

Les vitesses axiales ont été mesurées au moyen d'un tube de Pitot à environ 3 cm de la paroi verticale du canal.

II.2.1.1 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 :

$$\frac{b \cdot h_1^2}{2} + \frac{m \cdot h_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2)} = \frac{b \cdot h_2^2}{2} + \frac{m \cdot h_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b \cdot h_2 + m \cdot h_2^2)} \quad (2.1)$$

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'horizontale et g est l'accélération de la pesanteur.

L'équation (2.1) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (2.2)$$

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:

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b + 2mh_1)}{g(bh_1 + mh_1^2)^3}, \quad Y = \frac{h_2}{h_1}, \quad M = \frac{mh_1}{b} \quad (2.3)$$

La relation (2.2) exprime ainsi, dans le cas d'un canal trapézoïdal, 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 . Les équations régissant les ressauts en canal de section rectangulaire constante et en canal triangulaire peuvent être déduites de la relation (2.2). 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'horizontale est de 90° ; ceci correspond donc à $m = \cotg 90^\circ = 0$, ou bien à $M = 0$. Par contre, le profil triangulaire correspond à un à profil trapézoïdal de base $b = 0$, soit $M \rightarrow \infty$.

Lorsque M est égal à zéro, l'équation (2.2) mène à la relation de Bélanger exprimée par la relation (1.5) du premier chapitre.

Sur la figure 2.2 est représentée graphiquement, dans un système d'axes de coordonnées cartésiennes, la relation (2.2).

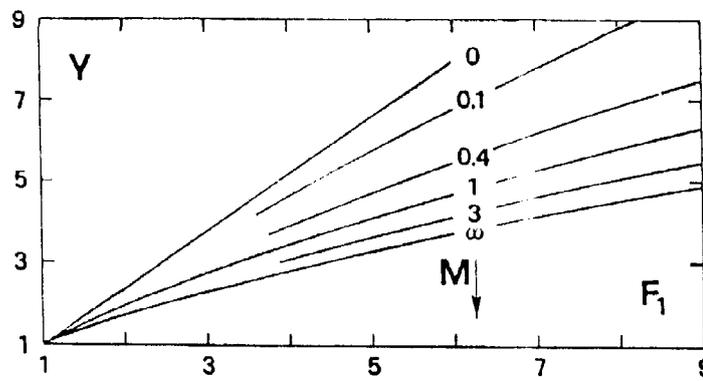


Figure 2.2 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M .
 $M=0$: Profil rectangulaire
 $M \rightarrow \infty$: Profil triangulaire
 $0 < M < \infty$: Profils trapézoïdaux.

La figure 2.2 montre clairement que la plus faible valeur du 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 2.2, traduisant la variation du rapport Y du ressaut " triangulaire " en fonction du nombre de Froude F_1 , est :

$$F_{1T}^2 = \frac{2Y_T^2(Y_T^2 + Y_T + 1)}{3(Y_T + 1)} \quad (2.4)$$

L'indice " T " indique le profil triangulaire.

L'équation (2.4) montre que Y_T s'exprime de manière fortement implicite en fonction de F_{1T} ; Hager et Wanoschek (1987) proposent alors la relation approchée :

$$Y_T = \left(\frac{3}{2} F_{1T}^2 - 1 \right)^{1/3} \quad (2.5)$$

La relation approchée (2.5) montre ainsi que $Y_T \sim F_{1T}^{2/3}$.

II.2.1.2 Équation de la quantité de mouvement

Les essais effectués par Hager et Wanoschek (1987) dans un canal semi- triangulaire d'angle d'ouverture de 45°, extrapolés ensuite au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90°, ont montré que les rapports Y expérimentaux sont légèrement inférieurs aux rapports Y théoriques obtenus par application de la relation (2.4) ; cet écart est attribué à l'effet des frottements sur les parois du canal et les auteurs proposent alors de modifier l'équation de la quantité de mouvement en tenant compte des pertes charges le long des parois du canal. Le gradient de perte de charge S_f est évalué par la formule de Blasius :

$$S_f = \frac{0,3164}{R^{0,25}} \frac{V^2}{8.g.R_h} \quad (2.6)$$

Avec $R=4R_hV/v$ représente le nombre de Reynolds, $R_h = mh/[2.(1+(1+ m^2)^{1/2})]$ est le rayon hydraulique correspondant au profil semi-triangulaire et v est 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 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 $0 \leq x \leq L_j$ est par définition :

$$W_x = \frac{1}{2} \varpi \int A(x).S_f \quad (2.7)$$

$\varpi = \rho.g$ est le poids volumique du liquide, $A(x)$ est l'aire de la section mouillée correspondant a x . Pour le cas du profil semi-triangulaire d'angle d'ouverture de 45° ($m=1$), la relation (2.6) devient :

$$S_f = \left[\frac{2Q}{mh_1^2} \right]^{7/4} \cdot \frac{v^{1/4}}{5gh_1^{5/4}} \cdot \left[\frac{h(x)}{h_1} \right]^{19/4} \quad (2.8)$$

La relation (2.7) s'écrit alors :

$$W_x = (\varpi mh_1^2/2).L_j.S_{f1}. I(Y) \quad (2.9)$$

$$I(Y) = \int_0^1 \frac{dx}{[1 + (Y - 1)X^2]^{11/4}}$$

$$Y = h_2/h_1 \quad (2.10)$$

$$X = x/L_j$$

$$S_{f1} = S_f.[h(x)/h_1 = 1]$$

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

$$I(Y) = \frac{1}{7} \left(1 + \frac{6}{Y}\right) \quad (2.11)$$

Pour les nombres de Froude $F_1 < 15$, correspondant à des rapports $Y < 7$, l'application de la relation approchée (2.11) occasionne une erreur relative inférieure à 5% par rapport à la valeur exacte calculée par l'équation (2.9)₂.

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 de section droite semi-triangulaire s'écrit:

$$\frac{m \cdot h_1^3}{6} + \frac{2Q^2}{(g \cdot m \cdot h_1^2)} = \frac{m \cdot h_2^3}{6} + \frac{2Q^2}{(g \cdot m \cdot h_2^2)} + W_x \quad (2.12)$$

En désignant par : $F_1^2 = 8Q^2/(g m^2 h_1^5)$, $\Lambda = [v m h_1 / (2Q)]^{1/4}$, $S_{fl} = \Lambda \cdot (F_1^2 / 10)$, la relation (2.12) s'écrit en termes adimensionnels :

$$1 + \frac{3}{2} F_1^2 = Y^3 + \frac{3}{2} \frac{F_1^2}{Y^2} + \frac{3\Lambda}{70} \frac{Lj}{h_1} \left(1 + \frac{6}{Y}\right) F_1^2 \quad (2.13)$$

La longueur relative Lj/h_1 figurée dans la relation (2.13) peut s'écrire : $Lj/h_1 = Y \cdot (Lj/h_2)$ et Hager et Wanoschek (1987) estiment que pour un canal triangulaire correspondant à $m=1$, $Lj/h_2 \approx 6$. Par suite, la relation (2.13) s'écrit en définitive :

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^3 - 1)}{3 \left[Y^2 - 1 - \frac{\Lambda Y^2}{6} (6 + Y) \right]} \quad (2.14)$$

Cette dernière relation traduit ainsi la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut "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 Λ . Lorsque $\Lambda \rightarrow 0$, l'effet des frottements est négligeable et la relation (2.4) est reproduite. Hager et Wanoschek (1987) notent que l'écart maximum observé entre les valeurs expérimentales des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut et celles issues de l'application de la relation (2.14) ne dépasse guère 3%.

La figure 2.3 montre les mesures expérimentales de Hager et Wanoschek (1987) comparées à la fois aux valeurs théoriques obtenues par l'application de la relation (2.4) ($\Lambda \rightarrow 0$) et à celles issues de l'équation (2.14) pour $\Lambda > 0$.

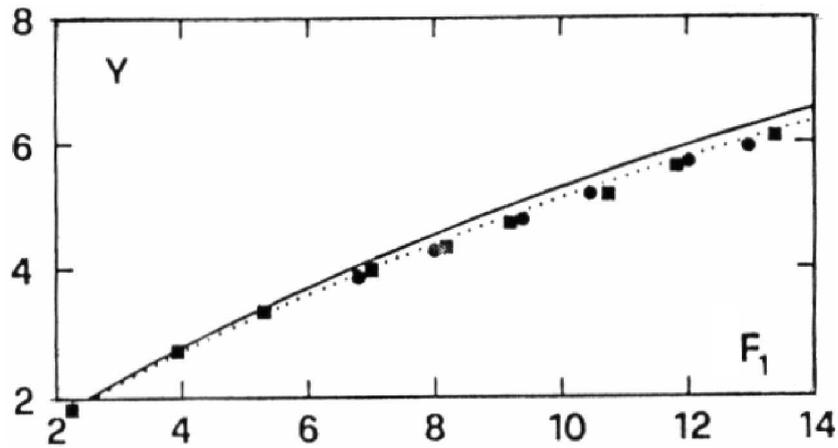


Figure 2.3 : Variation des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut triangulaire ($m=1$) en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoschek (1987).

(—) courbe tracée selon la relation (2.4). $\Lambda=0$.

(---) courbe tracée selon la relation (2.14). $\Lambda>0$.

II.2.1.3 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 2.3 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 exclusivement de m et de F_1 . La figure 2.4 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 .

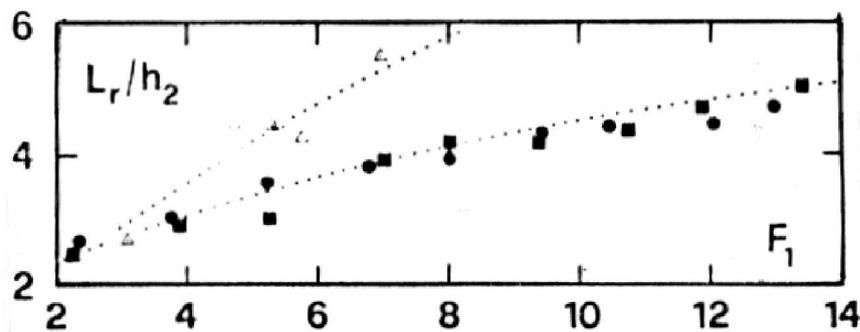


Figure 2.4 : Longueur relative L_r/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoschek (1987) ($m=1$).

(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 :

$$L_r/h_2 = 1,8.(m)^{0,5} . F_1^{0,4/m} , 0,4 < m \leq 1 \quad (2.15)$$

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° ($m=1$), est telle que $3,7 < L_r/h_2 < 4,35$.

En ce qui concerne la longueur relative L_j/h_2 du ressaut "triangulaire", les mesures expérimentales de Hager et Wanoschek (1987) ainsi que celles d'Argyropoulos (1962) sont représentées sur la figure 2.5, 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 2.5 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 :

$$L_j/h_2 = 2,4.(m)^{0,5} . F_1^{0,4/m} , 0,4 < m \leq 1 \quad (2.16)$$

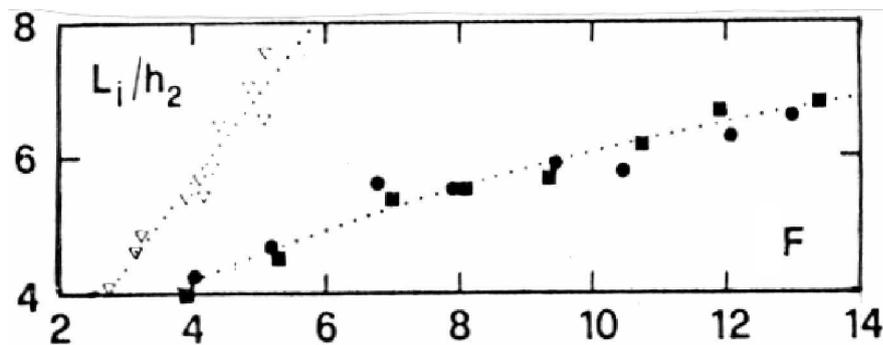


Figure 2.5 : Longueur relative L_j/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 , selon Hager et Wanoschek (1987) ($m=1$). (∇): $m=0,44$ selon Argyropoulos (1962).

II.2.1.4 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 $y(x)$ définissant 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 2.6 représente les mesures expérimentales de Hager et Wanoschek (1987) concernant le profil de surface généralisé du ressaut "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 même courbe d'équation approchée :

$$y(X) = (1 + \alpha X) \cdot \tanh(\beta X) \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (2.17)$$

" tanh " désigne la tangente hyperbolique.

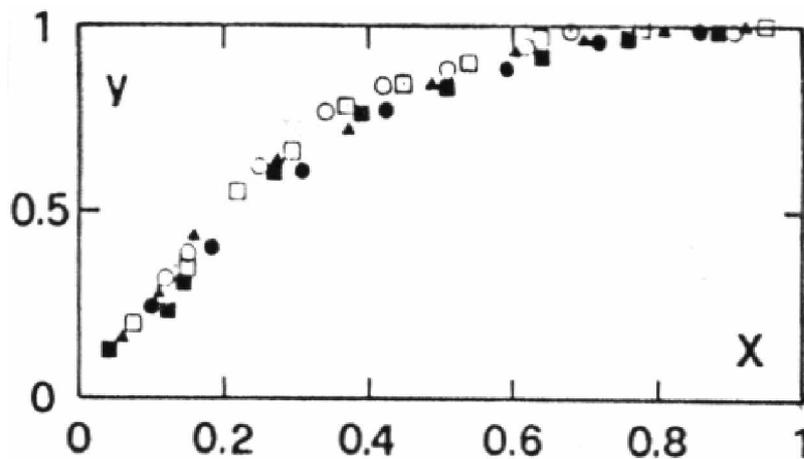


Figure 2.6 : Profil de surface généralisé $y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ($m=1$), selon Hager et Wanoschek (1987) .

La figure 2.6 montre que le profil de surface généralisé est pratiquement linéaire pour la gamme $0 \leq X \leq 0,2$. La droite, représentant 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 β figurant dans la relation (2.17) a donc pour valeur : $\beta = (1 - 0)/(0,4 - 0) = 1/0,4$, soit $\beta = 2,5$. Ainsi, le paramètre α peut être déterminé en écrivant que $y(X=1)=1$, soit $1 = (1 + \alpha) \cdot \tanh(2,5)$, par suite $\alpha = 0,014$. Le profil de surface généralisé admet donc pour équation :

$$y(X) = (1 + 0,014 \cdot X) \cdot \tanh(2,5 \cdot X) \quad (2.18)$$

Hager et Wanoschek (1987) notent que le profil de surface le long de la paroi inclinée du canal triangulaire (profil latéral) se situe légèrement au-dessous du profil axial précédemment défini, voire même équivalent.

II.3 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons examiné les travaux de Hager et Wanoschek (1987) ; ces études ont concerné le ressaut "triangulaire" classique évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90°.

Nous avons mis l'accent sur la démarche expérimentale assez particulière de Hager et Wanoschek (1987) qui extrapolent les résultats issus d'un profil semi-triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique.

L'étude (1987) 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 $\Lambda = [\nu m h_1 / (2Q)]^{1/4}$, où ν est la viscosité cinématique du liquide, m la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal, h_1 la hauteur initiale du ressaut et Q le débit volume. Lorsque $\Lambda = 0$, aucun effet des frottements n'est observé et l'équation de la 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.

Chapitre III

RESSAUT CONTROLÉ PAR UN SEUIL A PAROI MINCE

III.1 Introduction

Nous examinerons dans ce chapitre l'étude de Debabeche (2003), qui a pour objectif d'expérimenter le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° . L'étude se proposera de trouver des relations fonctionnelles liant les caractéristiques du ressaut hydraulique.

III.2 Approche de Debabeche (2003)

III.2.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

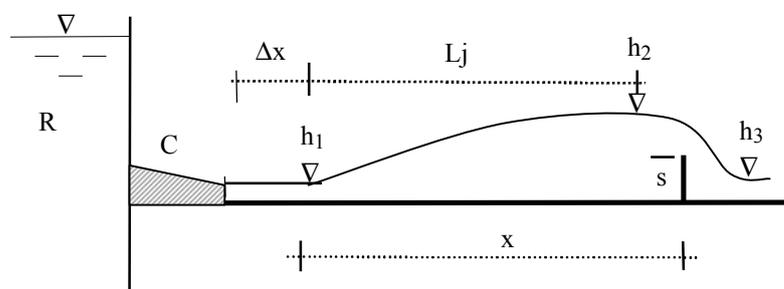


Figure 3.1 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

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

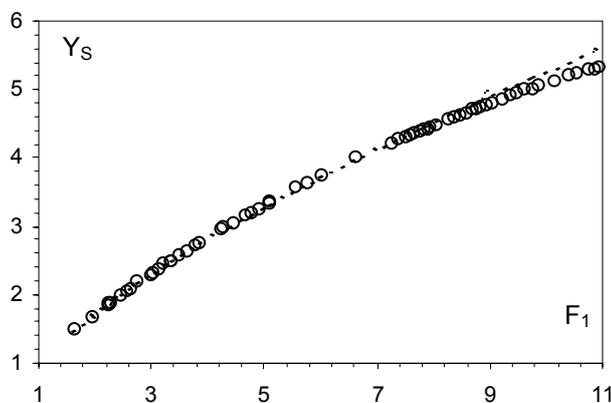


Figure 3.2 : Variation du rapport $Y_s = f(F_1)$ dans un canal triangulaire. (---) Ressaut classique. (o) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

La figure 3.2 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 3.3.

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 Debabeche (2003) a déterminé la relation suivante :

$$Y_s = 1 + 0,96 \cdot S \quad (3.1)$$

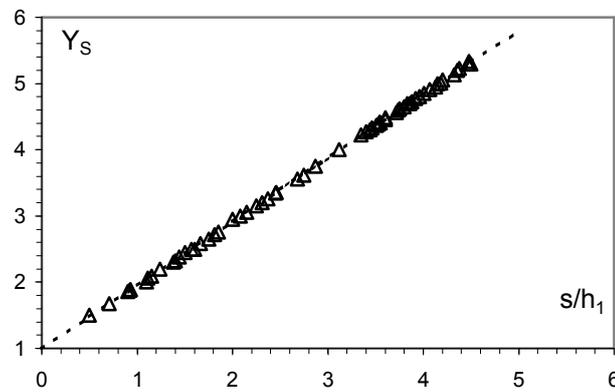


Figure 3.3 : Variation expérimentale de $Y_s = f(S)$ lors du contrôle d'un ressaut triangulaire. (Δ) Points expérimentaux. (---) Courbe tracée selon la relation : $Y_s = 1 + 0,96.S$.

III.2.2 Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude

Debabeche (2003) a montré précédemment que l'influence du seuil sur la hauteur finale du ressaut, et de même pour le rapport Y_s , n'était pas significative. Il ont 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 3.4 montre en effet que les points expérimentaux obtenus suivent, dans leur totalité, la variation d'une courbe unique de type logarithmique.

L'ajustement des couples de valeurs (F_1 , S) a donné la relation :

$$S=s/h_1 = 4,125.Ln[(F_1 + 4)/5] \quad (3.2)$$

« Ln » désigne le logarithme népérien.

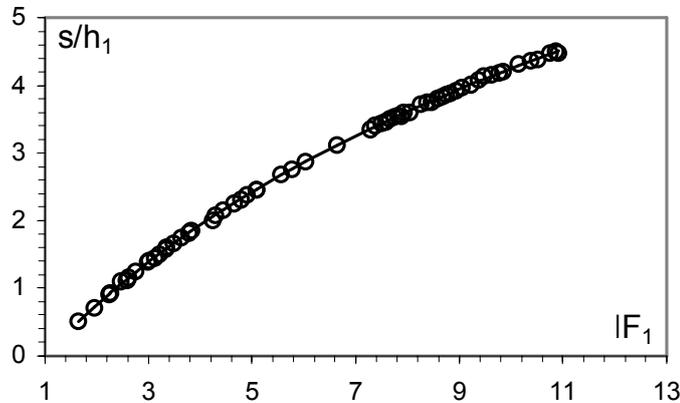


Figure 3.4 : Variation expérimentale de la hauteur relative S du seuil à paroi mince, en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbe tracée selon la relation : $S=s/h_1=4,125.Ln[(F_1+4)/5]$. (o) Points expérimentaux.

La relation ci-dessus, ainsi que la tendance des points expérimentaux représentés par la figure 3.4, 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 3.4 indique que pour le cas du ressaut triangulaire la hauteur relative s/h_1 ne dépend nullement de la position x/h_1 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 .

III.2.3 Relation générale régissant le contrôle du ressaut

Debabeche (2003) a montré, d'après l'analyse de leurs mesures expérimentales, qu'une relation générale peut exprimer les paramètres F_1 , s/h_1 et x/h_1 . Cette relation 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 3.5. 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.

Ainsi, la relation générale régissant le contrôle du ressaut triangulaire en présence d'un seuil à paroi mince s'écrit :

$$S + F_1^{0,4} = 0,127(x/h_1) + 1,269 \quad , \quad x/h_1 \geq 4 \quad (3.3)$$

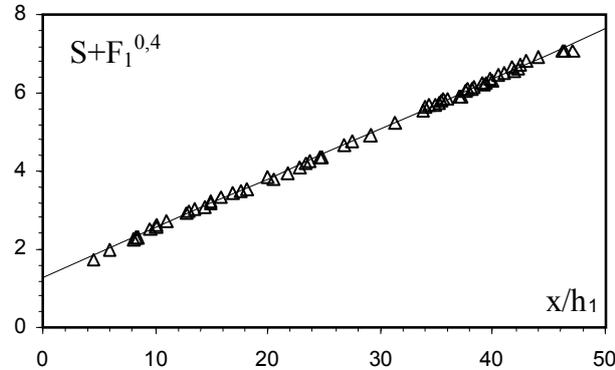


Figure 3.5 : Variation de $(S+F_1^{0,4})$ en fonction de la position relative x/h_1 du seuil à paroi mince lors du contrôle d'un ressaut triangulaire: $x/L_j=1, S=s/h_1$. (—) Courbe tracée selon la relation : $S+F_1^{0,4}=0,127.(x/h_1)+1,269$. (Δ) Points expérimentaux.

III.3 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, le travail de Debabeche (2003) qui a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut, contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince, dans un canal de section droite triangulaire à 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 h_1 et à débits volumes Q variables; chaque série de mesures est cependant 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 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 des relations simples à l'emploi, liant les trois variables adimensionnelles ci-dessus citées.

Chapitre IV

INFLUENCE DU SEUIL SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRIANGULAIRE

IV.1 Introduction

Ce chapitre examinera les travaux de Debabeche et Achour (2006) ayant trait à l'influence d'un seuil mince sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° . L'étude a pour objectif de faire une étude comparative, d'une part, entre le ressaut contrôlé par seuil mince et par seuil épais, et d'autre part entre le ressaut contrôlé et le ressaut forcé de type B-min (Figure 4.1).

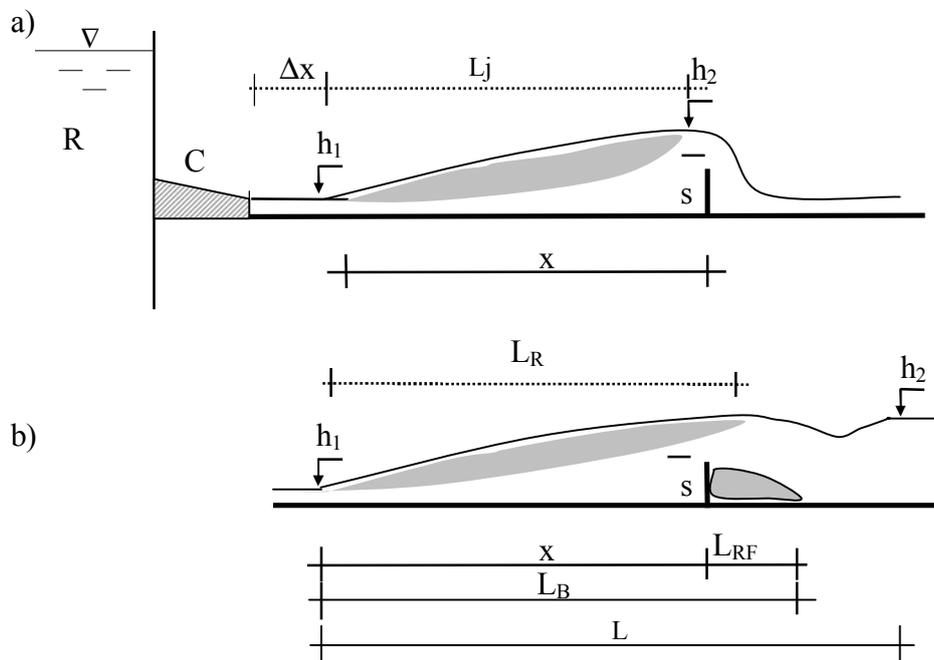


Figure 4.1 : a) Ressaut contrôlé. b) Ressaut forcé de type B_{min} .
 h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x position du seuil par rapport au pied du ressaut, L_j longueur du ressaut, L_R longueur du rouleau, L_{RF} longueur du rouleau de fond, L_B distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval, L Distance entre le pied du ressaut et la position où h_2 devient constante. Δx distance séparant le convergent du pied du ressaut, C convergent, R réservoir.

IV.2 Approche de Debabeche et Achour (2006)

IV.2.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Le ressaut n'étant pas encore forcé, théoriquement le seuil ne devrait avoir aucun effet réducteur sur la hauteur finale h_2 du ressaut, puisque celui-ci n'est pas encore forcé. En d'autres termes, la hauteur finale h_2^* du ressaut classique triangulaire doit être égale à la hauteur finale h_2 du ressaut contrôlé par seuil, sous les mêmes conditions de l'écoulement

incident. La figure 4.2 montre la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 , d'une part, pour le cas du ressaut contrôlé par le seuil à paroi mince et épaisse, et d'autre part pour le ressaut forcé.

Nous avons également représenté la variation du rapport Y^* théorique du ressaut 'classique triangulaire' issu de l'application de l'équation de quantité de mouvement, Hager et Wanoschek (1987), soit :

$$F_1^2 = \frac{2Y^{*2} (Y^{*2} + Y^* + 1)}{3(Y^* + 1)} \quad (4.1)$$

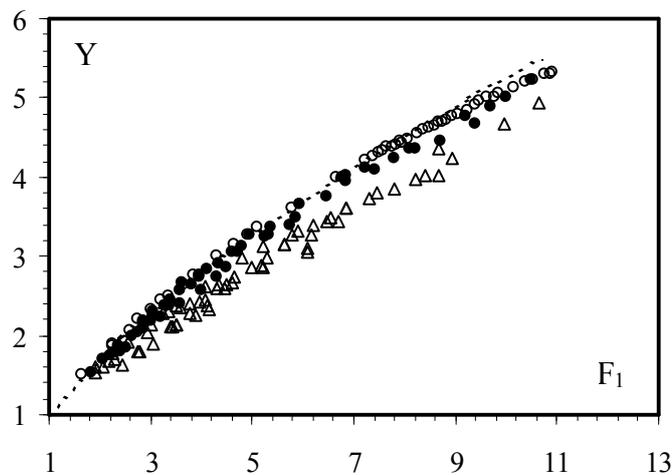


Figure 4.2 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m=1$: (o) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (●) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) Ressaut forcé par seuil à paroi mince. (---) Courbe tracée selon la relation (4.1).

La figure 4.2 montre ainsi que l'égalité $Y = Y^*$ n'est satisfaite que pour une certaine gamme de valeurs du nombre de Froude incident F_1 . L'influence du seuil à paroi mince (ou épaisse) sur le rapport des hauteurs conjuguées apparaît à des valeurs de F_1 supérieures à 7,50 environ. Cette influence s'accroît avec l'augmentation de F_1 , mais elle n'est cependant pas significative ; Nous avons pu observer en effet que pour $F_1=11$, l'écart relatif $(Y-Y^*)/Y^*$ est approximativement égal à 5% pour le seuil à paroi mince et 7% environ pour le cas du seuil à paroi épaisse.

Par ailleurs, pour les mêmes nombres de Froude F_1 , un décalage important entre les valeurs de Y du ressaut forcé et du ressaut contrôlé est perceptible.

En effet, pour des nombres de Froude F_1 supérieur à 3, le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut forcé est nettement inférieur à celui du ressaut contrôlé par seuil.

Dans toute la gamme de F_1 que nous avons testé, c'est à dire $1,60 \leq F_1 \leq 11$, un ajustement des valeurs expérimentales a montré que la variation de $Y = f(F_1)$ est de type logarithmique :

$$Y = 1 + \alpha \cdot \text{Ln}[(F_1+4)/5] \quad (4.2)$$

$\alpha = 3,96$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince
 $\alpha = 3,78$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse
 $\alpha = 3,33$ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince

La condition de criticité est ainsi satisfaite puisque $Y(F_1=1) = 1$.

L'analyse des mesures expérimentales a montré la possibilité de corrélérer le rapport Y des hauteurs conjuguées des ressauts contrôlé et forcé par seuil et la hauteur relative S de celui-ci, dans toute la gamme $1,60 \leq F_1 \leq 11$. La figure 4.3 montre la variation expérimentale de Y en fonction de S pour le cas du ressaut contrôlé par seuil à paroi mince et épaisse, et le cas d'un ressaut forcé par seuil mince. Il ressort que cette variation suit une loi linéaire et un ajustement a permis d'écrire avec une bonne approximation, aussi bien pour le ressaut contrôlé (seuil à paroi mince et épaisse) que pour le ressaut forcé, que :

$$Y = 1 + \beta S \quad (4.3)$$

$\beta = 0,96$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince
 $\beta = 1,02$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse
 $\beta = 0,82$ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince

Pour l'ajustement de ces droites, nous avons pris en considération la condition : $Y(S=0) = 1$.

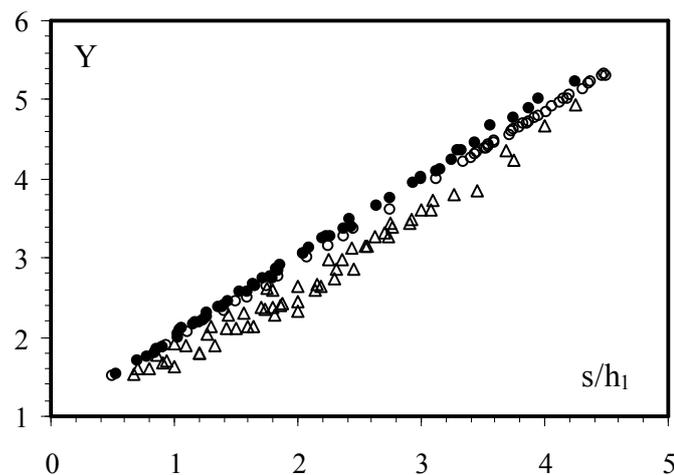


Figure 4.3 : Variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative S du seuil. Points expérimentaux pour $m=1$: (o) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (•) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) Ressaut forcé par seuil à paroi mince.

IV.2.2 Hauteur relative du seuil

Il ressort des relations (4.2) et (4.3) que la hauteur relative S du seuil peut s'écrire pour les trois cas de figure comme suit :

$$S = \gamma \text{Ln}[(F_1+4)/5] \quad (4.4)$$

$\gamma = 4,13$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince
 $\gamma = 3,71$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse
 $\gamma = 4,06$ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince

L'expérimentation a d'ailleurs montré la validité de la relation (4.4) pour les trois types de ressauts testés. Nous présenterons sur la figure 4.4 les résultats obtenus.

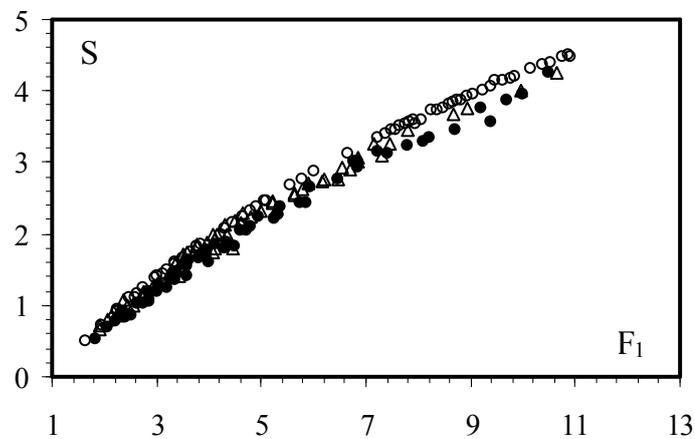


Figure 4.4 : Variation expérimentale de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 , pour un ressaut évoluant dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m=1$: (o) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (●) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) Ressaut forcé par seuil à paroi mince.

IV.2.3 Longueur relative du bassin

Comme il est bien illustré dans la figure 4.1, la notation de longueur de bassin diffère pour les deux types de ressauts.

Pour le ressaut contrôlé par seuil mince ou épais, cette longueur correspond à la position x du seuil par rapport au début du ressaut. Pour ce type de ressaut, cette longueur est caractérisée par un rouleau de surface.

Tandis que pour le ressaut forcé, la longueur L_B du bassin est la somme de la longueur de la position x du seuil et de la longueur du rouleau de fond L_{RF} à l'aval du seuil, par rapport au pied du ressaut ($L_B = x + L_{RF}$).

La figure 4.5 montre la variation expérimentale de la longueur relative $X=x/h_1$ du bassin du ressaut contrôlé par seuil mince, par seuil épais et $X=L_B/h_1$ du ressaut forcé par seuil mince en

fonction du nombre de Froude F_1 . Un ajustement par la méthode des moindres carrés a permis d'aboutir, avec une bonne approximation, pour les trois types de ressaut, à une équation de type puissance de la forme :

$$S + F_1^{0,4} = a X + b, \quad X \geq 4 \quad (4.5)$$

La hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil est tirée de l'équation (4.4).

Les constantes a et b sont représentées pour chaque type de ressaut dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4.1 : Valeurs des constantes a et b de l'équation (4.5) pour les trois types de ressaut

	Ressaut Contrôlé		Ressaut Forcé de type B-min
	Seuil mince	Seuil épais	
a	0,127	0,125	0,161
b	1,278	1,410	1,000
R^2	0,999	0,986	0,993

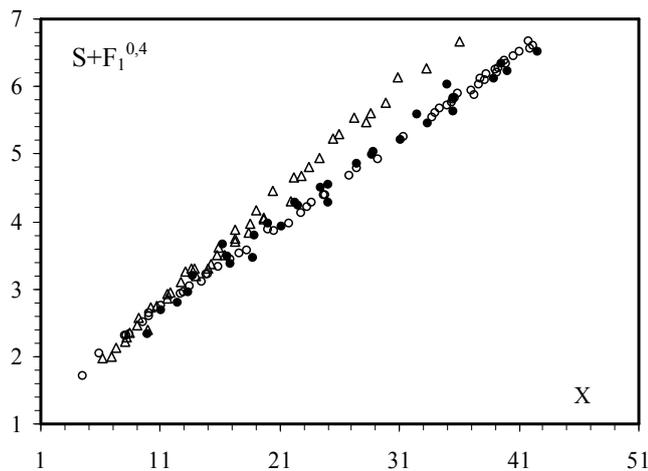


Figure 4.5 : Variation expérimentale de la longueur relative X du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 , pour un ressaut évoluant dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m=1$: (o) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (•) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) Ressaut forcé par seuil à paroi mince.

Les points de mesures du ressaut contrôlé par seuil mince et épais sont quasiment confondus, montrant ainsi, que pour le même nombre de Froude incident et la même hauteur relative s/h_1 de seuil, la longueur relative du bassin de ces deux cas est pratiquement la même. Par ailleurs, le décalage est assez important pour le cas du ressaut forcé. En effet, pour des nombres de Froude incidents supérieurs à 4, la longueur relative du bassin du ressaut forcé est inférieure à celle du ressaut contrôlé. On observe que pour $S + F_1^{0,4} = 6.68$ ($F_1 = 9.96$), l'écart relatif entre x/h_1 et L_B/h_1 est de 17 % environ.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné l'étude de Debabeche et Achour (2006), relative à l'analyse de l'influence du seuil sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire. Les auteurs ont fait une étude comparative, d'une part, entre le ressaut contrôlé par seuil mince et par seuil épais, et d'autre part entre le ressaut contrôlé et le ressaut forcé de type B-min.

L'analyse des mesures expérimentales montre que la mise en place d'un seuil n'a pas d'effet réducteur significatif sur le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut. Un léger écart est cependant observé en Y^* et Y désignant les rapports des hauteurs conjuguées respectivement du ressaut sans obstacle à l'aval "ressaut classique" et ceux du ressaut contrôlé. L'écart est par contre important, entre les valeurs de Y du ressaut forcé et du ressaut contrôlé. En effet, pour des nombres de Froude F_1 supérieurs à 3, le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut forcé est nettement inférieur à celui du ressaut contrôlé. Une loi de type logarithmique est proposée pour évaluer le rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les trois types de ressaut. En outre, la représentation graphique des mesures expérimentales montre que $(Y-1)$ augmente au fur et à mesure que la hauteur relative S du seuil croît, suivant une courbe unique linéaire de pente 0,96 pour le cas du ressaut contrôlé par seuil mince, de pente 1,02 pour le cas du ressaut contrôlé par seuil épais et la pente est de 0,82 pour le ressaut forcé par seuil mince. L'interdépendance des paramètres adimensionnels S et F_1 est alors mise en évidence.

Par ailleurs, une relation de type puissance, liant la hauteur relative S du seuil, le nombre de Froude F_1 et la longueur relative X du bassin a été trouvée pour les trois types de ressaut étudiés. La représentation graphique montre que pour le même nombre de Froude incident, les points de mesures du ressaut contrôlé par seuil mince et épais sont presque confondus. En outre, un décalage important est observé pour le cas du ressaut forcé. En effet, pour des nombres de Froude incidents supérieurs à 4, la longueur relative du bassin du ressaut forcé est inférieure à celle du ressaut contrôlé. D'une manière générale, le ressaut forcé par seuil mince est plus avantageux par une hauteur aval moindre et un bassin plus court.

Chapitre V

RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR MARCHE POSITIVE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

V.1 Introduction

Le ressaut hydraulique contrôlé par marche n'a connu que très peu d'études. Les recherches les plus récentes dans ce domaine, sont certainement celles de Forster et Skrinde (1950), celles de Hager et Sinniger (1985) et celles de Hager et Bretz (1987). Les auteurs ont abordé le ressaut contrôlé par marche positive dans un canal de forme rectangulaire.

La marche positive constitue l'un des moyens les plus simples pour réaliser la transition de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial, par un changement local du radier. Le ressaut se développe dans un canal rectangulaire à pente amont et aval presque horizontale et avec marche positive de hauteur s (Figure 5.1).

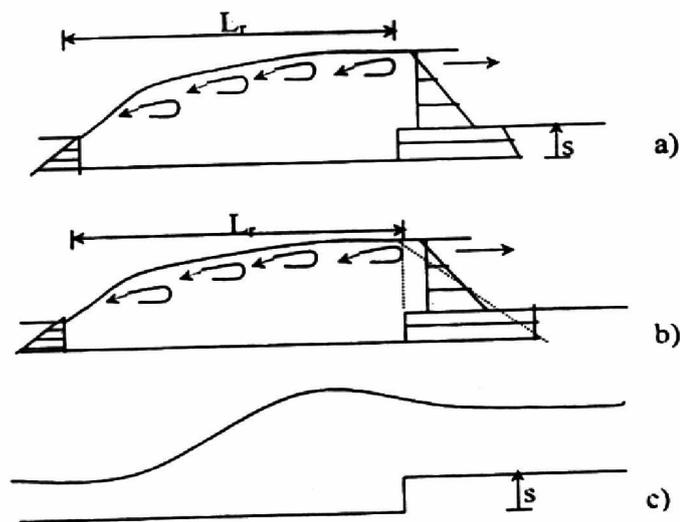


Figure 5.1 : Types de ressaut hydraulique évoluant dans un canal doté d'une marche positive. (a) ressaut type A. (b) ressaut type B. (c) ressaut type B-min

On présente en fin de ce chapitre l'étude réalisée par Abdel-Azim M. Negm (2000) concernant la cavitation sur les marches positive et négative dans un canal rectangulaire à forte pente pour les ressauts forcés type A et B.

V.2 Etude de Forster et Skrinde (1950)

Forster et Skrinde ont analysé en 1950 les écoulements sur une marche positive et sur un seuil sans considération des conditions à l'aval, l'écoulement est libre au-delà du seuil. En supposant une répartition hydrostatique des pressions sur la marche pour l'application du

théorème de la quantité de mouvement, ils ont obtenu une relation entre $Y=h_2/h_1$, $S=s/h_1$ et F_1 . La Figure 5.2, représente la courbe théorique pour $S = 4$ et les points expérimentaux pour $S=0,5, 1, 2$ et 4 . Les points expérimentaux sont sur des courbes parallèles à celles théoriques mais décalées, et plus S est grand, plus l'écart augmente, pour un même nombre de Froude F_1 , la valeur expérimentale est inférieure à celle théorique (Figure 5.2).

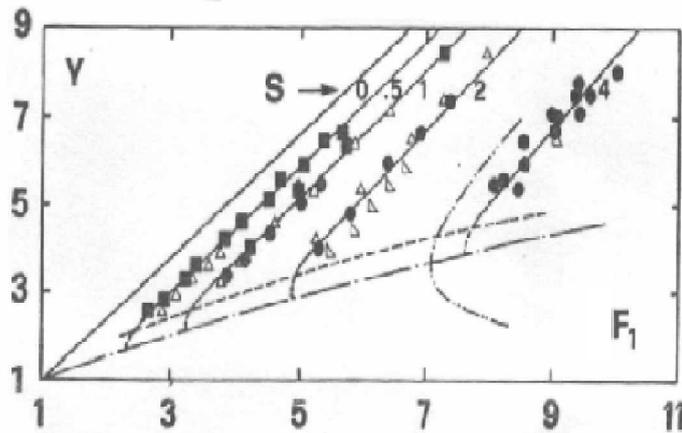


Figure 5.2 : Résultats expérimentaux de Forster et Skrinde (1950). Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 pour différentes hauteurs relatives S de marches positives : (■) 23.8 mm, (Δ) 36.3 mm, (●) 53.9 mm et (Δ) 7.9 mm. (---) Courbe théorique pour $S = 4$, (---) Limite inférieure des essais et (-.-) Limite théorique.

V.3 Travaux de Hager et Sinniger (1985)

Dans cette étude, Hager et Sinniger (1985) énoncent qu'en raison des fluctuations importantes de la surface d'eau, la longueur du ressaut L_j ne peut être définie avec suffisamment de précision. C'est la raison pour laquelle seule la longueur du rouleau L_r est prise en considération.

Par comparaison avec le ressaut hydraulique dans un canal sans marche, on distingue divers types de ressauts. La transition d'un type à l'autre est normalement continue ; du point de vue du dimensionnement, concernant la position limite amont, le ressaut hydraulique apparaît de manière similaire avec ou sans marche. Cette limite est donc caractérisée par un ressaut pour lequel l'extrémité aval du rouleau se trouve au droit de la marche. La répartition des pressions est évidemment hydrostatique et les vitesses sont réparties presque uniformément dans les deux sections limitant le volume de contrôle. Ce type de ressaut est appelé ressaut type A (Figure 5.1 a).

Le rapport des hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$, où h_1 et h_2 sont respectivement les hauteurs d'eau à l'amont et à l'aval du ressaut, se calcul par l'équation de quantité de mouvement en négligeant les effets de frottement (Forster et Skrinde, 1950 ; Hager et Bretz, 1987) :

$$F_1^2 = \frac{Y[(Y+S)^2 - 1]}{2(Y-1)} \quad (5.1)$$

Avec :

$S = s/h_1$: hauteur relative de la marche positive ; s étant la hauteur de la marche positive.

$F_1 = q/(gh_1^3)^{1/2}$: nombre de Froude à la section amont du ressaut. Où : $q = Q/b$ est le débit par unité de largeur.

Lorsque la hauteur d'eau aval h_u est supérieure à h_2 calculée à l'aide de l'équation (5.1), le ressaut hydraulique se déplace vers l'amont.

Par contre, lorsque h_u devient inférieure à h_2 calculée à l'aide de l'équation (5.1) l'effet de la marche commence à se faire sentir.

Le ressaut type A se transforme en un ressaut type B. Il correspond à la position stable du ressaut situé le plus loin possible à l'aval (Figure 5.1.b).

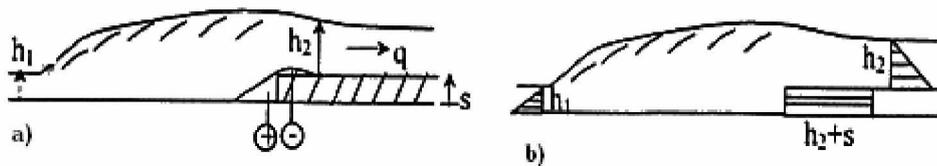


Figure 5.3 : a) Zones de séparation d'écoulement pour une marche positive, (+) et (-) indiquent respectivement les surpressions et les dépressions par rapport à la pression hydrostatique. b) Répartition de la pression autour du volume de contrôle.

Comme c'est montré à la figure (5.3.a), il existe deux zones de séparation autour de la marche positive, celle située à l'amont et caractérisée par une surpression, celle située à l'aval par une dépression par rapport à la pression hydrostatique.

Comme hypothèse de la pression sur la marche, une distribution uniforme est admise égale à la valeur $(h_2 + s)$, où h_2 est la hauteur d'eau aval sur la marche (Figure 5.3.b). Le rapport des hauteurs conjuguées pour le ressaut hydraulique forcé par marche positive type B s'écrit donc:

$$F_1^2 = \frac{Y[(Y+S)^2 + S^2 - 1]}{2(Y-1)}, \quad S \geq 0 \quad (5.2)$$

Les courbes correspondantes montrent une bonne concordance avec les essais de Forster et Skrinde (1950), (Figure 5.4).

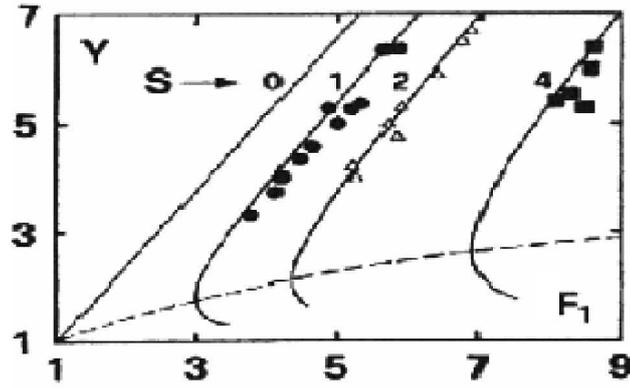


Figure 5.4 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 pour différentes hauteurs relatives S de marches positives. (—) Courbes théoriques pour divers S selon Hager et Sinniger (1985); points expérimentaux de Forster et Skrinde (1950). (---) Limite théorique.

Pour h_1 , S et q données, l'équation (5.2) conduit à un nombre de Froude F_1 plus grand que celui résultant de l'équation (5.1) pour les mêmes rapports Y . Autrement dit, la valeur de Y tirée de l'équation (5.2) est inférieure à celle tirée de l'équation (5.1) pour une même valeur de F_1 . Les deux relations ne deviennent identiques que pour $S=0$, correspondant au ressaut hydraulique dans un canal sans manche (classique).

Une formule simplifiée est développée pour la dissipation d'énergie relative à la charge amont :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = \left[1 - \left(\frac{\sqrt{2}}{F_1} \right) \right]^2, \text{ pour } F_1 > 1,5 \quad (5.3)$$

Il faut dire que η est indépendant de S et correspond donc au cas $S = 0$.

La figure 5.5 montre la variation du rapport des hauteurs conjuguées pour les marches positives et négatives en fonction du nombre de Froude amont F_1 et de la hauteur relative S de la marche. Les courbes en pointillées correspondant à la position extrême amont et les courbes pleines se réfèrent à la position extrême aval de la marche. La courbe en trait discontinu correspond à la limite inférieure de l'apparition du ressaut sur une marche positive de la fonction $Y(F_1)$ pour S fixé (Hager et Sinniger, 1985).

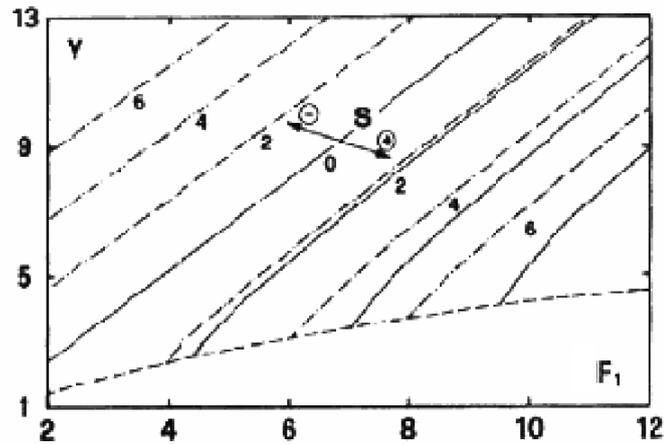


Figure 5.5 : Rapport des hauteurs conjuguées en fonction de F_1 Pour les marches positives et négatives dans un canal rectangulaire, prismatique, (.....) Ressaut type A, (—) Ressauts types B et B-min, (-.-.-) Limite inférieure de l'apparition du ressaut sur une marche positive.

Si, pour S et F_1 donnés, h_u est plus petit que le minimum de la hauteur d'eau aval h_2 (ressauts types B et B-min), le ressaut est repoussé vers l'aval. Il en résulte un jet torrentiel à l'aval de la marche, sans dissipation d'énergie importante (Figure 5.1.c) une telle configuration d'écoulement doit être évidemment évitée en tout les cas. Par conséquent, la hauteur aval doit être limitée de façon à ce que le ressaut hydraulique apparaisse pour tous les débits envisageables.

V.4 Travaux de Hager et Bretz (1987)

Comparé à un ressaut hydraulique dans un canal prismatique et à fond horizontal, un bassin amortisseur doit forcer l'apparition du ressaut quelques soient les conditions hydrauliques. En particulier, le ressaut hydraulique ne doit pas sortir du bassin amortisseur.

La stabilité d'un bassin amortisseur est la capacité de l'ouvrage de maintenir la position du ressaut sous des hauteurs d'eau aval h_u variables, en fixant la hauteur amont h_1 et le nombre de Froude F_1 incident correspondant.

Soit $\Delta Y = Y_A - Y_B$ le changement maximal admissible de la hauteur d'eau aval, où Y_A caractérise le ressaut type A et Y_B le ressaut type B. Une estimation de ΔY est selon Hager et Bretz (1987) :

$$\Delta Y = S/6 \quad (5.4)$$

Hager et Bretz (1987) montrent que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude F_1 .

La dissipation relative d'énergie $\eta = \Delta H/H_1$ est définie par la perte de charge ΔH au travers le ressaut hydraulique comparée à l'énergie amont, soit $H_1 = h_1 + q^2 / (2gh_1^2)$.

La figure 5.6 représente $\eta = f(F_1, S)$ pour les deux types de marche. On constate que η dépend fortement de S et de F_1 . Pour F_1 et S fixés, l'efficacité minimale est donnée par le ressaut hydraulique.

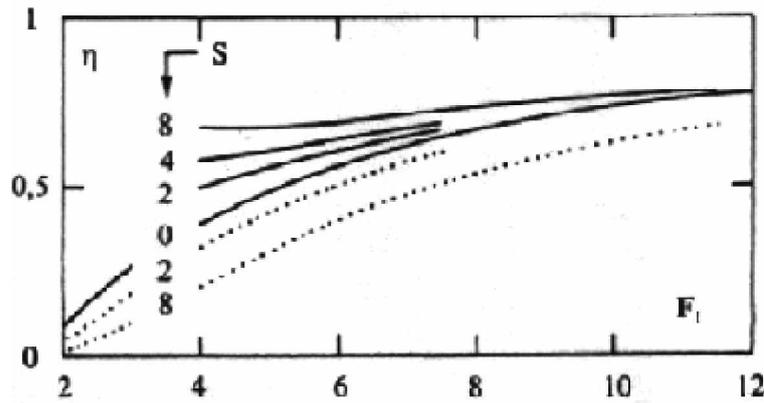


Figure 5.6 : Efficacité $\eta = \Delta H/H_1$ en fonction de F_1 et de S .
 (---) Ressaut type A sur marche négative, ($S = 0$) Ressaut type B sur marche positive. (—) Ressaut type B-min sur marche négative.

L'étude montre que l'efficacité relative minimale et donnée par le ressaut hydraulique type A est celle la plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique type B.

La compacité d'un bassin amortisseur correspondant à son extension longitudinale à condition que le ressaut se trouve entièrement dans le dissipateur. Les indications suivantes se réfèrent à la longueur du rouleau, la répartition de la vitesse à l'extrémité aval du rouleau est loin d'être uniforme. En ajoutant encore 20 à 40 % de la longueur du rouleau L_r , cette répartition devient presque uniforme, la vitesse auprès du fond étant sensiblement égale à $V_2 = q / h_2$.

Des essais sur modèle réduit montrent que la longueur relative $\lambda = L_r / (h_2 + s)$ ne varie pas systématiquement avec F_1 . Pour les positions extrêmes, Hager et Bretz (1987) ont obtenu les valeurs moyennes suivantes :

$$\lambda = 4,75 \text{ pour le ressaut type A.} \tag{5.5}$$

$$\lambda = 4,25 \text{ pour le ressaut type B.}$$

Pour le ressaut type A, la fin du rouleau se trouve par définition au niveau de la marche. Pour le ressaut de type B le pied du ressaut se trouve à peu près à une distance $L_r/2$ à l'amont de la marche. De plus, avec : $U = \sqrt{2} F_1 - 1/2$, la longueur du fond protégée L_p se calcule par :

$$\lambda_p = 6 \left(U - \frac{6S}{5} \right) \quad (5.6)$$

Avec : $\lambda_p = L_p/h_1$.

V.5 Approche de Abdel-Azim M. Negm (2000)

V.5.1. Détection de la cavitation sur marche dans les bassins amortisseurs à forte pente sous l'effet d'un ressaut hydraulique

La présence des marches sous les conditions d'un écoulement turbulent, résulte dans les zones de séparation de l'écoulement à proximité de ces marches, où se produit éventuellement des pressions négatives. La distribution des pressions dans les marches n'est pas hydrostatique sous certaines conditions d'écoulement. Elle peut être inférieure ou supérieure à la pression hydrostatique. Les zones de pression négative à proximité des marches ne peuvent pas être détectées en utilisant les piézomètres et nécessitent des transducteurs ou des dispositifs sensibles de mesure de pression. Quelque fois ces dispositifs ne sont pas disponibles et en plus leur coût est élevé.

L'auteur a proposé une approche semi-théorique pour la détection de l'existence de la cavitation à proximité des marches, sous l'effet d'un ressaut hydraulique. Les deux marches négative et positive de différentes hauteurs dans les bassins à forte pente sont considérées. Le coefficient de la force de pression sur les marches est pris comme indicateur de présence de pressions négatives et de la possibilité de développement d'une cavitation à proximité des marches.

La différence entre la distribution de la pression agissante sur la face de la marche et celle hydrostatique dans le cas des ressauts type A⁻ et type B⁻ est plus grande que dans le cas des ressauts type A⁺ et type B⁺, et dépendent et des conditions de l'écoulement dans la marche et de la hauteur relative de cette dernière.

Les analyses de tous les résultats indiquent que la pression négative se produit probablement dans les zones à proximité de la marche négative sous l'effet du ressaut hydraulique et plus sévère dans le cas du ressaut type A⁻. De plus, la pente du fond affecte fortement la variation du coefficient de la force de pression et le taux de variations est indépendant du type du ressaut, du nombre de Froude et de la hauteur relative de la marche.

V.6 Conclusion

Ce dernier chapitre de notre étude bibliographique a été consacré aux principaux travaux entrepris dans le domaine de ressaut hydraulique contrôlé par marche positive dans un canal de section rectangulaire. Nous avons abordé dans cette étude, les travaux de Forster et Skrinde (1950) et ceux de Hager et Sinniger (1985), les auteurs montrent, dans un premier temps que le rapport des hauteurs conjuguées varie pour la marche positive en fonction du nombre de Froude amont F_1 et de la hauteur adimensionnelle de la marche $S = s/h_1$. Dans un second temps, les auteurs montrent que trois thèmes sont abordés dans la comparaison globale des marches positives : la stabilité du ressaut, son efficacité et sa compacité.

Hager et Bretz (1987) montrent que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude F_1 . L'étude montre que l'efficacité relative minimale est donnée par le ressaut hydraulique type A est celle la plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique type B. L'étude expérimentale, a permis aux auteurs de conclure enfin que la marche positive offre une meilleure compacité, et la zone de dissipation est plus courte.

L'étude de Abdel -Azim M. Negm (2000) révèle que la cavitation est possible aux alentours de la marche négative tel que le coefficient de la force de pression est négatif au niveau des marches négatives sous l'effet d'un ressaut hydraulique. Pour les marches positives, ce coefficient est toujours positif et ainsi aucune cavitation n'est attendue dans les alentours de la marche positive dans les deux cas des ressauts type A et type B.

Chapitre VIII

APPROCHE THEORIQUE A L'ETUDE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DE TYPE A FORCE PAR MARCHE POSITIVE

VIII.1 Introduction

L'étude théorique du ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive évoluant dans un canal de section droite triangulaire, montre que le phénomène de ce type de ressaut est régi par trois paramètres que l'on peut exprimer sous la forme d'une relation fonctionnelle $f(F_1, Y, S) = 0$, où F_1 représente le nombre de Froude de l'écoulement incident dans la section du pied du ressaut, Y représente le rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 (h_1 et h_2 les hauteurs du ressaut respectivement à l'amont et à l'aval) et $S=s/h_1$ est la hauteur relative de la marche positive (s la hauteur absolue de la marche).

L'objectif principal de cette étude est d'établir d'une manière pratique la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, S) = 0$, en utilisant l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut. La relation établie devra faire l'objet d'une comparaison à celle obtenue pour le cas du ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal triangulaire en posant $S = 0$.

VIII.2 Equation de la quantité de mouvement

Nous avons montré dans l'étude bibliographique que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. Dans notre cas, il s'agit d'appliquer l'équation de la quantité de mouvement pour un ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive évoluant dans un canal de section droite triangulaire comme le montre la (Figure 8.1). La section transversale de la marche est donc de forme triangulaire caractérisée par sa hauteur s . La face latérale de la marche forme donc un obstacle constituant le siège d'une réaction opposée au sens de l'écoulement. Celle-ci résulte de la pression agissant sur la face latérale de la marche. Cette pression sera étudiée en tant qu'une pression agissant sur une surface plane verticale de forme géométrique triangulaire. La réaction créée par la présence de la marche donnera une force de pression F_s appliquée au centre de gravité. Cette force sera ajoutée aux forces extérieures assurant l'équilibre entre les sections amont et aval du ressaut lors de l'application de l'équation de la quantité de mouvement.

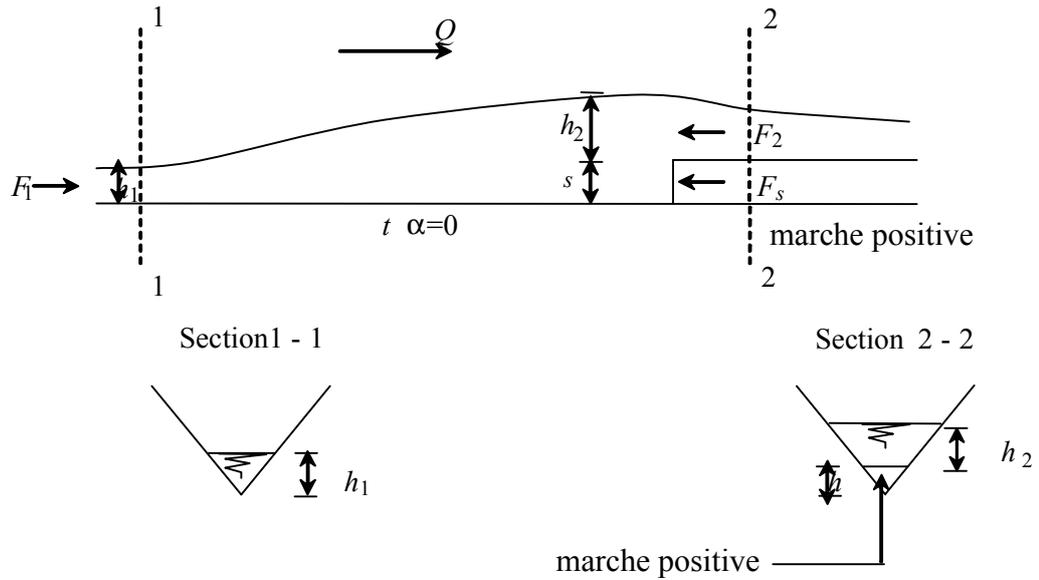


Figure 8.1 : Ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive dans un canal triangulaire.

L'équation de la quantité de mouvement sera appliquée en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- La distribution des pressions sur les sections amont et aval du ressaut est supposée hydrostatique ;
- La vitesse au niveau des deux sections du ressaut est supposée uniforme ;
- la résistance de l'aire est négligée ;
- les pertes de charges par frottement sont négligées.

Tenant compte de toutes ces considérations, l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre les sections 1-1 et 2-2 s'écrit :

$$\rho Q \overset{1}{V}_1 - \rho Q \overset{1}{V}_2 = \Sigma \overset{1}{F}_{ext} \quad (8.1)$$

$\Sigma \overset{1}{F}_{ext}$: représente la somme des forces extérieures. Ces forces sont :

- la force F_1 appliquée à la section 1-1.
- la force F_2 appliquée au dessus de la marche à la section 2-2.
- la réaction F_s engendrée par la présence de la marche à la section 2-2.

Par conséquent la relation (8.1) s'écrit :

$$\rho Q V_1 + F_1 = \rho Q V_2 + F_2 + F_s \quad (8.2)$$

Notons que le point d'application de chacune de ces forces coïncide avec le centre de gravité de la section considérée. La force F_1 est appliquée, d'après la figure 8.1, sur une section triangulaire, de même pour la force de réaction F_s ; tandis que, la force F_2 est appliquée sur

une section trapézoïdale, ceci est expliqué par la présence de la marche positive au dessous de l'écoulement à la section aval du ressaut où se trouve le point d'application de la force F_2 . Les forces de pression F_1 et F_2 ainsi que la force de réaction F_s peuvent être exprimées, en appliquant les lois de l'hydrostatique : $F_1 = \omega \bar{h}_1 A_1$, $F_2 = \omega \bar{h}_2 A_2$ et $F_s = \omega \bar{s} A_s$.

Où : ω représente le poids volumique du liquide en écoulement, \bar{h}_1 , \bar{h}_2 et \bar{s} représentent respectivement la distance entre le centre de gravité de la section transversale 1, 2 et s et la face supérieure de l'écoulement (surface libre de l'écoulement) et A_1, A_2 ou A_s est l'aire de la section mouillée 1, 2 ou s.

En remplaçant les expressions de F_1, F_2 et F_s dans la relation (8.2), on obtient :

$$\rho Q V_1 + \omega \bar{h}_1 A_1 = \rho Q V_2 + \omega \bar{h}_2 A_2 + \omega \bar{s} A_s \quad (8.3)$$

En faisant appel à l'équation de continuité, la vitesse moyenne de l'écoulement s'écrit, en fonction du débit volume Q et de l'aire de la section mouillée A : $V = Q/A$. Ainsi, les vitesses moyennes de l'écoulement V_1 et V_2 respectivement aux sections amont et aval du ressaut s'expriment : $V_1 = Q/A_1$ et $V_2 = Q/A_2$. En tenant compte de ces dernières considérations et sachant que $\omega = \rho g$, la relation (8.3) peut s'écrire, en divisant tous ses membres par ρg :

$$\frac{Q^2}{g A_1} + \bar{h}_1 A_1 = \frac{Q^2}{g A_2} + \bar{h}_2 A_2 + \bar{s} A_s \quad (8.4)$$

On peut déterminer aisément les expressions de $A_1, A_2, A_s, \bar{h}_1, \bar{h}_2$ et \bar{s} en se basant sur la figure 8.2.

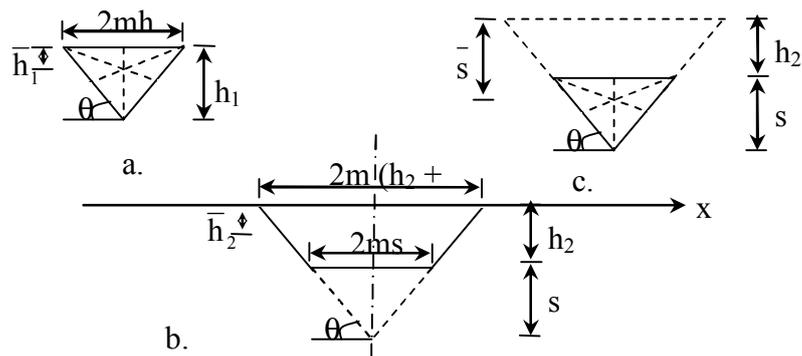


Figure 8.2 : Représentation géométrique des paramètres \bar{h}_1 , \bar{h}_2 et \bar{s} .

La figure 8.2.a montre la section au pied du ressaut. Cette section est caractérisée par sa première hauteur conjuguée h_1 et le paramètre m défini comme la cotangente de l'angle θ . L'angle θ représente l'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal. Ainsi, l'aire de la section mouillée A_1 et la distance \bar{h}_1 s'écrivent respectivement :

$$A_1 = mh_1^2 \quad (8.5)$$

$$\bar{h}_1 = \frac{1}{3}h_1 \quad (8.6)$$

La figure 8.2.b représente la section aval du ressaut de type A où la fin de son rouleau se trouve à l'extrémité amont de la marche positive. A l'aval du rouleau, le liquide franchit la marche par-dessus, donc le profil liquide en écoulement au dessus de la marche positive prendra une forme trapézoïdale. Cette section est caractérisée par sa grande base $2m(h_2 + s)$, sa petite base $2ms$ et sa hauteur h_2 . Par conséquent, l'aire de la section mouillée A_2 s'écrit :

$$A_2 = mh_2(h_2 + 2s) \quad (8.7)$$

Cependant, le centre de gravité de la section trapézoïdale peut être déterminé par application du principe des moments statiques.

Avant d'entamer la démarche pour la détermination de \bar{h}_2 par le principe des moments statiques, il faut énoncer que la section trapézoïdale de la figure 8.2.b résulte de différence entre le grand triangle et celui le plus petit de la marche positive. En se référant donc à la figure 8.2.b, la somme des moments statiques par rapports à l'axe x s'écrit :

$$\bar{h}_2 A_2 = \bar{h}'_2 A'_2 - \bar{s} A_s \Rightarrow \bar{h}_2 = \frac{\bar{h}'_2 A'_2 - \bar{s} A_s}{A_2} \quad (8.8)$$

Où : A_2 , définie par la relation (8.7), est l'aire de la section du liquide franchissant la marche positive (trapézoïdale) et \bar{h}_2 est la distance entre le centre de gravité de A_2 et l'axe x et s'exprime en vertu de la relation (8.8). A'_2 est l'aire du grand triangle délimité par la surface libre de l'écoulement et les parois du canal, cette section s'exprime par $A'_2 = m(h_2 + s)^2$ et \bar{h}'_2 représente la distance entre le centre de gravité de A'_2 et l'axe x (figure 8.2.b) et telle que : $\bar{h}'_2 = \frac{1}{3}(h_2 + s)$. A_s est l'aire de la face latérale de la marche positive, cette face a une forme triangulaire et s'exprime par $A_s = ms^2$. \bar{s} représente la distance entre le centre de gravité de A_s et l'axe x (figure 8.2.b) et s'exprime par: $\bar{s} = h_2 + \frac{s}{3}$.

En tenant compte de toutes ces considérations, la relation (8.8) s'écrit :

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2 \left(\frac{h_2}{3} + s \right)}{h_2 + 2s} \quad (8.9)$$

La relation (8.9) montre clairement que \bar{h}_2 s'exprime exclusivement en fonction de la deuxième hauteur conjuguée du ressaut h_2 et de la hauteur de la marche positive s .

La figure 8.2.c montre la géométrie de la face latérale de la marche positive, elle est de forme triangulaire. Cette face constitue le siège de la réaction de la pression, supposée hydrostatique, agissant sur la marche. Cette face est caractérisée par sa hauteur s et le paramètre m . L'aire de la section mouillée A_s et son centre de gravité \bar{s} par rapport à la surface libre de l'écoulement ont été définies lors de la détermination du paramètre \bar{h}_2 , leurs expressions s'écrivent respectivement :

$$A_s = ms^2 \quad (8.10)$$

$$\bar{s} = h_2 + \frac{s}{3} \quad (8.11)$$

Un autre paramètre qui servira de base à notre étude théorique est le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident à la section initiale 1-1, c'est-à-dire au pied du ressaut. Ce nombre s'exprime en règle générale par la relation 8.12 :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial h_1} \quad (8.12)$$

La relation (8.12) montre que le nombre de Froude F_1 est une fonction de quatre paramètres tels que :

- Q représente le débit volume de l'écoulement ;
- g est l'accélération de la pesanteur ;
- A_1 est l'aire de la section mouillée au pied du ressaut ;
- $\frac{\partial A_1}{\partial h_1}$ représente la dérivée partielle de l'aire de la section mouillée A_1 au pied du

ressaut par rapport à la première hauteur conjuguée h_1 . L'étude montre que cette dérivée représente la largeur du plan d'eau quelque soit la forme géométrique du profil liquide en écoulement.

Pour notre étude, il s'agit d'une section triangulaire et $\frac{\partial A_1}{\partial h_1} = 2mh_1$. Cette considération mène

à écrire la relation (8.13) telle que :

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{m^2gh_1^5} \quad (8.13)$$

En tenant compte des relations (8.5) à (8.7), (8.9) à (8.11) et (8.13), la relation (8.4) devient :

$$\frac{mh_1^3}{2} F_1^2 + \frac{1}{3} mh_1^3 = \frac{mh_1^5 F_1^2}{2h_2(h_2 + 2s)} + mh_2^2 \left(\frac{h_2}{3} + s \right) + ms^2 \left(h_2 + \frac{s}{3} \right) \quad (8.14)$$

En divisant les membres de la relation (8.14) par le terme $\frac{1}{3}mh_1^3$, on obtient :

$$\frac{3}{2}F_1^2 + 1 = \frac{3}{2} \frac{h_1^2 F_1^2}{h_2(h_2 + 2s)} + 3 \frac{h_2^2}{h_1^3} \left(\frac{h_2}{3} + s \right) + 3 \frac{s^2}{h_1^3} \left(h_2 + \frac{s}{3} \right) \quad (8.15)$$

L'application de l'équation de la quantité de mouvement entre deux sections délimitants un ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive et évoluant dans un canal de section droite triangulaire mène à écrire la relation (8.15) ; cette relation montre que ce type de ressaut est régi par :

- le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident à la section amont du ressaut ;
- les hauteurs conjuguées h_1 et h_2 respectivement à l'amont et à l'aval du ressaut ;
- la hauteur de la marche positive s .

VIII.3 Analyse dimensionnelle

L'utilisation de la relation (8.15) pour la détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive dans un canal triangulaire n'est pas pratique en raison, d'une part de son caractère implicite vis-à-vis de h_2 et s , d'autre part, et surtout, de son caractère dimensionnel. Pour cela, on préconise d'utiliser des rapports adimensionnels pour rendre la relation (8.15) plus générale. Le principe de l'analyse dimensionnelle devient plus clair et plus justifié lorsqu'il s'agit de déterminer les caractéristiques du ressaut hydraulique par voie expérimentale sur des modèles physiques réduits, où des rapports adimensionnels doivent être fournis pour pouvoir dimensionner les bassins d'amortissement. Pour la présente étude, ces rapports adimensionnels sont le rapport des hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$ et la hauteur relative ($S= s/h_1$) de la marche positive. Tenant compte de ces considérations, la relation (8.15) s'écrit :

$$F_1^2 = \frac{2}{3} \frac{Y(Y + 2S)}{Y(Y + 2S) - 1} [3YS(Y + S) + Y^3 + S^3 - 1] \quad (8.16)$$

La relation (8.16) exprime le nombre de Froude F_1 en fonction du rapport des hauteurs conjuguées Y et de la hauteur relative S de la marche positive pour le cas du ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive, évoluant dans un canal de section droite triangulaire. Connaissant le rapport S , cette relation est proposée pour l'évaluation du rapport Y et par conséquent la hauteur h_2 .

L'approche théorique proposée pour le cas du ressaut classique montre que le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident dépend exclusivement du rapport des hauteurs conjuguées Y en appliquant toujours l'équation de la quantité de mouvement.

En remplaçant $S = 0$ dans la relation (8.16), on obtient :

$$F_1^2 = \frac{2}{3} Y^2 \frac{(Y^2 + Y + 1)}{(Y + 1)} \quad (8.17)$$

La relation (8.16) mène donc à la relation (8.17) exprimant les caractéristiques du ressaut classique dans un canal triangulaire.

Ce résultat nous permet donc de valider notre démarche théorique. En outre, l'approche proposée sera confrontée, en suite aux résultats expérimentaux.

VIII.4 Effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique

La figure 8.3 montre la représentation graphique de la variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 sur un système d'axe à division cartésienne, selon la relation (8.16). Rappelons que $S = 0$ représente le cas du ressaut classique évoluant dans un canal triangulaire et la courbe correspondante est tracée selon la relation (8.17).

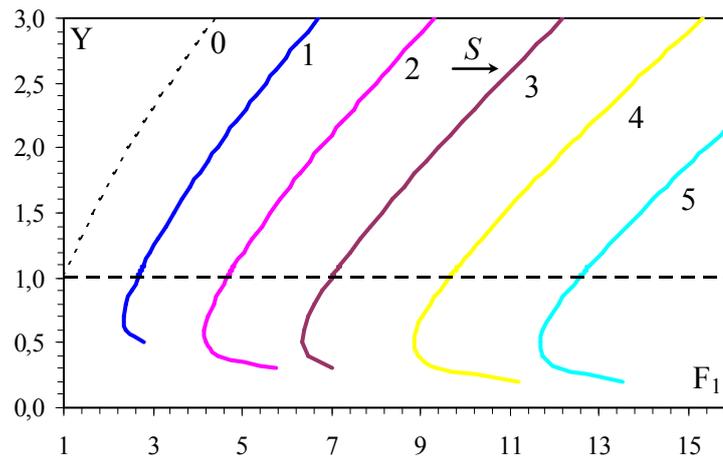


Figure 8.3 : Variation de Y en fonction de F_1 selon la relation (8.16) pour un ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive pour différentes S . (...) Courbe correspondant au ressaut classique dans un canal triangulaire ($S=0$), selon la relation (8.17). (- -) courbe limite d'apparition du ressaut.

Les courbes correspondant à $S = 1, 2, 3, 4$ et 5 sont tracées selon la relation (8.16) du ressaut hydraulique de type A, évoluant dans un canal triangulaire. La courbe en pointillé représente le ressaut hydraulique classique, évoluant dans un canal triangulaire.

La figure 8.3 indique clairement que plus la hauteur relative S de la marche positive augmente plus le rapport Y des hauteurs conjuguées diminue, pour un nombre de Froude F_1 fixe.

La figure 8.4 représente la distribution des points expérimentaux autour des courbes théoriques tracées selon la relation (8.16). On peut donc, remarquer que les points expérimentaux sont situés, dans leur majorité dans les intervalles théoriques des hauteurs relatives S des marches positives. Cependant, certains points expérimentaux se trouvent hors de ces intervalles théoriques. Ceci peut être attribué, en grande partie, à la justesse des hypothèses de départ, pour l'application de l'équation de quantité de mouvement.

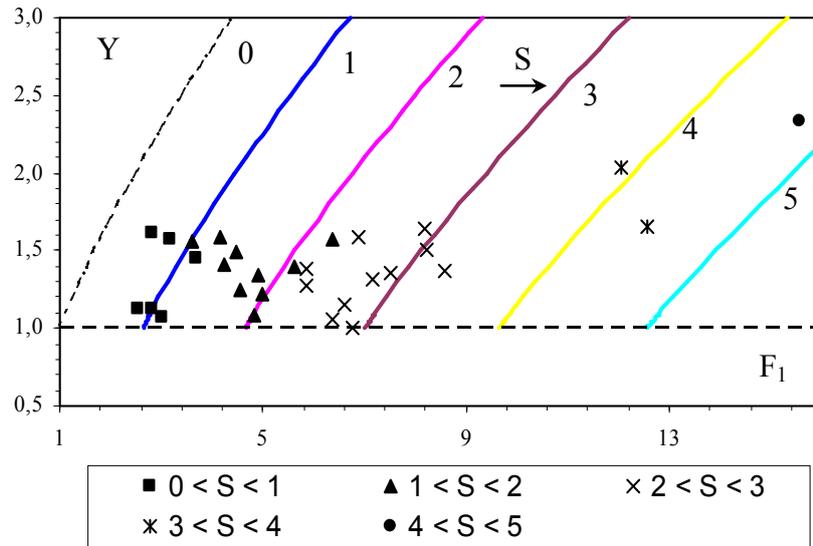


Figure 8.4 : Représentation des points expérimentaux sur les courbes théoriques Tracées selon la relation (8.16). (...) Courbe du ressaut classique dans un canal triangulaire ($S=0$), selon la relation (8.17). (- - -) Courbe limite d'apparition du ressaut ($Y>1$).

Notons que la relation (8.16) se présente sous une forme implicite vis-à-vis du rapport des hauteurs conjuguées Y et son application nécessite par conséquent l'utilisation d'un procédé itératif. Dans le paragraphe suivant nous tenterons de remplacer la relation (8.16) par une relation plus explicite, par le moyen d'un ajustement des courbes théoriques.

VIII.5 Ajustement de la relation théorique

L'analyse de la figure 8.4 montre, que les courbes situées au-dessus de la courbe limite sont relativement linéaires et peuvent être remplacées, par des droites sécantes comme le montre la figure 8.5.

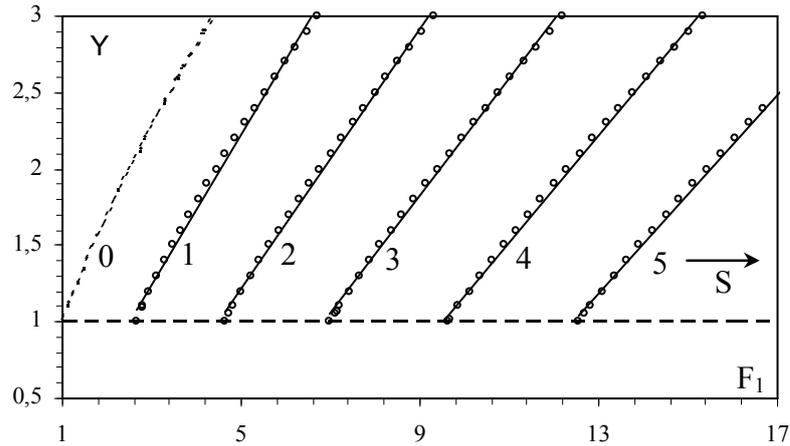


Figure 8.5 : Variation $Y = f(F_1)$. (ooo) courbe théorique selon la relation (8.16). (—) Droites d'ajustements.

Les droites représentées dans la figure (8.5) sont donc de type linéaire et suivent la forme suivante :

$$Y = a F_1 - b \quad (8.18)$$

Les paramètres a et b varient en fonction de la hauteur relative de la marche positive selon le tableau 8.1.

Tableau 8.1 : Valeurs des paramètres a et b de la relation (8.18)

S	a	b
1	0,50	0,28
2	0,44	0,99
3	0,39	1,7
4	0,36	2,4
5	0,33	3,11

La figure 8.6 montre la variation de a en fonction de la hauteur relative S de la marche.

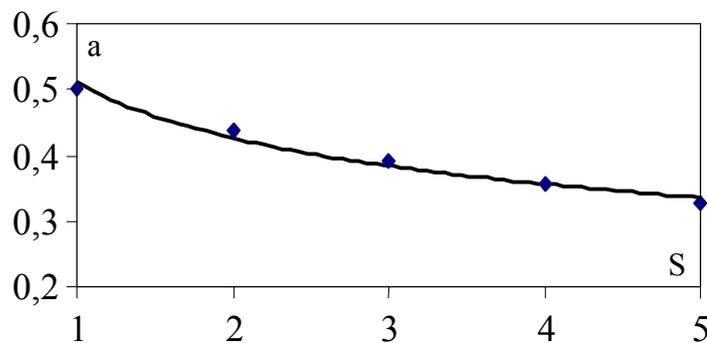


Figure 8.6 : Variation de 'a' en fonction de S selon le tableau 8.1.

La courbe tracée dans la figure 8.6 montre que la variation du paramètre a en fonction de S suit une loi puissance que l'on peut exprimer par la relation suivante :

$$a = \frac{0,51}{S^{0,26}} \quad , \quad R = 0,99 \quad (8.19)$$

Cette dernière relation présente une excellente approximation de la fonction $a = f(S)$.

La figure 8.7 montre à son tour la variation du paramètre b de la relation (8.18) en fonction de la hauteur relative S de la marche positive selon le tableau 8.1.

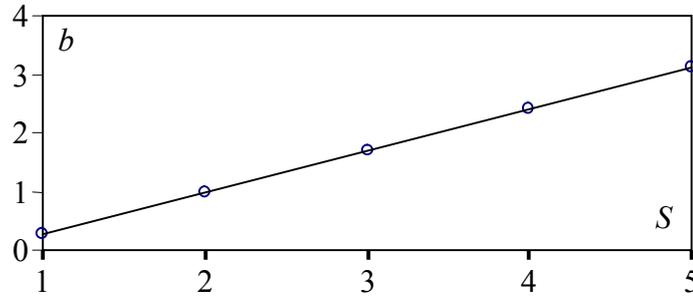


Figure 8.7 : Variation de ' b ' en fonction de S selon le tableau 8.1.

La figure 8.7 montre clairement que la variation de ' b ' en fonction de S suit parfaitement une loi linéaire selon la relation suivante :

$$b = 0,706S - 0,421 \quad , \quad R = 1 \quad (8.20)$$

Remplaçant les relations (8.19) et (8.20) dans la relation (8.18), on obtient :

$$Y = \frac{0,51}{S^{0,26}} F_1 - 0,706S + 0,421 \quad (8.21)$$

La relation explicite (8.21) nous fournit un moyen simple pour la détermination du rapport des hauteurs conjuguées Y tout en connaissant le nombre de Froude F_1 incident ainsi que la hauteur relative S de la marche positive. Cette relation est donc proposée en remplacement de la relation implicite (8.16). En plus, il est à noter que la relation (8.21) s'applique pour des nombres de Froude F_1 variant entre 2,66 et 18,7. Quant à la précision du calcul, la relation (8.21) occasionne des écarts relatifs, dans leur majorité, inférieurs à 5 % par rapport à la relation implicite (8.16), seul quelques valeurs de F_1 donnent des écarts relatifs $\Delta Y/Y$ compris entre 5 et 7 %. Le tableau 8.2 illustre ces constatations.

Tableau 8.2 : Ecart relatifs entre Y_t issu par la relation (8.16) et Y_{app} calculés par la relation approchée (8.21).

Y_t	S = 1			S = 2			S = 3		
	F_1	Y_{app}	$(Y_t - Y_{app})/Y_t$ (%)	F_1	Y_{app}	$(Y_t - Y_{app})/Y_t$ (%)	F_1	Y_{app}	$(Y_t - Y_{app})/Y_t$ (%)
1,01	2,66	1,07	6,13	4,67	1,00	1,01	7,02	1,00	1,46
1,05	2,72	1,10	4,87	4,74	1,03	1,93	7,10	1,03	2,23
1,1	2,79	1,14	3,56	4,83	1,07	2,87	7,23	1,07	3,03
1,2	2,95	1,22	1,63	5,02	1,15	4,26	7,42	1,15	4,18
1,3	3,12	1,30	0,35	5,22	1,23	5,14	7,65	1,24	4,90
1,4	3,29	1,39	0,47	5,42	1,32	5,68	7,88	1,33	5,32
1,5	3,47	1,46	0,97	5,64	1,41	5,96	8,12	1,42	5,52
1,6	3,66	1,58	1,22	5,85	1,50	6,06	8,37	1,51	5,56
1,7	3,85	1,68	1,28	6,06	1,60	6,02	8,62	1,67	5,48
1,8	4,04	1,78	1,20	6,30	1,69	5,87	8,87	1,70	5,32
1,9	4,25	1,88	1,01	6,53	1,79	5,64	9,13	1,80	5,08
2	4,45	1,99	0,72	6,77	1,89	5,34	9,39	1,90	4,80
2,1	4,66	2,09	0,37	7,01	1,96	5,00	9,66	2,01	4,47
2,2	4,87	2,20	0,05	7,25	2,10	4,61	9,93	2,11	4,11
2,3	5,09	2,31	0,51	7,48	2,20	4,19	10,20	2,21	3,72
2,4	5,31	2,42	1,02	7,75	2,31	3,74	10,48	2,32	3,32
2,5	5,54	2,54	1,55	8,00	2,42	3,27	10,76	2,43	2,89
2,6	5,76	2,66	2,12	8,26	2,53	2,76	11,04	2,53	2,46
2,7	5,99	2,77	2,70	8,52	2,64	2,28	11,32	2,65	2,01
2,8	6,23	2,89	3,31	8,78	2,75	1,77	11,61	2,76	1,55
2,9	6,47	3,01	3,93	9,05	2,86	1,25	11,91	2,87	1,09
3	6,71	3,14	4,57	9,32	2,98	0,72	12,20	2,98	0,62

Tableau 8.2 (Suite et fin): Ecarts relatifs entre Y_t déterminés par la relation (8.16) et Y_{app} calculés par la relation approchée (8.21)

Y_t	S = 4			S = 5		
	F_1	Y_{app}	$(Y_t - Y_{app})/Y_t$ (%)	F_1	Y_{app}	$(Y_t - Y_{app})/Y_t$ (%)
1,01	9,67	1,04	2,69			
1,05	9,76	1,07	1,87			
1,1	9,87	1,11	1,03			
1,2	10,12	1,20	0,22	13,07	1,28	6,82
1,3	10,37	1,29	1,04	13,35	1,37	5,66
1,4	10,62	1,38	1,56	13,63	1,47	4,85
1,5	10,89	1,47	1,85	13,92	1,56	4,29
1,6	11,16	1,57	1,99	14,21	1,66	3,91
1,7	11,43	1,67	2,01	14,51	1,76	3,68
1,8	11,71	1,77	1,93	14,81	1,86	3,55
1,9	12,00	1,87	1,79	15,11	1,97	3,51
2	12,28	1,97	1,59	15,42	2,07	3,54
2,1	12,57	2,07	1,35	15,74	2,18	3,63
2,2	12,87	2,18	1,07	16,06	2,28	3,76
2,3	13,17	2,28	0,77	16,38	2,39	3,92
2,4	13,47	2,39	0,44	16,70	2,50	4,11
2,5	13,77	2,50	0,10	17,03	2,61	4,33
2,6	14,08	2,61	0,26	17,35	2,72	4,57
2,7	14,39	2,72	0,63	17,69	2,83	4,83
2,8	14,70	2,83	1,01	18,02	2,94	5,10
2,9	15,02	2,94	1,39	18,36	3,06	5,38
3	15,33	3,05	1,78	18,70	3,17	5,67

VIII.6 Validation de l'approche théorique

Ce sous chapitre s'intéresse à la validation de notre approche théorique en utilisant les résultats expérimentaux. Ceci peut être rendu possible par la comparaison des nombres de Froude F_1 théoriques déterminés par la relation théorique (8.16) d'une part, et ceux expérimentaux déterminés par la relation universelle (8.13). Ainsi, pour pouvoir conclure à la validité et à la fiabilité de la relation générale proposée (8.16), la condition suivante doit être satisfaite :

$$F_{1thé} = F_{1exp} \quad (8.22)$$

Tel que $F_{1thé}$ désigne le nombre de Froude théorique calculé par la relation (8.16) et F_{1exp} désigne le nombre de Froude expérimental calculé par la relation universelle (8.13). Rappelons que ces deux relations s'écrivent respectivement :

$$F_{1\text{thé}}^2 = \frac{2}{3} \frac{Y(Y+2S)}{Y(Y+2S)-1} [3YS(Y+S) + Y^3 + S^3 - 1] \quad (8.16)$$

$$F_{1\text{exp}}^2 = \frac{2Q^2}{m^2 gh_1^5} \quad (8.13)$$

VIII.6.1 Calcul d'erreurs

Les essais expérimentaux sont toujours entachés d'erreurs de mesures. Ces erreurs sont occasionnées par l'incertitude des appareils utilisés et également de l'incertitude de la lecture de l'utilisateur de ces appareils. Pour tenir compte de ces considérations, un calcul d'erreur est donc nécessaire. L'erreur relative commise sur l'évaluation du nombre de Froude expérimental $F_{1\text{exp}}$ sera désignée par : $\Delta F_{1\text{exp}}/F_{1\text{exp}}$.

VIII.6.1.1 Erreurs relatives commises sur la mesure des débits

Les débits volume Q sont déterminés par la relation suivante :

$$Q = 0,3794 \sqrt{2gB\beta} (1 + 0,1649 \beta^{2,0716})^{3/2} h^{3/2}, \quad \beta = \frac{b}{B} < 0,45 \quad (7.1)$$

Les termes figurants dans cette relation sont définis dans le chapitre VII de l'étude expérimentale. Cette relation, comme nous l'avons déjà indiqué auparavant, est issue de l'étude d'un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale réalisé et testé au laboratoire LARHYSS par Hachemi Rachedi L. (2006). La relation (7.1) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$Q = a h^{3/2} \quad (8.23)$$

$$a = 0,3794 \sqrt{2gB\beta} (1 + 0,1649 \beta^{2,0716})^{3/2} \quad (8.24)$$

Selon le théorème des erreurs relatives, l'erreur relative commise sur la mesure des débits $\Delta Q/Q$ s'écrit :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{3}{2} \frac{\Delta h}{h} \quad (8.25)$$

Les parois du déversoir sont réalisées en fixant dans un canal rectangulaire deux plaques minces. Les dimensions de ces plaques sont déterminées avec une précision suffisante à l'aide d'une règle graduée ; ceci nous a permis de minimiser les erreurs au maximum sur l'évaluation des paramètres b et B , pour les considérées comme négligeables. Quant à la hauteur déversante h , nous avons enregistré des fluctuations plus ou moins importantes sur la surface libre de l'écoulement franchissant le déversoir, ce qui a rendu difficile l'évaluation de la hauteur déversante h surtout pour les faibles débits Q . On a estimé alors l'erreur absolue

commise sur la mesure de h de l'ordre de 1 à 2 mm. Par conséquent, l'erreur relative commise sur la mesure du débit ne sera fonction que de celle commise sur la mesure de la hauteur déversante. La relation (8.26) s'écrit alors :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{3}{2} \frac{\Delta h}{h} \quad (8.26)$$

VIII.6.1.2 Erreurs relatives commises sur la mesure de m

Le paramètre m étant la cotangente de l'angle θ d'inclinaison de la paroi du canal triangulaire par rapport à l'horizontal. La figure 8.8 montre les caractéristiques géométriques permettant le calcul de ce paramètre.

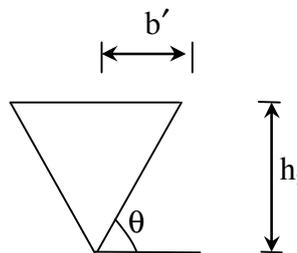


Figure 8.8 : Détermination du paramètre $m = \cotg \theta$.

m s'exprime, d'après la figure 8.8 comme suit :

$$m = \cotg \theta = \frac{b'}{h_i} \quad (8.27)$$

En s'appuyant sur la relation (8.27) et en vertu du théorème des erreurs relatives, l'erreur relative $\Delta m/m$ commise sur la mesure de m s'écrit :

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta b'}{b'} + \frac{\Delta h_i}{h_i} \quad (8.28)$$

La relation (8.28) montre que l'erreur relative commise sur la mesure de m est fonction des erreurs relatives commises sur la mesure des paramètres géométriques b' et h_i . Or ces deux derniers paramètres géométriques ont été mesurés avec soin et leurs erreurs absolues sont insignifiantes. Pour cela les erreurs relatives commises sur ce paramètre ont été négligées.

VIII.6.1.3 Erreurs relatives commises sur la mesure de la hauteur initiale h_i du ressaut

La hauteur initiale h_i du ressaut a été considérée comme la hauteur de l'ouverture du convergent. Or, nous avons constaté lors du déroulement des essais que le pied du ressaut ne se trouve pas juste à l'ouverture du convergent, mais il se trouve à une distance de 5 à 10 cm

de l'ouverture du convergent. Ce qui nous a conduit à admettre une erreur absolue $\Delta h_1 = 1$ mm sur h_1 .

VIII.6.1.4 Erreurs relatives commises sur le calcul du nombre de Froude

En s'appuyant sur la relation universelle (8.13) et en vertu du théorème des erreurs relatives, l'erreur relative commise sur le calcul du nombre de Froude expérimental s'écrit :

$$\frac{\Delta F_{1\text{exp}}}{F_{1\text{exp}}} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{5}{2} \frac{\Delta h_1}{h_1} \quad (8.29)$$

En remplaçant la relation (8.26) dans la relation (8.29) et en négligeant le paramètre $\Delta m/m$, pour les raisons citées plus haut, on obtient :

$$\frac{\Delta F_{1\text{exp}}}{F_{1\text{exp}}} = \frac{1}{2} \left(3 \frac{\Delta h}{h} + 5 \frac{\Delta h_1}{h_1} \right) \quad (8.30)$$

Ainsi, il apparaît donc que l'erreur relative commise sur l'évaluation expérimentale du nombre de Froude $F_{1\text{exp}}$ est fonction de deux paramètres ainsi que leurs erreurs absolues. Ces paramètres sont la hauteur initiale du ressaut h_1 et la hauteur déversante h de l'écoulement franchissant le déversoir.

Les hauteurs h_1 utilisées dans les mesures sont 2,5 ; 3,4 ; 4 ; 4,4 et 5 cm. Donc, les erreurs relatives commises sur h_1 sont respectivement : $\Delta h_1/h_1 = 4 ; 2,94 ; 2,5 ; 2,27$ et 2 %. Les erreurs relatives commises sur la mesure de la hauteur h sont représentées dans le tableau 8.3.

Le tableau 8.3 montre les valeurs des erreurs relatives commises sur le calcul des nombres de Froude $F_{1\text{exp}}$ pour chaque hauteur initiale h_1 et ainsi que pour chaque hauteur déversante h . Ce tableau indique que l'erreur relative commise sur $F_{1\text{exp}}$ est telle que :

$$8,52 \% < \Delta F_{1\text{exp}}/F_{1\text{exp}} < 16,88 \%$$

Tableau 8.3 : Valeurs de l'erreur relative $\Delta F_{1exp}/F_{1exp}$ en (%)

h_1 (cm)	$\Delta h_1/h_1$ (%)	h (cm)	$\Delta h/h$ (%)	$\Delta F_{1exp}/F_{1exp}$ (%)	h_1 (cm)	$\Delta h_1/h_1$ (%)	h (cm)	$\Delta h/h$ (%)	$\Delta F_{1exp}/F_{1exp}$ (%)
5	2	4,13	4,85	12,27	4	2,5	4,84	4,13	12,44
5	2	4,43	4,51	11,77	4,4	2,27	5,83	3,43	10,83
4,4	2,27	3,59	5,57	14,03	5	2	7,21	2,77	9,16
5	2	4,62	4,33	11,49	4	2,5	5,25	3,81	11,97
5	2	4,73	4,23	11,35	5	2	7,64	2,62	8,93
4,4	2,27	3,86	5,18	13,46	5	2	7,83	2,55	8,83
5	2	5,12	3,91	10,86	5	2	7,92	2,52	8,79
4,4	2,27	4,21	4,75	12,80	4	2,5	5,53	3,62	11,68
4	2,5	3,64	5,49	14,49	4,4	2,27	6,65	3,01	10,19
5	2	5,32	3,76	10,63	5	2	8,51	2,35	8,52
4,4	2,27	4,63	4,32	12,16	4,4	2,27	7,28	2,75	9,80
4	2,5	4,02	4,98	13,72	4	2,5	6,23	3,21	11,06
4	2,5	4,15	4,82	13,49	4	2,5	6,42	3,12	10,92
4,4	2,27	4,94	4,05	11,75	4	2,5	8,04	2,49	9,98
5	2	6,35	3,15	9,73	3,4	2,94	6,31	3,17	12,10
4	2,5	4,42	4,52	13,03	2,5	4	4,36	4,59	16,88
4,4	2,27	5,25	3,81	11,40					

Le tableau 8.4 représenté ci-dessous montre que la gamme des nombres de Froude incident expérimentale est suffisamment large tel que $2,53 < F_{1exp} < 15,58$.

Tableau 8.4 : Valeurs de F_{1exp} (relation 8.13) et les erreurs relatives commises sur F_{1exp} en (%) (relation 8.30).

F_{1exp}	2,53	2,82	2,83	3,01	3,11	3,16	3,5	3,60	3,67	3,72	4,15
$\Delta F_{1exp}/F_{1exp}$ (%)	12,27	11,77	14,03	11,49	11,35	13,46	10,86	12,80	14,49	10,64	12,16
F_{1exp}	4,26	4,46	4,57	4,84	4,91	5,00	5,63	5,86	5,86	6,35	6,39
$\Delta F_{1exp}/F_{1exp}$ (%)	13,72	13,49	11,75	9,73	13,03	11,40	12,44	10,83	9,16	11,97	8,93
F_{1exp}	6,62	6,75	6,87	7,14	7,51	8,16	8,22	8,60	12,04	12,59	15,58
$\Delta F_{1exp}/F_{1exp}$ (%)	8,83	8,79	11,68	10,19	8,524	9,80	11,06	10,92	9,98	12,10	16,88

VIII.7 Comparaison du nombre de Froude expérimental et celui théorique

VIII.7.1 Ecart relatif entre le nombre de Froude expérimental et théorique

Les écarts relatifs entre les nombres de Froude expérimental F_{1exp} et les nombres de Froude théorique $F_{1thé}$ sont calculés afin d'examiner la validité de la relation théorique générale (8.16) issue de notre développement théorique. Les valeurs de F_{1exp} sont calculées par la relation (8.13) en se basant sur les données expérimentales. Les valeurs de $F_{1thé}$ sont calculées par la relation (8.16) en se basant sur ces mêmes données expérimentales qui ont été déjà exposés dans l'étude expérimentale.

Tableau 8.5 : Valeurs de Y et S expérimentales ayant servi de base au calcul de $F_{1thé}$ théorique selon la relation (8.16).

Y	1,12	1,12	1,62	1,07	0,98	1,57	0,9	1,56	1,46	0,92	1,59
S	0,76	0,88	0,86	0,98	1,24	1	1,5	1,11	0,95	1,6	1,41
$F_{1thé}$	2,38	2,6	3,42	2,71	3,06	3,6	3,45	3,82	3,292	3,69	4,49
Y	1,41	1,5	1,25	1,08	1,34	1,22	1,4	1,39	1,28	1,57	1,06
S	1,1	1,23	1,7	1,8	1,55	1,82	1,88	2,05	2,1	2	2,32
$F_{1thé}$	3,51	3,92	4,47	4,36	4,31	4,66	5,13	5,5	5,40	5,79	5,48
Y	1,15	1	1,59	1,32	1,35	1,64	1,5	1,38	2,03	1,65	2,34
S	2,46	2,7	2,25	2,39	2,8	2,64	2,63	2,9	3,5	3,41	4,64
$F_{1thé}$	5,99	6,27	6,44	6,16	7,26	7,52	7,16	7,57	10,89	9,62	15,31

Le tableau 8.5 montre les données expérimentales ayant servi de base au calcul du nombre de Froude théorique $F_{1thé}$ en se basant sur la relation (8.16). Ces données expérimentales sont : le rapport des hauteurs conjuguées Y et la hauteur relative S des marches positives.

Tableau 8.6 : écarts relatifs en (%) entre F_{1exp} expérimental et $F_{1thé}$ théorique.

F_{1exp}	2,54	2,82	2,83	3,01	3,11	3,16	3,50	3,60	3,67
$F_{1thé}$	2,38	2,60	3,42	2,71	3,06	3,60	3,45	3,82	3,29
$(F_{1exp}-F_{1thé})/F_{1exp}(\%)$	6,02	7,89	20,64	9,89	1,63	14,14	1,35	6,00	10,29
F_{1exp}	3,72	4,15	4,26	4,46	4,57	4,84	4,91	5,00	5,63
$F_{1thé}$	3,69	4,49	3,511	3,93	4,47	4,37	4,31	4,66	5,13
$(F_{1exp}-F_{1thé})/F_{1exp}(\%)$	0,64	8,16	17,49	12,01	2,17	9,77	12,32	6,80	8,86
F_{1exp}	5,86	5,86	6,35	6,39	6,62	6,75	6,87	7,14	7,51
$F_{1thé}$	5,50	5,40	5,79	5,48	5,99	6,27	6,44	6,16	7,26
$(F_{1exp}-F_{1thé})/F_{1exp}(\%)$	6,04	7,88	8,84	14,18	9,57	7,10	6,28	13,81	3,32
F_{1exp}	8,18	8,22	8,60	12,04	12,59	15,58			
$F_{1thé}$	7,52	7,16	7,57	10,89	9,62	15,31			
$(F_{1exp}-F_{1thé})/F_{1exp}(\%)$	8,02	12,93	11,97	9,55	23,56	1,70			

D'après les résultats regroupés dans le tableau 8.6, on remarque que certains écarts relatifs entre les valeurs théoriques et expérimentales du nombre de Froude sont assez élevés. Ces écarts peuvent paraître excessifs, mais compte tenu des erreurs relatives regroupées au tableau 8.3, occasionnées lors des mesures expérimentales et du degré de conformité des hypothèses d'application de l'équation de la quantité de mouvement, les écarts relatifs sur le nombre de Froude F_1 nous semblent tout à fait justifiés. On peut donc conclure à la validité de la relation théorique (8.16) proposée. Cependant, celle-ci ne serait fiable que si elle est corrigée par les mesures expérimentales.

VIII.7.2 Correction de la relation théorique par les mesures expérimentales

La figure 8.9 représente graphiquement la variation des nombres de Froude expérimental F_{1exp} en fonction de ceux théorique $F_{1thé}$, en vertu des données du tableau 8.6. Cette figure dénote un léger décalage du nuage de points par rapport à la première bissectrice au fur et à mesure que le nombre de Froude incident augmente. Ceci a été justifié au sous titre précédent. En effet, ce décalage est attribué en grande partie à l'hypothèse de départ dans laquelle on a supposé que la répartition des pressions est hydrostatique.

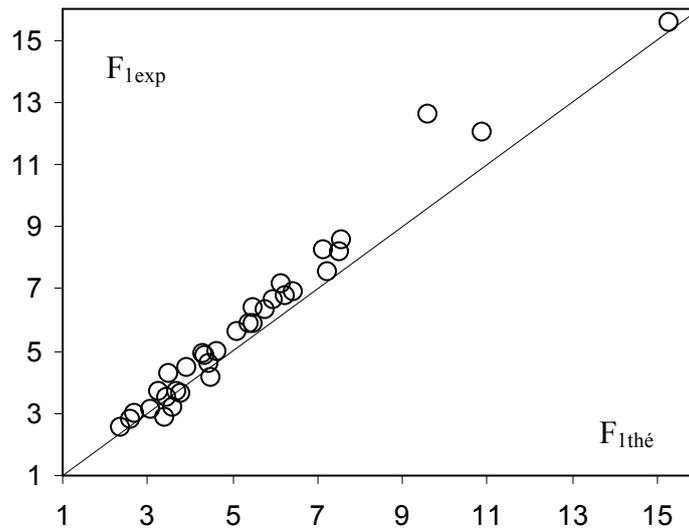


Figure 8.9 : Représentation graphique des nombres de Froude expérimental (F_{1exp}) et théorique ($F_{1thé}$). (—) Première bissectrice.

Pour palier à cet écart, nous proposons un ajustement de la relation théorique par la méthode des moindres carrés linéaires, en se basant sur les résultats expérimentaux.

La figure 8.10, montre un ajustement du nuage de points liant le nombre de Froude expérimental et celui théorique. La relation obtenue est une droite passant par l'origine de pente égale à 1,082 :

$$F_{1exp} = 1,082 F_{1thé} \quad (8.31)$$

La relation théorique (8.16) devient alors après correction :

$$F_1^2 = 0,78 \frac{Y(Y + 2S)}{Y(Y + 2S) - 1} [3YS(Y + S) + Y^3 + S^3 - 1] \quad (8.32)$$

La relation (8.21) devient à son tour comme suit :

$$Y = \frac{0,474}{S^{0,26}} F_1 - 0,706S + 0,421 \quad (8.33)$$

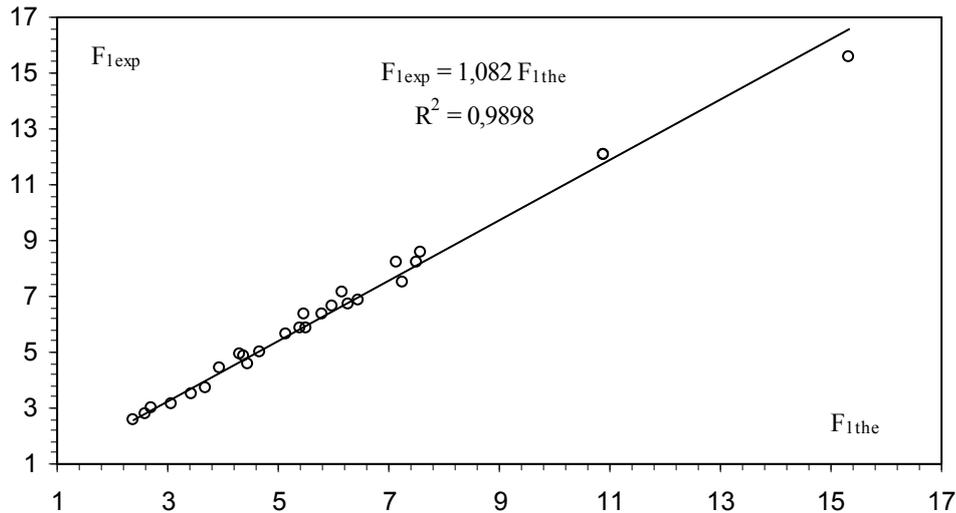


Figure 8.10 : Correction du nombre de Froude théorique par les données expérimentales.

VIII.8 Conclusion

Nous avons exposé dans cette partie de l'étude un développement théorique visant à exprimer d'une manière pratique la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, S) = 0$ pour le ressaut hydraulique de type A forcé par marche positive évoluant dans un canal de section droite triangulaire. Cette approche a mené à établir une relation théorique. Ceci a été rendu possible par l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections aval et amont du ressaut hydraulique.

Notons que la relation obtenue (8.16) a pour but d'évaluer le rapport des hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$ tout en connaissant le nombre de Froude F_1 et la hauteur relative S de la marche positive. Connaissant Y , on peut déterminer la hauteur h_2 à l'amont du ressaut puisque la hauteur du pied du ressaut h_1 est toujours connue. Pour $S = 0$, la relation (8.16) conduit à la relation (8.17) du ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal triangulaire. Cette dernière considération confirme en quelque sorte la validité du développement théorique entrepris. Analytiquement, la relation générale (8.16) se présente sous une forme implicite vis à vis du rapport Y des hauteurs conjuguées et son application nécessite par conséquent l'utilisation d'un procédé itératif. Cette considération nous a conduit à proposer de remplacer la relation (8.16) par une relation explicite (8.21) permettant la détermination aisée du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de la hauteur relative S de la marche positive.

L'approche théorique proposée a fait l'objet d'une étude comparative avec les résultats expérimentaux obtenus sur un modèle réduit physique. En se basant sur le théorème des erreurs relatives, cette étude comparative avait pour but donc de valider l'approche théorique

proposée. Le calcul d'erreur a eu pour objectif la détermination des erreurs relatives commises sur la mesure du nombre de Froude expérimental $F_{1\text{exp}}$. Le calcul d'erreur sur $F_{1\text{exp}}$ a fait, en suite, l'objet d'une étude comparative avec les écarts relatifs entre les valeurs du nombre de Froude expérimental, déterminées par application de la relation (8.13), et les valeurs du nombre de Froude théorique, déterminées par application de la relation générale (8.16). Un léger décalage a été alors perçu. La relation (8.16) est devenue plus fiable lorsqu'elle a été corrigée par les mesures expérimentales, pour former la relation (8.32). Cette même correction a été appliquée également à la relation (8.21) pour aboutir enfin à l'expression (8.33).

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

La deuxième partie de notre étude, a examiné par voie expérimentale le ressaut hydraulique contrôlé et le ressaut de type A forcé par marche positive évoluant dans un canal horizontal, de section droite triangulaire symétrique, d'angle d'ouverture de 90° .

Deux chapitres ont été nécessaires :

- Le premier chapitre a été consacré à la description du modèle expérimental, qui a servi de base à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique. Nous avons abordé également dans ce chapitre, l'appareillage utilisé pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique, moyennant des schémas et des photographies.

- Le second chapitre a été consacré à l'analyse expérimentale des deux types de ressaut étudiés. Nous avons abordé dans ce chapitre en premier lieu, la description des essais, nous avons entamé par la suite la procédure suivie lors des expérimentations. Cette partie nous a permis enfin d'étudier expérimentalement les caractéristiques des deux types de ressaut hydraulique cités précédemment. L'étude a montré que la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type logarithmique. Par ailleurs, une étude comparative avec le ressaut contrôlé par seuil mince et épais a montré que l'influence de la marche positive sur le rapport des hauteurs conjuguées apparaît à partir des valeurs du nombre de Froude F_1 supérieures à 5,0 environ. Cette influence s'accroît avec l'augmentation de F_1 . Cependant les courbes des ressauts contrôlé par seuil épais et par marche positive sont quasi-confondus pour pratiquement toute la gamme des nombres de Froude. Par ailleurs, un décalage important est perceptible pour le ressaut de type A forcé par marche positive. En outre, pour un nombre de Froude $F_1=9$, l'écart relatif $\Delta Y/Y$ entre le ressaut contrôlé par marche et son homologue de type A est approximativement égal à 10 %.

L'étude a entamé en second lieu, la variation de la hauteur relative du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les quatre configurations de ressaut, à savoir : le ressaut contrôlé par seuil mince, le ressaut contrôlé par seuil épais, le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut de type A forcé par marche positive. Un décalage assez important est visible entre les courbes des ressauts contrôlés par seuil et leur homologues contrôlé et forcé par marche positive. En effet, l'étude a montré que pour le même nombre de Froude incident F_1 , la formation d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil nécessite une hauteur relative de seuil plus élevée que son homologue utilisant une marche positive. L'écart relative $\Delta S/S$ peut atteindre les 20 % pour un nombre de Froude $F_1=9$.

En outre, les courbes des ressauts forcé de type A et contrôlé par marche positive sont quasi-confondues pour toute la gamme des nombres de Froude. Par ailleurs, un ajustement des valeurs expérimentales a montré que la variation de la hauteur relative S du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude F_1 est de type logarithmique pour les quatre configurations étudiées.

L'étude expérimentale a été consacré par la suite à la variation de la longueur relative $X = x/h_1$ du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les quatre configurations étudiées. Il ressort que pour les nombres de Froude supérieurs à 9, le ressaut contrôlé et le ressaut de type A forcé par marche positive évolue dans un bassin plus court que sont homologue contrôlé par seuil. Par ailleurs, l'ajustement des valeurs expérimentales, par la méthode des moindres carrés non linéaire, a montré qu'une relation puissance liant les caractéristiques F_1 , X et S est possible pour représenter les quatres confugurations de ressaut étudiées.

L'étude a évalué enfin, la variation du rendement η en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, pour trois types de ressaut hydarulique : le ressaut contrôlé par seuil épais, le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut de type A forcé par marche positive. L'analyse a montré que pour une gamme pratique des nombres de Froude incidents, les points de mesure du ressaut de type A forcé par marche positive se présentent au-dessus de ceux contrôlé par marche positive et par seuil épais, l'effet de dissipation de la charge hydraulique est le même pour les trois configurations de ressaut.

Cependant, le décalage n'étant pas significatif, on peut dire que le rendement est indépendant de S .

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

La première partie de notre étude a eu pour objectif de passer en revue l'état des connaissances des principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques ayant trait à notre étude.

A travers cinq chapitres, on a essayé de présenter une synthèse bibliographique plus ou moins exhaustive, sur le ressaut hydraulique dans deux types de profils de canaux prismatiques, à savoir : le canal triangulaire, et le canal rectangulaire.

Le premier chapitre a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique, dont nous avons examiné en première position les caractéristiques : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau.

Nous avons 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 Belanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut.

Le second chapitre de cette partie bibliographique, a permis d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire. Nous nous sommes intéressées principalement aux travaux de Hager et Wanoschek (1987) ; ces études ont concerné le ressaut "triangulaire" classique évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° .

Nous avons mis l'accent sur la démarche expérimentale assez particulière de Hager et Wanoschek (1987) qui extrapolent 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 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 $\Lambda = [\nu m h_1 / (2Q)]^{1/4}$, où ν est la viscosité cinématique du liquide, m la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal, h_1 la hauteur initiale du ressaut et Q le débit volume. Lorsque $\Lambda=0$, aucun effet

des frottements n'est observé et l'équation de la 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.

Le troisième chapitre a été consacré au travail de Debabeche (2003) relatif à l'étude expérimentale du ressaut, contrôlé par un seuil dénuyé à paroi mince et épaisse, dans un canal de section droite triangulaire à 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 h_1 et à débits volumes Q variables ; chaque série de mesures est cependant 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 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 les deux types de seuil considérés.

A travers le quatrième chapitre, nous avons présenté, le travail de Debabeche et Achour (2006) qui a été consacré à l'étude expérimentale de l'influence du seuil sur le ressaut hydraulique dans un canal de section droite triangulaire à angle d'ouverture de 90° . Une loi de type logarithmique est proposée pour évaluer le rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les trois types de ressaut. En outre, la représentation graphique des mesures expérimentales montre que $(Y-1)$ augmente au fur et à mesure que la hauteur relative S du seuil croît, suivant une courbe unique linéaire de pente 0,96 pour le cas du ressaut contrôlé par seuil mince, de pente 1,02 pour le cas du ressaut contrôlé par seuil épais et la pente est de 0,82 pour le ressaut forcé par seuil mince. L'interdépendance des paramètres adimensionnels S et F_1 est alors mise en évidence.

Par ailleurs, une relation de type puissance, liant la hauteur relative S du seuil, le nombre de Froude F_1 et la longueur relative X du bassin a été trouvée pour les trois types de ressaut

étudiés. La représentation graphique montre que pour le même nombre de Froude incident les points de mesures du ressaut contrôlé par seuil mince et épais sont presque confondus. En outre un décalage important est observé pour le cas du ressaut forcé. En effet, pour des nombres de Froude incidents supérieurs à 4, la longueur relative du bassin du ressaut forcé est inférieure à celle du ressaut contrôlé. D'une manière générale, le ressaut forcé par seuil mince est plus avantageux par une hauteur aval moindre et un bassin plus court.

Le cinquième et dernier chapitre de notre étude bibliographique a été consacré aux principaux travaux entrepris dans le domaine de ressaut hydraulique contrôlé par marche positive dans un canal de section rectangulaire. Nous avons abordé dans cette étude, les travaux de Forster et Skrinde (1950) et ceux de Hager et Sinniger (1985). L'étude montre, dans un premier temps que le rapport des hauteurs conjuguées varie pour la marche positive en fonction du nombre de Froude amont F_1 et de la hauteur adimensionnelle de la marche $S = s/h_1$. Dans un second temps, l'étude montre à travers les travaux de Hager et Bretz (1987) que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude F_1 . L'étude montre que l'efficacité relative minimale est donnée par le ressaut hydraulique type A est celle la plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique type B. L'étude expérimentale, a permis aux auteurs de conclure enfin que la marche positive offre une meilleure compacité, et la zone de dissipation est plus courte.

Abdel -Azim M. Negm (2000) a proposé une approche semi-théorique pour la détection de l'existence de la cavitation à proximité des marches sous l'effet d'un ressaut hydraulique. A travers cette étude, l'auteur a montré que la cavitation est possible aux alentours de la marche négative, tel que le coefficient de la force de pression est négatif au niveau des marches négatives sous l'effet d'un ressaut hydraulique. Pour les marches positives, ce coefficient est toujours positif et ainsi aucune cavitation n'est attendue dans les alentours de la marche positive dans les deux cas des ressauts type A et type B.

Résumé

L'étude proposée a pour but d'analyser théoriquement et expérimentalement le ressaut hydraulique contrôlé et le ressaut de type A forcé par marche positive en canal triangulaire.

Trois grandes parties ont été nécessaires : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine, une seconde partie à caractère expérimental qui a permis de trouver avec de bonnes corrélations des relations empiriques montrant, entre autres, l'effet de la marche sur les caractéristiques de ce type de ressaut. Une troisième et dernière partie, à travers laquelle nous avons tenté de développer une équation théorique, en introduisant l'effet de la marche.

Abstract

The proposed study has for objective to analyze theoretically and experimentally the controlled and A-forced hydraulic jump by positive step evolving in a triangular shaped channel.

Three big parts were necessary: a first bibliographical part through which we reviewed current works held in this domain. A second part with an experimental character, which allowed to find with good correlations empirical relations showing, among others, the effect of the step in the characteristics of this type of jump. A third and last part, through which we tried to develop a theoretical equation, by introducing the effect of the step.

ملخص

تهدف هذه الدراسة المقترحة إلى إجراء التحليل النظري و التجريبي للقفزة المائية المراقبة والمجبرة ذات النوع أ بالعتبة الموجبة داخل قناة مفتوحة مثلثية الشكل: يختص القسم الأول بالأبحاث المتعلقة بالأعمال المنجزة في هذا المجال، أما القسم الثاني ذو طابع تجريبي الذي سمح لنا إيجاد علاقات تجريبية جيدة و كذا أثر العتبة الطويلة الموجبة على خصائص القفزة المائية و في القسم الثالث و الأخير قمنا بمحاولة لإيجاد علاقة نظرية المتضمنة لمدى تأثير هذه العتبة الموجبة.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Première partie

ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE

INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE	1
---	---

Chapitre I

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

I.1. Introduction	2
I.2. Ressaut hydraulique classique	3
I.2.1. Forme du ressaut classique	3
I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	4
I.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut	5
I.2.3.1. Longueur du rouleau	5
I.2.3.2. Longueur du ressaut	7
I.2.4. Rendement du ressaut	7
I.3. Conclusion	9

Chapitre II

RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRIANGULAIRE

II.1. Introduction	10
II.2. Ressaut hydraulique classique	10
II.2.1. Approche de Hager et Wanoschek	10
II.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées	11
II.2.1.2. Équation de la quantité de mouvement	13
II.2.1.3. Longueur caractéristique du ressaut	15
II.2.1.4. Profil de surface généralisé du ressaut	16
II.3. Conclusion	18

Chapitre III

RESSAUT CONTROLE PAR UN SEUIL A PAROI MINCE

III.1. Introduction	19
III.2. Approche de Achour et Debabeche (2003)	19
III.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	19
III.2.2. Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude.....	20
III.2.3. Relation générale régissant le contrôle du ressaut	21
III.3 Conclusion	22

Chapitre IV

INFLUENCE DU SEUIL SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRIANGULAIRE

IV.1. Introduction	23
IV.2. Approche de Debabeche et Achour (2006)	23
IV.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	23
IV.2.2. Hauteur relative du seuil	26
IV.2.3. Longueur relative du bassin	26
IV.3. Conclusion	28

Chapitre V

RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR MARCHE POSITIVE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

V.1. Introduction	29
V.2. Etude de Forster et Skrinde (1950)	29
V.3. Travaux de Hager et Sinniger (1985).....	30
V.4. Travaux de Hager et Bretz (1987)	33
V.5 Détection de la cavitation sur marche dans les bassins amortisseurs à forte pente sous l'effet d'un ressaut hydraulique.....	35
V.6. Conclusion	36
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE	37

Deuxième Partie

ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL DE SECTION DROITE TRIANGULAIRE CONTROLE ET FORCE PAR MARCHE POSITIVE

INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE	40
---	----

Chapitre VI

DESCRIPTION DU MODÈLE

VI.1. Introduction	41
VI.2. Description du canal	41
VI.3. Débitmètre à diaphragme	44
VI.4. Limnimètre	45
VI.5. Les marches positives	46
VI.6. Conclusion	46

Chapitre VII

ETUDE EXPERIMENTALE

VII.1. Introduction	47
VII.2. Description des essais	47
VII.2.1. Position du problème	47
VII.2.2. Procédé d'étalonnage du diaphragme	47
VII.2.3. Procédure expérimentale	50
VII.3. Résultats expérimentaux	53
VII.3.1. Ressaut hydraulique contrôlé	53
VII.3.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	53
VII.3.1.2. Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de Froude	55
VII.3.1.3. Relation générale régissant le contrôle du ressaut	56
VII.3.2. Ressaut de type A	57
VII.3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	57
VII.3.2.2. Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de Froude	58
VII.3.2.3. Position relative de la marche positive	60
VII.3.2.4. Longueur relative du bassin	62
VII.3.3. Étude comparative	63
VII.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	63
VII.3.3.2. Hauteur relative du seuil et de la marche positive.....	65
VII.3.3.3. Longueur relative du bassin	66
VII.3.3.4. Rendement du ressaut hydraulique	66
VII.4. Conclusion	70

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE	72
<u>Troisième Partie</u>	
ETUDE THEORIQUE	
<u>Chapitre VIII</u>	
APPROCHE THEORIQUE A L'ETUDE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DE TYPE A FORCE PAR MARCHE POSITIVE	
VIII.1. Introduction	74
VIII.2. Equation de la quantité de mouvement	74
VIII.3. Analyse dimensionnelle	79
VIII.4. Effet de la marche sur le ressaut hydraulique	80
VIII.5. Ajustement de la relation théorique	81
VIII.6. Validation de l'approche théorique	85
VIII.6.1. Calcul d'erreurs	86
VIII.6.1.1 Erreurs relatives commises sur la mesure des débits	86
VIII.6.1.2 Erreurs relatives commises sur la mesure de m	87
VIII.6.1.3 Erreurs relatives commises sur la mesure de la hauteur initiale h_1 du ressaut	87
VIII.6.1.4 Erreurs relatives commises sur le calcul du nombre de Froude	88
VIII.7. Comparaison du nombre de Froude expérimental et celui théorique	89
VIII.7.1 Ecart relatifs entre le nombre de Froude expérimental et théorique	89
VIII.7.2 Correction de la relation théorique par les mesures expérimentales	91
VIII.8. Conclusion	92
CONCLUSION GENERALE	94
LISTE DES FIGURES	100
PRINCIPALES NOTATIONS	104
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	106

N° d'ordre :
Série :

Département d'Hydraulique



Laboratoire LARHYSS

MEMOIRE DE MAGISTER EN HYDRAULIQUE

Option : Sciences Hydrauliques

Présenté par :

Mr MANSRI Naïm

Ingénieur d'Etat en Hydraulique

THEME

**RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE
PAR MARCHE POSITIVE DANS
UN CANAL TRIANGULAIRE**

Soutenu le :/...../2006

Devant le jury :

Président :	Bachir ACHOUR	Professeur	Université de Biskra
Examineur :	Boualem REMINI	Professeur	Université de Blida
Examineur :	Noureddine MOUMMI	Maître de conférences	Université de Biskra
Examineur :	Abdelhafid MOUMMI	Docteur, MACC	Université de Biskra
Rapporteur :	Mahmoud DEBABECHE	Maître de conférences	Université de Biskra