



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Hydraulique  
Ouvrages hydrauliques

Réf. : OH 09

---

Présenté et soutenu par :  
**MEZIANI MAHMOUD**

Le : samedi 23 juin 2018

## **Etude expérimentale de L'effet de la compacité sur le profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique**

---

### **Jury :**

MC.	OUAMAN AHMED	MCA	Université de Biskra	Président
Pr.	DEBABECHE MAHMOUD	MAA	Université de Biskra	Examineur
Mme.	CHERHABIL SONIA	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2017 – 2018

# SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE</b>	
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	
<b>PREMIERE PARTIE:</b>	
<b>ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	

INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE	01
CHAPITRE I :	--
RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE	--
I.1. Introduction	03
I.2. Définition	04
I.3. Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut	05
I.4. Ressaut hydraulique dans un canal horizontal ou ressaut hydraulique classique	07
I.2.2. types du ressaut classique	08
I.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut	09
I.2.3.1 Longueur du rouleau	09
I.2.3.2. Longueur du ressaut	10
I.2.4.. Rendement du ressaut	11
I .4.8. Profil de surface	13
I.5. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire	15
I.5.1. Approche de Forster et Skrinde (1950)	15
I.5.1.1. Seuil continu à paroi mince	15
I.5.1.2. Seuil continu à paroi épaisse	17
I.6. Conclusion	18

CHAPITRE II	
RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOÏDAL	
II.1. Introduction	19
II.1.1. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal symétrique	19
II .2. Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal	20

II.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées	20
II.2.1.1. Cas particulier du canal rectangulaire	21
II.2.1.2. Cas particulier du canal triangulaire	22
II.2.3.1. Cas particulier du canal rectangulaire	24

**DEUXIEME PARTIE:**

II.2.3.2. Cas du canal triangulaire	25
II.1.2. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal asymétrique	27
II.1. 2.1.Approche d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954	27
II.1. 2...2Analyse de la section totale	
II.1. 2.3. Analyse de la bande longitudinale	
II.1. 2.4.Discussion des resultats	
II.1. 2.5.Conclusion	
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>ETUDE DE LA COMPACITE DU RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE</b>	
III.1. Introduction	38
III.2. Hauteur relative du seuil	38
III.3. Rapport des hauteurs conjuguées	39
III.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées pour $\gamma \leq 0,9$	39
III.3.2. Rapport des hauteurs conjuguées pour $\gamma > 0,9$	39
III.4. Conclusion	40
<b>CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE</b>	

<b>ETUDE EXPERIMENTALE</b>	
INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE	42
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>DESCRIPTION DU MODELE EXPERIMENTAL</b>	
I.1. Introduction	42
I.2. Description du canal	42
I.4. Appareillages de mesure	46
I.4.1 Débitmètre à Diaphragme	46
I.4.2. Limnimètre	47
I.4.4. Conclusion	48
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>ETUDE EXPERIMENTALE</b>	
II.1. Introduction	49
II.2. Description des essais	50
II.2.1. Variation de la longueur relative $L_r^*/h_1$ du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F	52
II.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut cote peut profond a	53
II.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut cote peut profond b	59
<b>CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE</b>	<b>60</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	

# INTRODUCTION GENERALE

## INTRODUCTION GENERALE

Les ouvrages de retenue, tels que les barrages hydrauliques, sont souvent soumis à de fortes crues. En périodes de crues, la retenue étant pleine, l'eau est restituée à travers un évacuateur de crue vers la rivière. Le lit de la rivière se trouve alors confronté à un écoulement torrentiel à forte énergie cinétique. Celle-ci engendre des forces tractrices néfastes par leur torrentiel à forte énergie cinétique. Celle-ci engendre des forces tractrices néfastes par leur caractère érosif. Afin d'éviter d'importantes modifications du lit de la rivière situé à l'aval du barrage, il est nécessaire de dissiper cette énergie. Le moyen le moins onéreux et le plus pratique est certainement le ressaut hydraulique. Le principe consiste à transformer l'écoulement torrentiel en un écoulement fluvial engendrant une diminution des forces tractrices.

Du point de vue pratique, ce sont surtout les dimensions géométriques du bassin de dissipation qui intéressent l'ingénieur hydraulicien. Ces dimensions sont étroitement liées aux caractéristiques du ressaut et à la forme géométrique du canal dans le quel il évolue.

Après 300 années (1818), l'italien Bidon a donné la mesure et la description du phénomène du ressaut hydraulique sous base des études expérimentales. Plus tard, Bélanger (1928) présente une expression mathématique pour calculer les rapports conjugués appliqué au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Plus tard, Bakhmeteff et Matzake (1936) ont effectué des expériences sur les pentes très faibles et ont proposé les dimensions du profil de surface extérieur. En (1938) Posey et Hsing ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal. Dans le même ordre, Moore (en 1957) a étudié la formation du ressaut à la base des chutes d'eau.

Ces dernières années le ressaut hydraulique a fait l'objet de plusieurs recherches fondamentales et appliquées. 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, la pente du canal, la rugosité du fond,... etc.) peut conduire à différentes configurations du ressaut.

L'étude des paramètres hydrauliques du ressaut, tels que, le rapport des profondeurs conjuguées, la perte d'énergie ainsi que la longueur du ressaut, a attiré l'attention de divers chercheurs. En effet, plusieurs auteurs ont abordé la question du ressaut hydraulique dans différents profils géométriques. Nous pouvons citer, entre autres, Hager et Sinniger (1990), Hager et Bretz (1987), Rajaratnam (1964, 1965, 1967 et 2002), Rajaratnam et Murahari (1971), Rajaratnam N, Subramania K (1967) et Rand (1957 et 1965) qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal. En outre, Hager et Wanoschek (1987), Achour et Debabeche (2003) et Debabeche et Achour (2007) ont étudié le ressaut hydraulique triangulaire horizontal. Debabeche et Al (2009) qui ont étudié la modification des conditions à l'amont (débit, hauteurs,... etc.) et à l'aval (la pente du canal, sa hauteur, sa position...ect.) peut conduire à différentes configurations du ressaut. Les travaux d'Achour, Debabeche,

Khattaoui et Bedjaoui (2002) ont concerné le ressaut dans une galerie circulaire brusquement élargie.

Notre présent mémoire comporte deux grandes parties.

La première partie est une revue bibliographique divisée en trois chapitres.

Le premier chapitre consiste à passer en revue les principaux travaux effectués sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire

Le deuxième chapitre sera consacré aux travaux effectués par Silvester (1964), Wanoschek et Hager (1989), sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique, ainsi que l'approche présentée par Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954 sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique

Le troisième chapitre consacré à l'effet de la compacité sur le rapport des hauteurs conjuguées. Nous exposerons les travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique (compacité du ressaut), à savoir, ceux de Debabeche (2003)...

La deuxième partie de notre mémoire consiste à exposer notre travail expérimental qui sera suivi par une discussion des résultats obtenus (L'étude sera abordée d'une manière expérimentale).

Première Partie:

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### I.2.1. Introduction

Le ressaut hydraulique est défini comme étant 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.

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  $Y^*$  des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude  $F_1$ . L'équation de la quantité de mouvement est généralement appliquée en admettant que les pertes de charges autres que celles dues au ressaut sont négligeables ; ces pertes de charge sont notamment les pertes par frottement se produisant sur les parois et le fond du canal.

Des études récentes de *Hager et Bremen* (1989) ont cependant montré que, sous certaines conditions de l'écoulement incident, l'effet des frottements ne peut être négligé et le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut est alors inférieur à  $Y^*$  issu du développement théorique.

L'analyse des résultats expérimentaux a pu établir que le rapport  $Y/Y^*$  dépend non seulement du nombre de Froude incident mais aussi du nombre de Reynolds.

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 de paramètres de l'écoulement tels que les débits et contribuent enfin à une meilleure compacité du bassin.

# Chapitre I

## RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

# Chapitre I

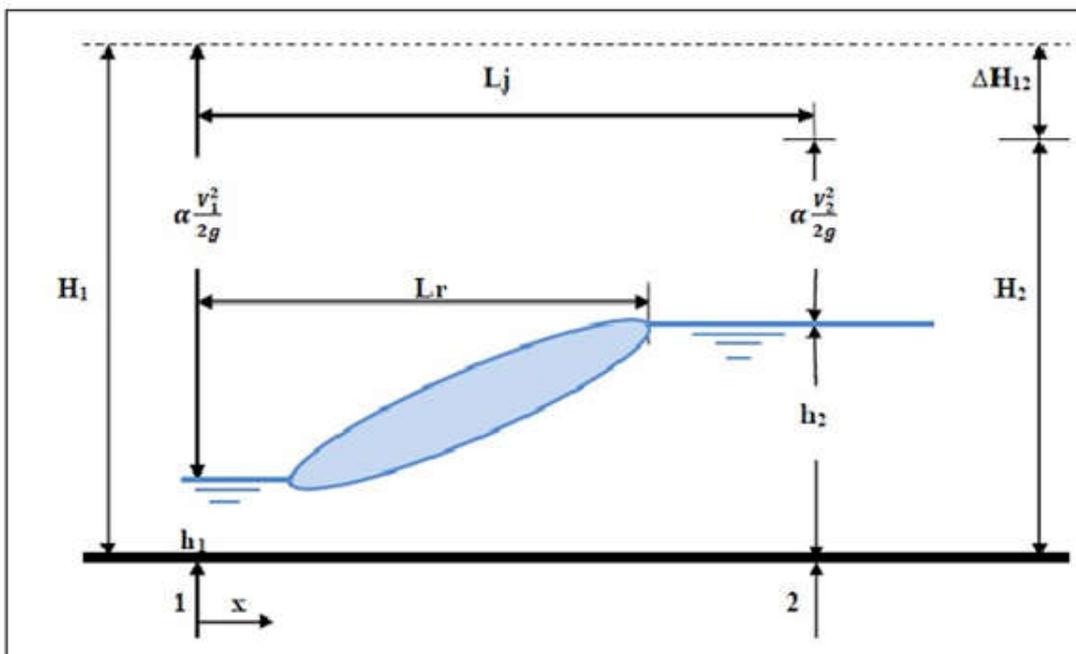
## Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

### I.1. Introduction

Le ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire a été pendant plusieurs années le profil le plus souvent utilisé dans la pratique. La facilité de la mise en œuvre de ce profil a encouragé les chercheurs à intensifier les recherches expérimentales qui ont conduit sans aucun doute à une meilleure compréhension du phénomène, tant du point de vue de sa structure interne que de son comportement externe.

### I.2. Définition

Le ressaut hydraulique est une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement Permanent, qui se produit lors du passage du régime torrentiel au régime fluvial. Il est Accompagné d'une agitation marquée et de grandes pertes d'énergie.



*Figure 1.1: Ressaut Hydraulique*

Les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  sont appelées profondeurs conjuguée du ressaut. La distance  $L_j$  entre la Section 1 et 2 est appelée longueur du ressaut et la distance  $L_r$  appelée longueur du rouleau. La perte

De charge est représentée par  $\Delta H_{12}$ .

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge

Qu'il occasionne entre ces sections initiales et finales à la charge totale dans sa section initiale.

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un coefficient cinétique (ou nombre de Froude  $F_1 > 1$ ) et représente la relation entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de Propagation des petites perturbations.

### I.3. Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut

On ne peut pas appliquer le théorème de Bernoulli entre les sections 1 et 2 pour déterminer les profondeurs conjuguées du ressaut, étant donné que le terme  $\Delta H_{12}$ , qui représente la perte de charge, n'est pas connu et que les formules du régime uniforme ne sont pas applicables. C'est le théorème d'Euler qui permet de résoudre ce problème.

Considérons un ressaut classique évoluant entre la section initiale et finale respectivement 1 et 2 (figure 1.2).

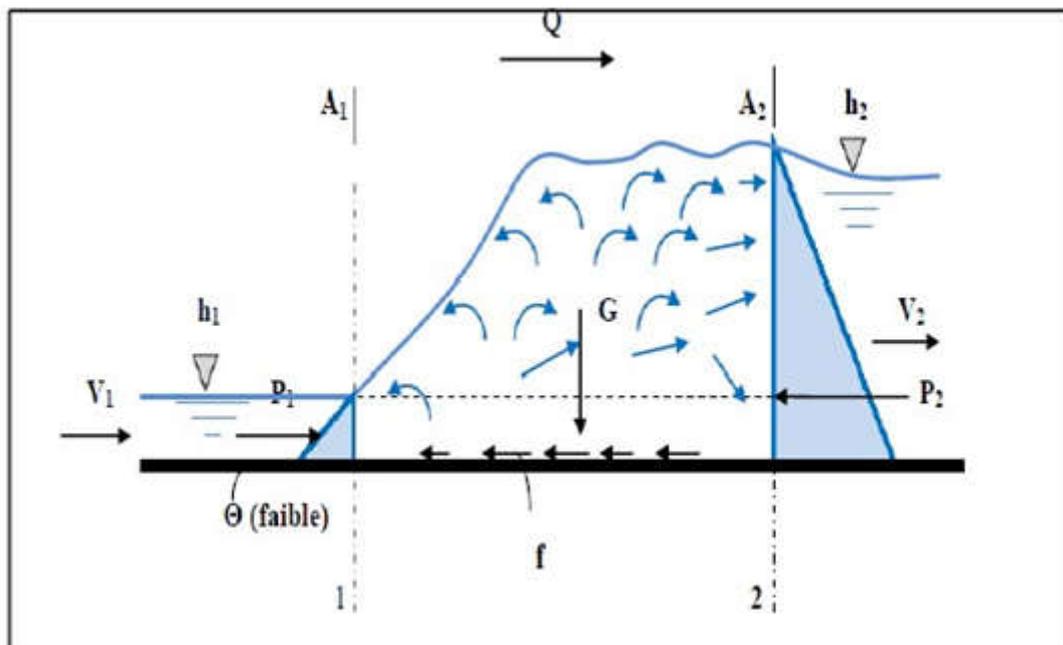


Figure 1.2 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut

L'équation de continuité permet d'écrire :

$$V_1 = Q/A_1$$

Où, Q est le débit volume et A1 l'aire de la section mouillée initiale qui s'exprime par.

$$A_1 = b \cdot h_1$$

5

**b** étant la largeur du canal rectangulaire.

Comme nous l'avons déjà dit le ressaut est régi par l'équation de la quantité 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.

En outre, en raison du fait que le ressaut évolue dans un canal de pente nulle, la composante tangentielle du poids propre de la masse liquide considérée n'est également nulle.

Ainsi, les forces extérieures appliquées à la masse liquide en mouvement se résument aux forces de pressions hydrostatiques  $F_1$  et  $F_2$  s'exerçant sur les sections 1 et 2. Ces forces s'écrivent :

$$F_1 = \varpi \bar{h}_1 A_1 \quad (1.3)$$

$$F_2 = \varpi \bar{h}_2^* A_2 \quad (1.4)$$

$\varpi$  Désigne le poids spécifique du liquide,  $\bar{h}_1$  et  $\bar{h}_2^*$  sont respectivement la position du centre de gravité des sections  $A_1$  et  $A_2$  par rapport à la surface libre de l'écoulement dans ces sections. On peut ainsi écrire que  $\bar{h}_1 = h_1/2$  et  $\bar{h}_2^* = h_2^*/2$ .

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

$$\varpi b h_1^2/2 + \rho Q v_1 = \varpi b h_2^{*2}/2 + \rho Q v_2^* \quad (1.5)$$

où  $\varpi = \rho \cdot g$ ,  $\rho$  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 :

$$IF_1^2 = Q^2 / (gb^2h_1^3) \quad (1.6)$$

La relation (1.5) conduit à écrire :

$$Y^* = h_2^*/h_1 = 0,5 [(1+8 IF_1^2)^{1/2} - 1] \quad (1.7)$$

La relation (1.7) est connue sous le nom d'équation de *Belanger* (1828), et permet d'évaluer le rapport  $Y^*$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude  $IF_1$ . *Hager et Sinniger* (1985), proposent une relation approchée applicable pour les nombres de Froude  $IF_1 > 3$ .

$$Y^* = h_2^*/h_1 = \sqrt{2} IF_1 - 1/2 \quad (1.8)$$

La relation (1.8) montre ainsi que  $Y^*$  et  $IF_1$  sont linéairement dépendants. Les relations (1.7) et (1.8) sont représentées graphiquement dans le système d'axes à coordonnées cartésiennes de la figure 1.2.

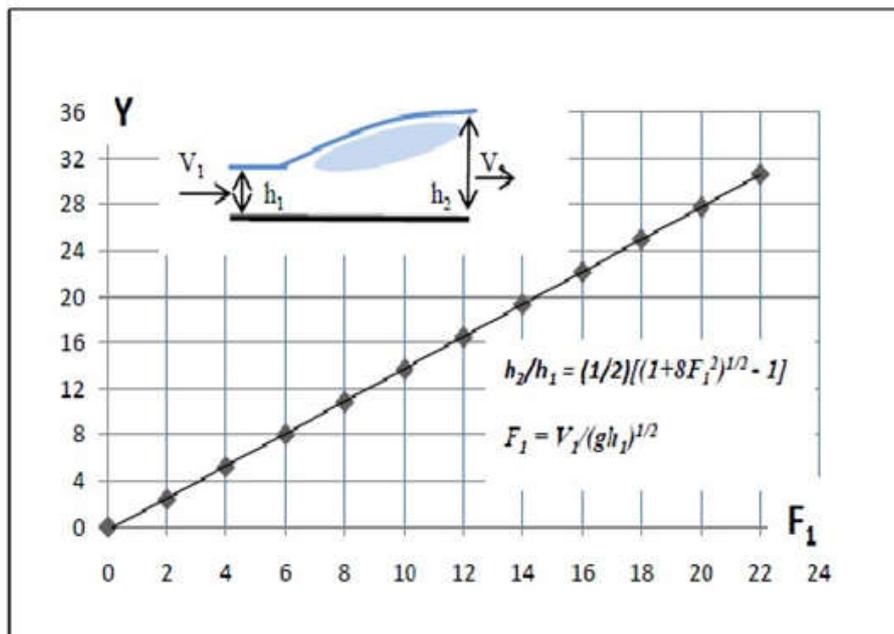


Figure 1.3 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828)

#### I.4. Ressaut hydraulique dans un canal horizontal ou ressaut hydraulique classique

Beaucoup de recherches ont été menées sur le ressaut hydraulique classique et qui concernent notamment la détermination de ses caractéristiques, de son profil de surface ainsi

que sa capacité de dissipation.

7

### **I.2.2. Formes du ressaut classique**

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

**1- Le pré ressaut** obtenu pour la gamme  $1,7 < \mathbf{IF}_1 < 2,5$  .La surface du ressaut est composé d'une série de petits rouleaux pour  $\mathbf{IF}_1 = 1,7$ , ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude  $\mathbf{IF}_1$  augmente la répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible.

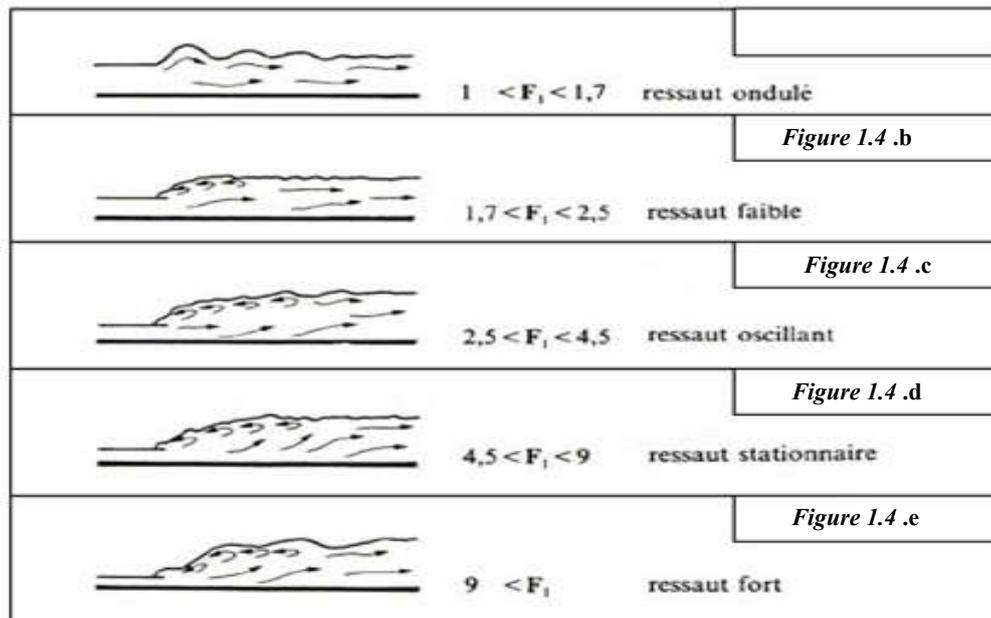
**2- Le ressaut de transition** : obtenu pour la gamme  $2,5 < \mathbf{IF}_1 < 4,5$  Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

**3- Le ressaut stable** : obtenu pour la gamme  $4,5 < \mathbf{IF}_1 < 9$  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 agité ou clapoteux** : obtenu pour  $\mathbf{IF}_1 > 9$ . Le jet entrant dans La section initiale du ressaut est caractérisée 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 1.4 .a*



**Figure 1.4** : Types de ressauts hydrauliques plans pour divers

### I.2.3 Les longueurs caractéristiques du ressaut

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

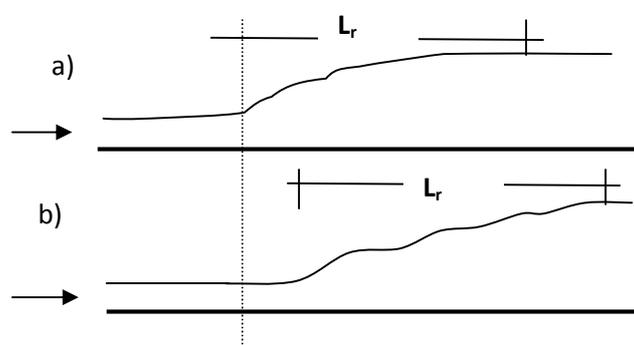
#### I.2.3.1. Longueur du rouleau :

*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 1.4 montre deux types de ressaut et les longueurs  $L_r$  qui leur correspondent.

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.



**Figure 1.5 : Aspect du ressaut classique**  
a) rouleau développé. b) rouleau non développé

Les essais effectués par *Hager et al.* (1990), montrent que le rapport  $\lambda_r^* = L_r/h_1$  dépend du nombre de Froude  $IF_1$  et du rapport d'aspect  $w=h_1/b$ . Les auteurs proposent les relations suivantes :

$$\lambda_r^* = -12 + 160Tgh(IF_1/20) \quad \text{pour } w = h_1 / b < 0,1 \quad (1.9)$$

$$\lambda_r^* = -12 + 100Tgh(IF_1/12,5) \quad \text{pour } 0,1 < w < 0 \quad (1.10)$$

" Tgh " désigne la tangente hyperbolique.

Les auteurs notent que pour  $IF_1 < 8$  les relations (1.9) et (1.10) peuvent être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

$$\lambda_r^* = L_r^* / h_1 = 8(IF_1 - 1,5) \quad 2,5 < IF_1 < 8 \quad (1.11)$$

### 1.2.3.2. Longueur du ressaut

La seconde longueur caractéristique du ressaut est la longueur  $L_j^*$  sur laquelle il s'étend. Comme la longueur du rouleau,  $L_r^*$  n'a 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 dans la section à l'aval du ressaut où :

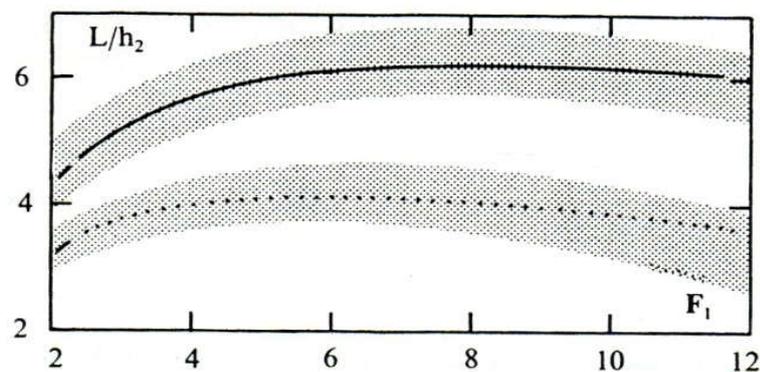
1. La surface libre est pratiquement horizontale.
2. La surface de turbulence du rouleau est faible.
3. Les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.
4. L'écoulement graduellement varié apparaît à l'extrémité aval du rouleau.

Toutes ces définitions ont pour but d'indiquer la limite aval du ressaut au-delà de laquelle la protection ou le renforcement du bassin amortisseur n'est plus nécessaire; en effet, cette limite définit la zone où l'écoulement est franchement fluvial caractérisé par de faibles vitesses et des forces tractrices sans conséquences. Dans la pratique, on s'accorde à dire que la longueur  $L_j^*$  correspondant à la distance du bassin amortisseur nécessitant une protection contre les affouillements.

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

$$L_j^*/h_1 = 220Tgh [(IF_1-1)/22] \quad (1.12)$$

La variation de la longueur relative  $L_j^*/h_2^*$  en fonction du nombre de Froude  $IF_1$ . La figure (1.5) indique, suivant les essais de *Bradley et Peterka* (1957), que  $L_j^*/h_2^*$  prend une valeur moyenne égale à 6 pour la gamme pratique  $4 < IF_1 < 12$ . Ce résultat est encore admis de nos jours.  $L_j^*/h_2^* = 6$

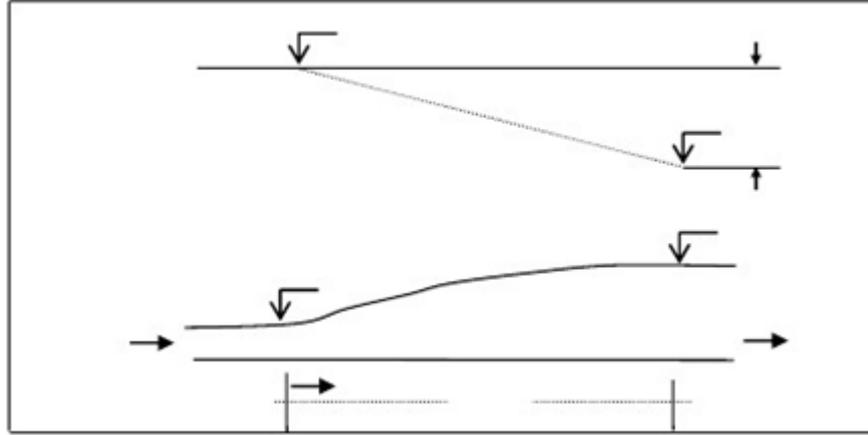


**Figure 1.6** : longueur relative  $L_j^*/h_2^*$  en fonction du nombre de

Froude  $IF_1$

#### I.2.4. rendement du ressaut

La figure 1.6 montre la ligne de charge totale le long de la longueur  $L_j$  sur laquelle s'étend le ressaut classique.



**Figure 1.7 :** (---) 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 :

$$H_1 = h_1 + \alpha_1 \cdot v_1^2 / (2 \cdot g) \quad (1.13)$$

Tandis que la charge totale dans la section finale est :

$$H_2^* = h_2^* + \alpha_2 \cdot v_2^{*2} / (2 \cdot g) \quad (1.14)$$

$\alpha$  désigne le facteur de correction de l'énergie cinétique dont on admet que la valeur est égale à l'unité.

La perte de charge  $\Delta H^*$  due au ressaut est la différence des charges totales initiale et finale :

$$\Delta H^* = H_1 - H_2^* \quad (1.15)$$

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

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2^* \cdot A_2^* \quad (1.16)$$

où  $A_1 = b \cdot h_1$  et  $A_2^* = b \cdot h_2^*$ . En tenant compte des relations (1.13), (1.14) et (1.15), (1.16) s'écrit :

$$\Delta H^* = (h_1 - h_2^*) + \frac{(h_2^{*2} - h_1^2)}{h_1^2 \cdot h_2^{*2}} \cdot \left(\frac{q^2}{2g}\right) \quad (1.17)$$

$q = Q/b$  est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'équation de la quantité de mouvement définie par (1.5) :

$$q^2 / (2 \cdot g) = (h_1 \cdot h_2^{*2} + h_1^2 \cdot h_2^*) / 4 \quad (1.18)$$

Ainsi, l'équation (1.17) s'écrit sous sa forme définitive :

$$\Delta H^* = (h_2 - h_1^*)^3 / (4 \cdot h_2^* \cdot h_1) \quad (1.19)$$

La relation (1.19) 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 (1.6), les charges totales initiale et finale du ressaut peuvent s'écrire respectivement :

$$H_1 = h_1[1+IF_1^2/2] \quad (1.20)$$

$$H_2^* = h_1[Y^*+IF_1^2/(2Y^{*2})] \quad (1.21)$$

où  $Y^*$  est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique définie par l'équation (1.7) de Bélanger. Ainsi, le rendement  $\eta^*$  s'écrit :

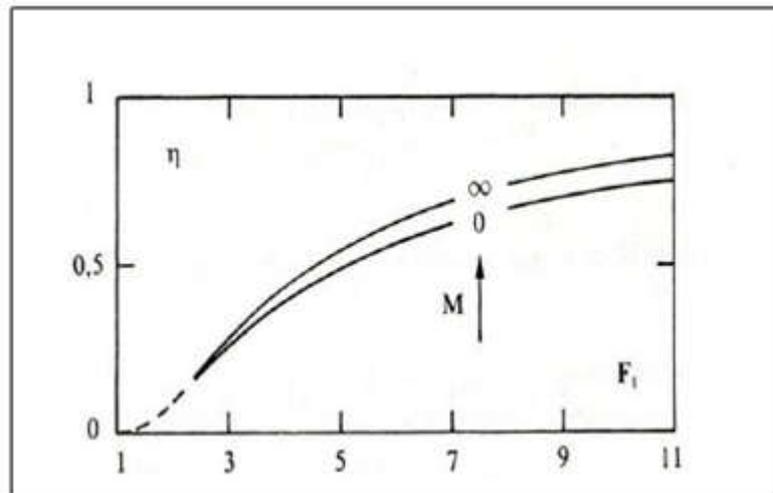
$$\eta^* = \Delta H^*/H_1 = (H_1 - H_2^*)/H_1$$

$$\eta^* = 1 - [Y^* + IF_1^2/(2Y^{*2})]/(1+IF_1^2/2) \quad (1.22)$$

Bien que la relation (1.22) permet le calcul explicite du rendement  $\eta^*$ , HAGER et SINNIGER (1986) proposent une expression approchée, applicable pour  $IF_1 > 2$  :

$$\eta^* = [1 - \sqrt{2}/IF_1]^2 \quad (1.23)$$

Les relations (1.22) et (1.23) sont représentées graphiquement dans le système d'axes de coordonnées cartésiennes de la figure (1.7).



**Figure 1.8 :** Rendement  $\eta$  du ressaut classique en fonction du nombre de Froude pour les profils rectangulaire ( $M=0$ ) et triangulaire ( $M=\eta$ ).

#### I .4.8. Profil de surface :

Selon les essais de Rajaratnam et Subramanya (1968) et Schröder [1969], la représentation adimensionnelle du profil de surface est possible si  $3.5 < F_1 < 10$  et  $h_1 > 0.05m$ . Selon Schröder, on introduit :

$$X=x/L_r$$

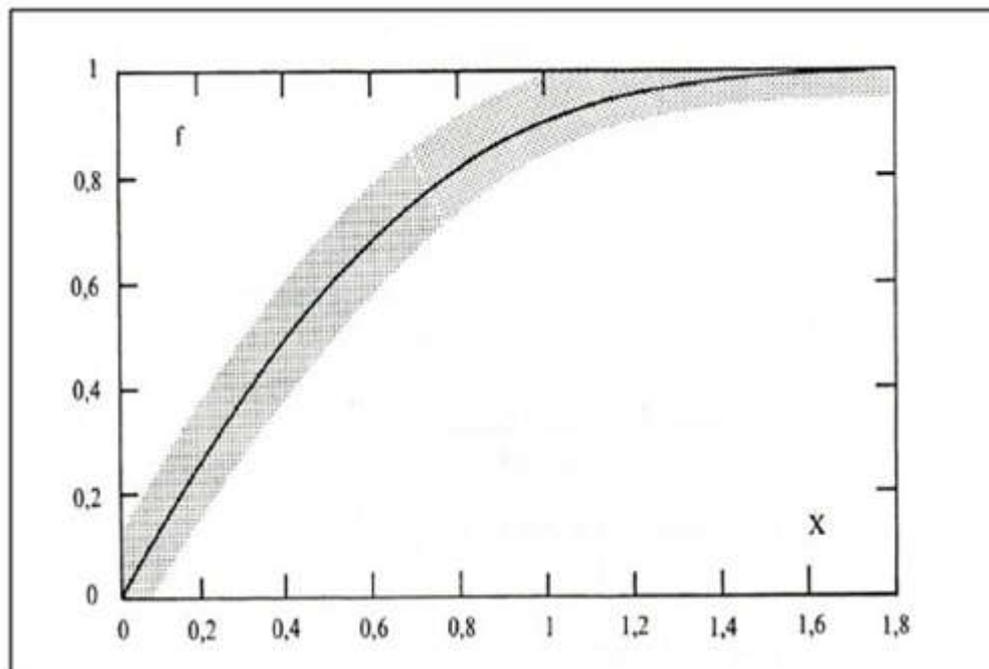
$$Y=(h-h_1)/(h_2-h_1) \quad (1.27)$$

Où :

$x$  est la coordonnée longitudinale avec origine au pied du ressaut (fig. 1.6)

La figure (1.13) permet la détermination du profil de la surface  $h(x)$ , en supposant que  $h_1$ ,  $h_2$  et  $L_r$  sont connus.

A cause des ondes de surface et de la forte turbulence, la surface réelle du ressaut n'est pas une ligne précise et unique. Des fluctuations temporelles caractérisent la surface sur toute la longueur du ressaut.



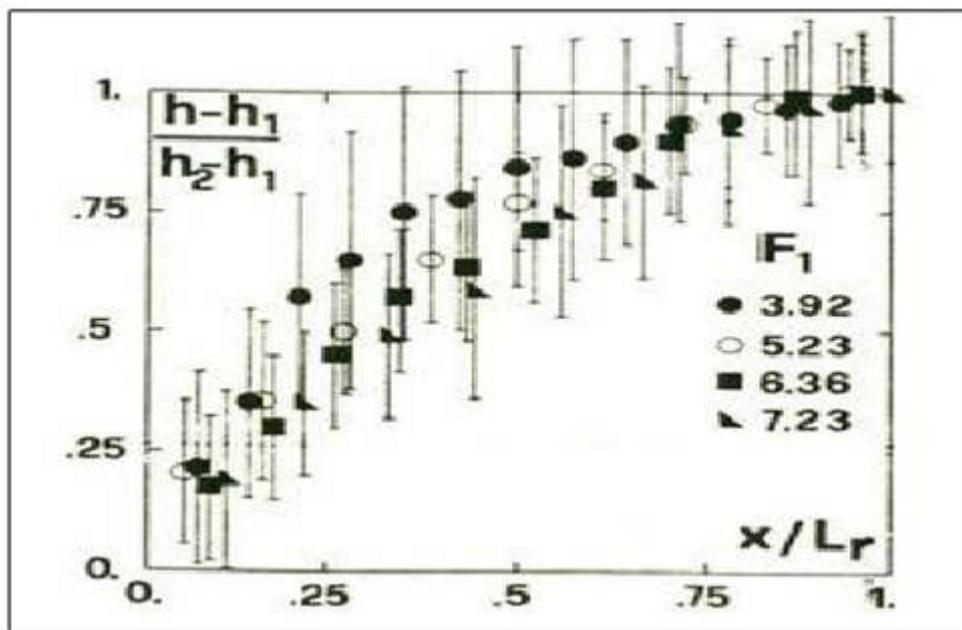
**Figure 1.9 :** Profil de la surface ressaut hydraulique plan ; définition selon les équations (1.27).

En effet, sur la figure (1.14), les profils des ressauts sont reportés de façon adimensionnelle et unitaire, pour avoir un caractère d'universalité, contrairement à la représentation de Rajaratnam et Subramania (1968, 1969, 1970).

Le diagramme exprime  $(h - h_1) / (h_2 - h_1)$  comme fonction de  $x/L_r$  pour différents nombres de Froude  $F_1$ .

**L'abscisse et l'ordonnée sont, donc, comprises entre 0 et 1.**

Pour chaque point de la figure (1.14), sont indiquées, les variations du niveau à la surface du liquide. Ainsi, chaque cas, correspondant à un nombre de Froude  $F_1$  donné, n'est plus représenté par une seule courbe, mais par une bande comprise entre les extrémaux des valeurs mesurées. Ces bandes se chevauchent les unes sur les autres. Apparemment, aucune tendance ne se dessine pour leur ampleur en fonction de  $F_1$ . Plus ce dernier croît, plus la courbe moyenne se déplace vers la droite du diagramme et se rapproche d'une droite de  $45^\circ$ .



**Figure 1.10 :** Profils de surface des ressauts relatifs  $(h - h_1) / (h_2 - h_1)$  en fonction de  $x / L_r$ , pour différents nombres de Froude  $F_1$  (Bretz, 1988) ; les traits verticaux en chaque point représentent les fluctuations de niveau.

## I.5. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire

### I.5.1. Approche de Forster et Skrinde (1950)

#### I.5.1.1. Seuil continu à paroi mince

En admettant une répartition hydrostatique des pressions et une distribution uniforme des vitesses dans les sections de part et d'autre du ressaut, Forster et Skrinde (1950) ont aboutis à un diagramme, liant les trois paramètres adimensionnels suivants :

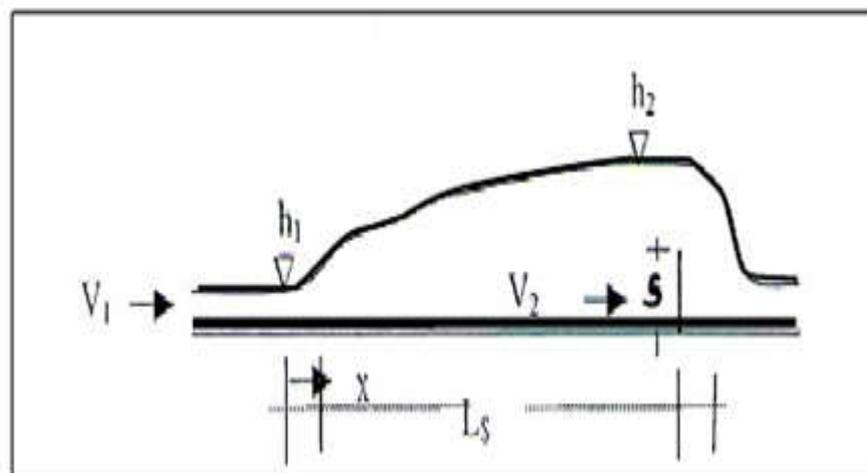
\_ le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.

\_ la position relative du seuil  $x/h_2$ .

\_ la hauteur relative du seuil  $s/h_1$ .

L'étude expérimentale de Forster et Skrinde (1950) vise à définir la variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour des valeurs données de la position  $x/h_2$  du seuil.

Pour chaque essai effectué, le rapport  $x/h_2$  est maintenu tout en assurant la formation complète du ressaut. La longueur du bassin amortisseur est à la limite égale à la position  $x$  du seuil comptée à partir du ressaut (figure 1.15).



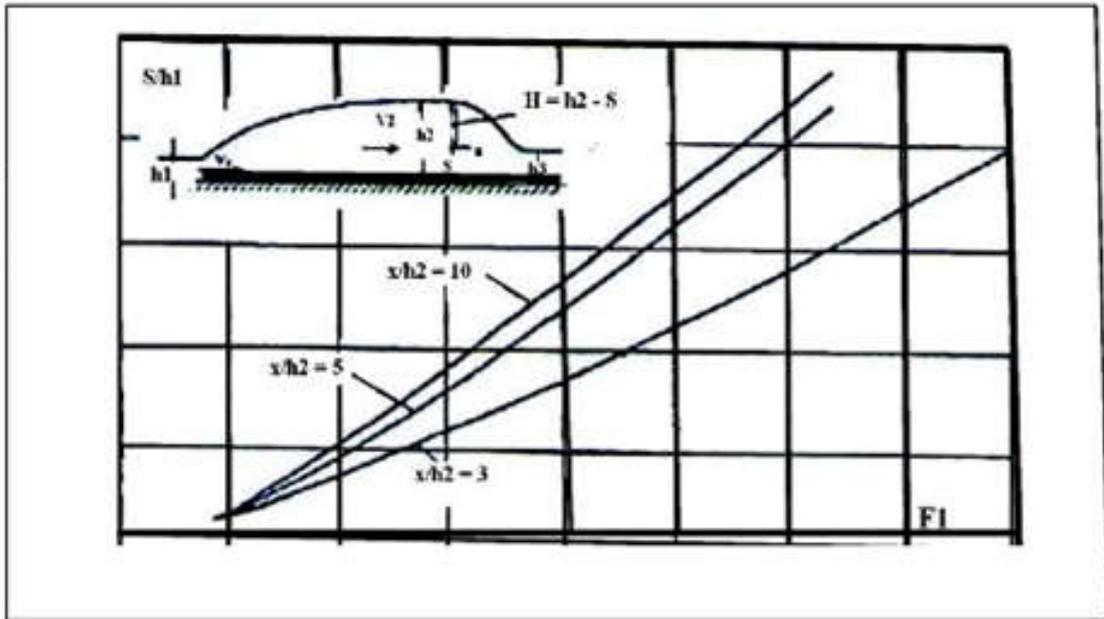
**Figure 1.11:** Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

Le seuil de hauteur  $s$  est dénoyé et fonctionne comme un déversoir

l'écoulement à l'aval n'a ainsi aucune influence sur le débit franchissant le seuil. Cette condition est satisfaite lorsque :

$$H_3 < h_2 - 0,75 \cdot s$$

Les mesures expérimentales obtenues sont traduites graphiquement sur la figure (1.10)



**Figure 1.12 :** Variation expérimentale de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude  $F_1$  quelques valeurs de  $x/h_2$ , selon Forster et Skrinde (1950)

Trois courbes sont alors déterminées pour des valeurs 3,5 et 10 de  $x/h$

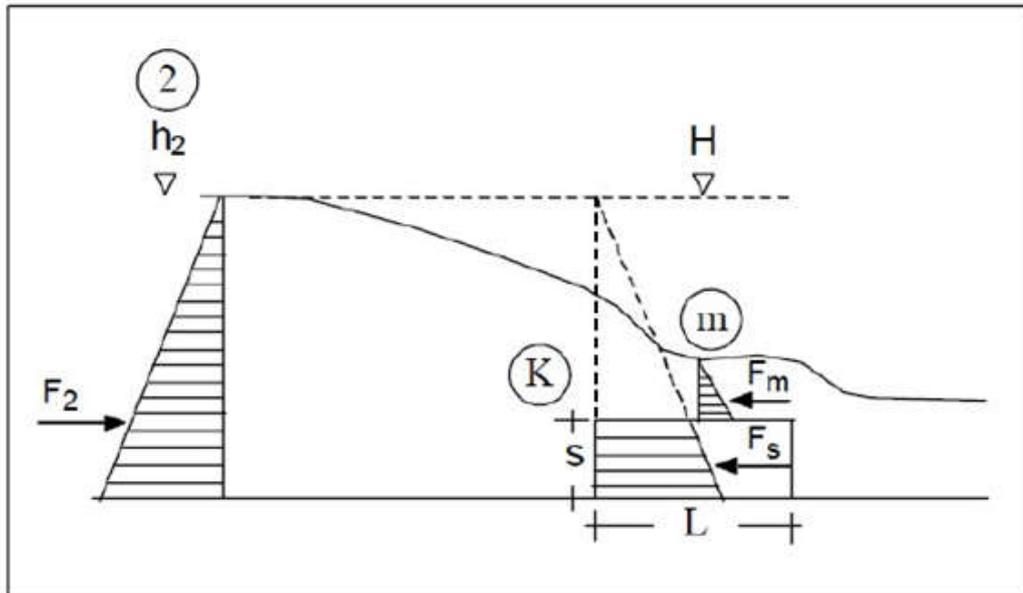
pour l'ensemble des valeurs du nombre de Froude  $F$

rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que  $x/h$  et 10, la hauteur relative  $s/h$  considère que la position relative  $x/h$

### **I.5.1.2. Seuil continu à paroi épaisse**

Le seuil est considéré comme épais lorsque le profil liquide s'y écoulant est presque parallèle au fond, pour peu que la longueur  $L$  du seuil soit suffisante (figure 1.17). La notion de seuil épais est également liée aux caractéristiques de l'écoulement et suivant la classification de Rao et Murlidhar (1963), le seuil est considéré comme étant épais lorsque :

$$0,1 \leq (h_2 - s) / L \leq 0,35$$



**Figure 1.13 :** Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur  $s$  et de longueur  $L$ . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.

Dans la section 2, l'écoulement est en régime fluvial de profondeur  $h_2$ . Le seuil est ensuite franchi par un écoulement en régime critique de profondeur  $K$ , suivi d'une tranche en régime torrentielle dont la profondeur finale  $h_m$  est minimale (section m).

## I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé, en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire (ressaut hydraulique classique). Nous avons présenté les différentes formes du ressaut, selon la classification de Bradley et Peterka (1957), qui dépendent de la variation du nombre de Froude  $F_1$ , à l'amont du ressaut. D'après cette étude, nous avons remarqué que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement, afin de définir la relation reliant le rapport  $Y^*$  des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude  $F_1$ . Bélanger (1828), a fait le premier pas sur cet objectif et a déterminé cette relation, par l'application du théorème d'Euler, entre les deux sections du ressaut. L'équation de la droite  $Y^* = f(F_1)$  obtenue par Bélanger (1828) est représentée par la (figure 1. 4). Quand on a abordé les travaux de Hager et al (1990), nous avons constaté que les caractéristiques géométriques du ressaut, ne sont déterminées, que par la voie expérimentale, et que plusieurs formules ont été proposées, par différents chercheurs.

A la fin de ce chapitre, nous avons examiné, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, et nous avons cité les travaux de Forster et Skrinde (1950) concernant le seuil à paroi mince. Les auteurs ont défini, en premier lieu, la variation de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et pour des valeurs données de  $x/h_2$ . En deuxième lieu, ils ont établi trois courbes à la base des données expérimentales, ils ont constaté que les trois courbes se rapprochent, lorsque la valeur de  $x/h_2$  augmente.

Comme pour le cas du seuil, Forster et Skrinde (1950), ont étudié l'effet de la marche positive sur le ressaut évoluant dans un canal rectangulaire, et ils ont élaboré un diagramme qui montre la variation du nombre de Froude  $F_1$ , en fonction du rapport  $h_3/h_1$ , pour différentes valeurs des hauteurs relatives  $s/h_1$  de la marche.

Chapitre II  
RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL Trapezoidal  
(Non rectangulaire)

## CHAPITRE II

### RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOÏDAL(NON RECTANGULAIRE)

#### II.1. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal symétrique

##### II.1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons citer quelques travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. Nous citerons particulièrement ceux effectués par Silvester (1964), Wanoschek et Hager (1989) sur le ressaut classique.

Ces auteurs ont notamment contribué à définir la longueur du ressaut et l'ont exprimé sous la forme adimensionnelle tel que :

??

$$L_j/(h_2-h_1)=7.1(1+10M)$$

Avec :  $M = \frac{h_1}{b} \tan \alpha$

où  $m$  est la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal,  $b$  la base du trapèze et  $h_1, h_2$  sont respectivement la hauteur initiale et finale du ressaut. Le paramètre adimensionnel  $M$  représente en fait, la hauteur relative initiale du ressaut. La relation de Silvester (1964) montre clairement que, la longueur du ressaut est d'autant plus grande que  $M$  tend vers l'infini. Les valeurs croissantes de  $M$  indiquent un profil trapézoïdal géométriquement rétréci à la base en tendant vers le profil triangulaire ( $b \rightarrow 0$ ). Par contre, les valeurs décroissantes de  $M$  aboutissent à des profils trapézoïdaux d'autant plus refermés vers le haut en tendant vers le profil rectangulaire ( $M \rightarrow \infty$ ). Ces considérations laissent penser que le ressaut en canal triangulaire devrait s'étendre sur une longueur beaucoup plus grande que son homologue du

rectangulaire.

Plus récemment, Wanoschek et Hager (1989) ont décrit d'une manière détaillée le comportement du ressaut, dans un canal trapézoïdal, d'angle d'inclinaison de  $45^\circ$  ( $m = 1$ ) et pour des valeurs de  $M \leq 0,4$ . Les observations ont révélé l'existence d'un rouleau du fond, jusqu'alors jamais détecté, et dont les caractéristiques géométriques, telles que la longueur à la base, la hauteur ainsi que la position sont définies.

Les essais ont montré que la longueur relative  $L_j / h_2$  du ressaut dépend à la fois de la valeur du nombre de Froude  $F_1$  et de la valeur de la hauteur relative initiale  $M$  : les courbes de la variation de  $L_j / h_2$ , obtenues pour  $0,1 \leq M \leq 0,4$ , issues des essais de Peterka pour le ressaut en canal de section droite triangulaire.

Les auteurs ont montré que le ressaut dans le canal trapézoïdal testé devrait être plus long et asymétrique au-delà d'une valeur limite du nombre de Froude  $F_1$ , tout dépendant de la hauteur relative initiale  $M$ . De même pour la longueur caractéristique du ressaut, nous allons aborder à travers ce chapitre un autre paramètre caractéristique du ressaut ; ce paramètre est le rapport des hauteurs conjuguées  $Y$ , obtenu par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut.

## II.1.2. Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

Le ressaut hydraulique, comme dissipateur d'énergie, est couramment utilisé dans les bassins d'amortissement. Les sections transversales de ces bassins prennent souvent une forme rectangulaire, alors que de point de vue pratique le canal trapézoïdal représente un cas particulière intéressant. :

### II.1.2.1. Ressaut dénoyé en canal trapézoïdal

#### II.1.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées

En négligeant toutes les forces de frottement et en considérant une distribution uniforme pour les vitesses et hydrostatique pour les pressions dans les sections (1) et (2) de part et d'autre du ressaut. L'équation de quantité de mouvement appliquée aux sections initiales et finales d'un ressaut se produisant dans un canal horizontal de section droite trapézoïdale pour lequel:

Les sections initiale et finale sont:

$$A_1 = b h_1 + m h_1^2$$

$$A_2 = b h_2 + m h_2^2$$

$$\bar{h}_1 = \frac{3b h_1^2 + 2m h_1^3}{6 A_1}$$

$$\bar{h}_2 = \frac{3b h_2^2 + 2m h_2^3}{6 A_2}$$

Las forces de pression des sections initiale et finale sont

$$p_1 = \bar{\omega} \bar{h}_1 A_1; p_2 = \bar{\omega} \bar{h}_2 A_2$$

L'application de cette équation donne:

$$\frac{b h_1^2}{2} + \frac{m h_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g A_1} = \frac{b h_2^2}{2} + \frac{m h_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g A_2} \quad (2.1)$$

Le nombre de Froude  $F_1$  caractérisant l'écoulement dans la section initiale du ressaut est tel que:

$$F_1^2 = \frac{Q^2 (b + 2m h_1)}{g (b h_1 + m h_1^2)^3} \quad (2.2)$$

En introduisant le paramètre Y définissant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.

L'équation devient :

$$F_1^2 \left[ 1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left[ Y^2 \left( 1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left( 1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (2.3)$$

Tels que:  $Y = h_2/h_1$  et  $M = m h_1/b$

l'équation (2.3) a 5 variables est réduite à 3 variables ( $F_1^2; M, Y$ ):.

$$F_1^2 = \frac{Q^2 (b + 2m h_1)}{g (b h_1 + m h_1^2)^3} \quad \text{et } M = m h_1/b$$

La relation (2.3) 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 (2.3). Le canal de section droite rectangulaire constante est un cas particulier du canal trapézoïdal pour lequel l'angle d'inclinaison du talus par rapport à l'horizontal est de  $90^\circ$ ; ceci correspond donc à  $m = \cotg 90^\circ = 0$ , ou bien à  $M = 0$ . Par contre, le profil triangulaire correspond à un à profil trapézoïdal de base  $b=0$ , soit  $M \rightarrow \infty$ .

L'élément inconnu est:  $h_2 = ?$

connaissant  $F_1^2$  et M on peut tirer, à partir du graphique  $Y(F_1)$ , le rapport  $Y = \frac{h_2}{h_1}$  d'où  $h_2 = Y h_1$

#### II.1.2.1.1.1 Cas particulier du canal rectangulaire

Pour obtenir la fonction  $Y(F_1)$ , pour le cas du ressaut hydraulique évoluant canal rectangulaire, il suffit d'annuler dans l'équation (2.3)  $m$  et  $M$  ( $m=0$  et  $M=0$ ) l'équation (2.3) devient

$$F_1^2 \left(1 - \frac{1}{Y}\right) = \frac{Y^2 - 1}{2} \quad \text{ou encore} \quad F_1^2 = \frac{Y(Y+1)}{2} \quad (2.4)$$

Et devient  $F_1^2 = \frac{Q^2 b}{g (b h_1)^3}$

Éléments connus:  $Q, b, h_1$  donne  $F_1$

Éléments inconnus:  $h_2 = ?$

L'équation (2.4) conduit à la relation

$$Y = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1) \quad \text{c'est l'équation de Belanger}$$

Cette équation traduit un ressaut classique sans obstacle en aval. Elle a été reprise par Hager (1988):  $Y = \sqrt{2} F_1 - \frac{1}{2}$  valable pour  $F_1 > 3$

Hager a vérifié expérimentalement que pour des ressauts où  $F_1 > 3\sqrt{1 + 8F_1^2} \approx \sqrt{8F_1^2}$  d'où la relation

$$Y = \sqrt{2} F_1 - \frac{1}{2} \quad (2.5)$$

### II.1.2.1.1.2. Cas particulier du canal triangulaire

En remplaçant dans l'équation (2.3):

$$b = 0 \quad \text{et} \quad \frac{1}{M} = 0 \quad (M \rightarrow \infty)$$

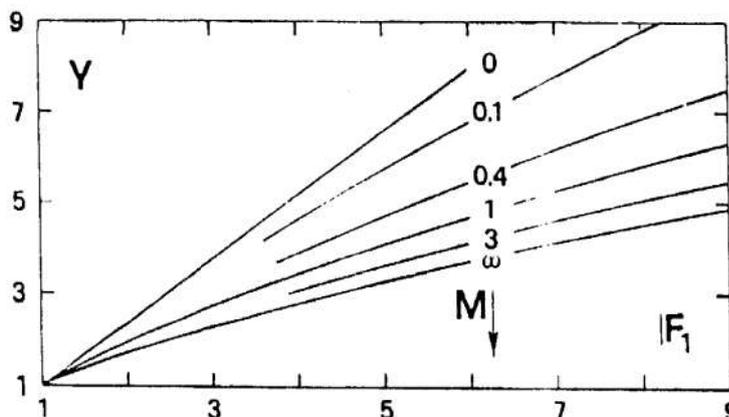
L'équation (2.3): donne

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^2 + Y + 1)}{3(Y + 1)} \quad (2.6)$$

Hager à (1988) a donné une forme approchée à cette équation:

$$Y = \left(\frac{3}{2} F_1^2 - 1\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.7)$$

Il convient de noter que  $Y \sim F_1$  pour le profil rectangulaire mais que  $Y \sim F_1^{\frac{2}{3}}$  pour le profil triangulaire.



**Figure 2 1:** variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de nombre de Froude et de la hauteur relative  $M$ .  $M = 0$ : Profil rectangulaire.  $M \rightarrow \infty$ : Profil triangulaire.  $0 < M < \infty$ : Profils trapézoïdaux

La figure (2.1) 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  $IF_1$  de l'écoulement incident

### II.1.2.1.2. Pertes de charges relatives

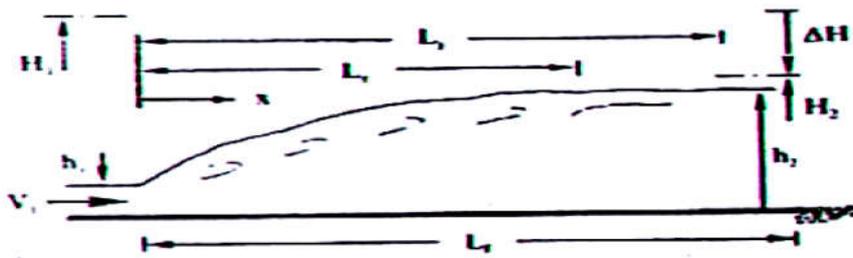
L'intérêt technique du ressaut hydraulique est particulièrement dû à dissipation d'énergie mécanique qu'il permet de réaliser.

La perte de charge  $\Delta H$  du ressaut est par définition la différence des charges initiale

et finale:  $\Delta H = H_1 - H_2$

La perte de charge relative est définie comme étant le rapport de la  $\Delta H$  à la charge initiale  $H_1$   $\eta = \frac{\Delta H}{H_1}$

$\eta$  appelée par fois l'efficacité d'un ressaut hydraulique.



**Figure 2.2** notions adoptées pour le ressaut hydraulique sur fond horizontal en canal prismatique

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \quad (2.8)$$

$$H_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}$$

### II.1.2.1.2.1 Cas du canal trapézoïdal

En tenant compte des relations donnant le rapport des hauteurs conjuguées  $Y = \frac{h_2}{h_1}$  et de  $M = \frac{mh_1}{b}$  ainsi que du nombre de  $F_1$  tel que:

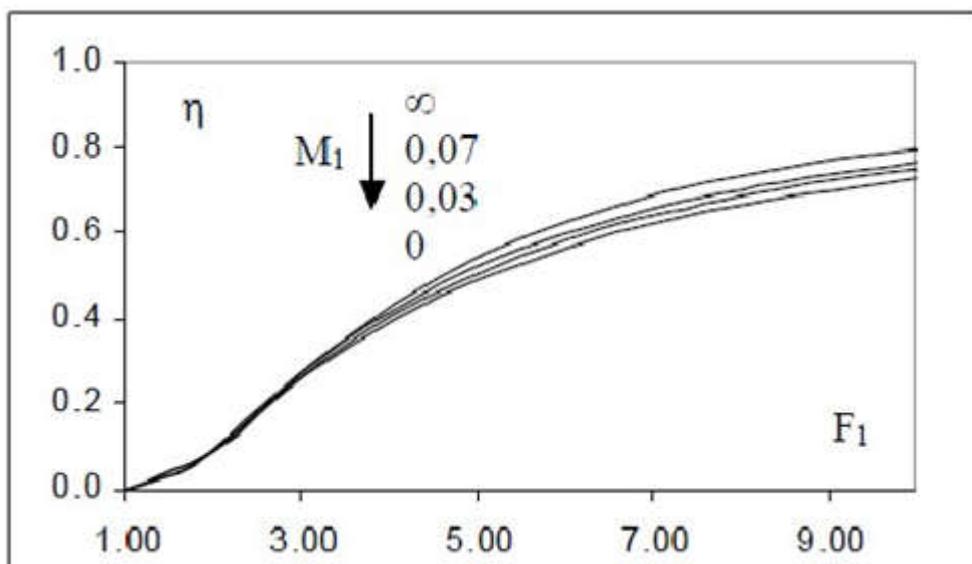
$$F_1^2 = \frac{Q^2 (b+2mh_1)}{g (bh_1+mh_1^2)^3}$$

On obtiendra

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \left[ \frac{(1+M)^3}{(1+2M)(1+MY)^2} \right]}{1 + \frac{F_1^2}{2} \left( \frac{1+M}{1+2M} \right)} ; 0 < \eta < 1 \quad (2.9)$$

Cette équation a 3 variables.

En éliminant  $Y$  à l'aide de l'équation (2.3) on obtient  $\eta = f(M, F_1)$ . la figure (2.3) représente  $\eta = f(M, F_1)$  pour les profils rectangulaire et triangulaire. Pour  $F_1$  donné, l'efficacité du ressaut hydraulique pour le profil triangulaire est plus élevée que pour le profil rectangulaire. Les différences sont d'environ 10% pour  $5 < F_1 < 15$ . Pour  $1 < F_1 < 2.5$ , les courbes correspondantes sont traitillées. Comme on le verra sous la figure (2.3), l'équation (2.3) ne peut être appliquée à des écoulements, caractérisés par de tels nombres de Froude.



**Figure 2.3** efficacité,  $\eta = \frac{\Delta H}{H_1}$ , en fonction de Froude  $F_1$  pour les profils rectangulaire ( $M = 0$ ) et triangulaire ( $M \rightarrow \infty$ )

### II.1.2.1.2.2 Cas du canal rectangulaire

$M = 0$

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (2.10)$$

Sinniger (1985) a proposé une bonne approximation de cette équation

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right]^2; \quad F_1 > 2.5 \quad (2.11)$$

### II.1.2.1.2.3. Cas du canal triangulaire

$1/M = 0$

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}} \quad (2.12)$$

Pour  $F_1 > 2.5$ , Hager et Sinniger (1985) propose la relation approchée

$$\eta = \left[1 - \left(\frac{12}{F_1^4}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^2 \quad (2.13)$$

C'est le canal triangulaire qui présente le plus grand intérêt.

Ces connaissances sur  $\eta$  et  $Y$  indiquent qu'il faudrait plutôt choisir des profils triangulaire (ou trapézoïdaux à  $M$  grand) que de profils rectangulaires pour que la hauteur d'eau aval devienne aussi petite que possible et l'efficacité  $\eta$  aussi grande que possible. Pourtant, il existe des raisons pratiques qui conduisent normalement à exclure les profils triangulaires.

### II.1.2.1.3. Longueurs caractéristiques du ressaut

La longueur,  $L_r$  est la caractéristique du ressaut la plus difficile à déterminer. En effet, il est généralement difficile de définir la fin du ressaut.

Dans la pratique, pour calculer les dimensions de bassins d'amortissement, on considère comme fin du ressaut le point à partir duquel le revêtement de béton n'est plus nécessaire.

Plusieurs auteurs ont essayé de quantifier les longueurs caractéristique du ressaut dénoyé dans un canal trapézoïdal, il y a lieu de signaler qu'au lieu de la longueur du rouleau inexistante dans la forme trapézoïdal, les auteurs ont mesuré la fin du retour latéral du courant qui se fait de part et d'autre de l'axe du canal et bien sur la longueur.

Posey et Hsing ont posé la formule suivante (1938), très approchée qui donne pour la valeur de la longueur  $L_r$ .

$$\frac{L_r}{h_2} = 5 \left( 1 + 4 \sqrt{\frac{L_2 - L_1}{L_1}} \right) \quad (2.14)$$

$h_2$  étant la hauteur du ressaut en aval,  $L_1$  et  $L_2$  les largeurs en surface, respectivement, en amont et aval du ressaut.

Cette formule est valable pour des pentes de talus comprises entre 0.5 et 2.

Les essais sur modèles réduits indiquent

$$L_j = 7 (1 + 10 \sigma M) (h_2 - h_1), \quad 0 \leq M \leq 0.5 \quad (2.15)$$

Où  $\sigma$  est un nombre correctif,  $1 \leq \sigma \leq 2$ .

Les différences de longueur en fonction de  $\sigma$  proviennent de la formation de ressauts spatiaux.

Comparé au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, le ressaut dans profil trapézoïdal ne comporte pas seulement de zones de séparation au-dessus de la zone d'écoulement (rouleau) mais également sur les côtés du canal. L'équation (2.15) avec  $\sigma \approx 2$  correspond donc à peu près à la longueur du ressaut sur les côtés du canal. Alors que  $\sigma \approx 1$  correspond à la longueur dans l'axe du ressaut hydraulique. pas seulement de zones de séparation au-dessus de la zone d'écoulement (rouleau) mais également sur les côtés du canal. L'équation (2.15) avec  $\sigma \approx 2$  correspond donc à peu près à la longueur du ressaut sur les côtés du canal. Alors que  $\sigma \approx 1$  correspond à la longueur dans l'axe du ressaut hydraulique.

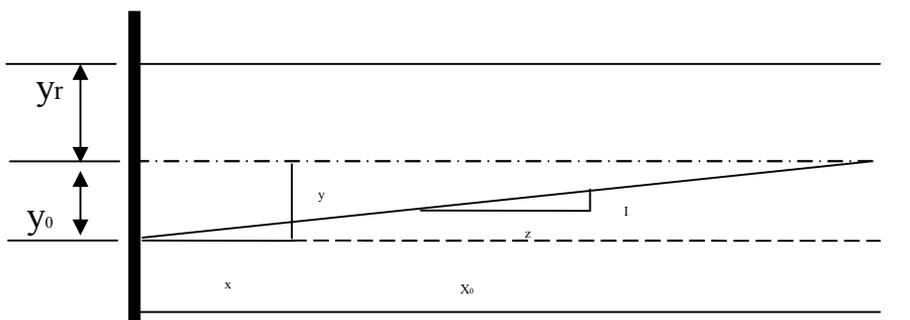
## II.2. Ressaut hydraulique en canal trapézoïdale asymétrique

### II.2.1. Approche d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954 :

Dans cette approche, Alberto José et Rodriguez-Diaz ont étudié le ressaut dans un canal trapézoïdal dans lequel les parois latérales sont verticales, la surface de l'eau et le canal inférieur ne sont pas parallèles. La section non rectangulaire à étudier est présentée en coupe transversale dans la figure 3.1.

Cette étude a pour but de déterminer:

- 1- Les caractéristiques de la vague déferlante du ressaut hydraulique, dans un canal non rectangulaire particulier.
- 2- Le critère de l'existence du ressaut hydraulique de toute forme et distribution de vitesse.



**Figure 2.4 :** Section transversale du canal

$X_0$  : Largeur de la section transversale

$Y_0$  : Différence entre la profondeur de l'eau dans le fond et les côtés peu profonds.

$Y_r$  : Profondeur de l'eau dans le côté peu profond

Y are : Profondeur moyenne

Xs : Longueur du retour latéral sur le coté peu profond du canal

Xd : Longueur du retour latéral sur le coté profond du canal

V : Vitesse

Q : Débit

P+M : Force de pression + quantité de mouvement

G : Rapport de la force de pression et de l'écoulement amont et aval

$$\Psi = P + M / At \cdot \frac{y_s}{2}$$

$$At = \frac{x_s y_s}{2} \text{ Surface du triangle (Air d'apparition du ressaut)}$$

$$\Phi = y_r / y_0$$

$$\theta = (Q/At)^2 / g y_0$$

F<sub>1</sub> = Nombre de Froude

γ : Poids spécifique de l'eau

φ : Densité de la masse

g : Accélération de la gravité

L'indice 1 est utilisé pour noter la section en amont du front d'onde, et 2 pour la section en aval du front d'onde. L'indice S signifie la bande.

## II.2.2. Analyse de la section totale

L'expression de la force de pression plus l'équation de quantité de mouvement d'écoulement dans la section est comme suit :

$$P+M = \frac{1}{2} x_0 y_r^2 \phi + \frac{1}{2} x_0 y_0 \gamma (y_r + y_0/3) + \phi Q^2 / x_0 y_r + \left(\frac{1}{2} x_0 y_0\right) \quad (3.1)$$

La forme adimensionnelle :

$$\Psi = \phi^2 + \phi + \frac{1}{3} + \Theta / (1+2\phi) \quad (3.2)$$

D'après l'équation de la quantité de mouvement,  $\psi_1$  (amont) =  $\psi_2$  (aval) :

$$\phi_1^2 + \phi_1 + \frac{1}{3} + \Theta / (1+2\phi_1) = \phi_2^2 + \phi_2 + \frac{1}{3} + \Theta / (1+2\phi_2) \quad (3.3)$$

D'après le développement de l'expression de  $\Theta$ , d'après l'équation de continuité, on peut constater que  $\Theta$  reste constante à l'amont et à l'aval du ressaut.

La solution de  $\Phi_2$  pour des valeurs données de  $\Phi_1$  et  $\Theta$  a été réalisée graphiquement en traçant  $\psi$  par rapport à  $\phi$  pour une valeur donnée de  $\Theta$ .

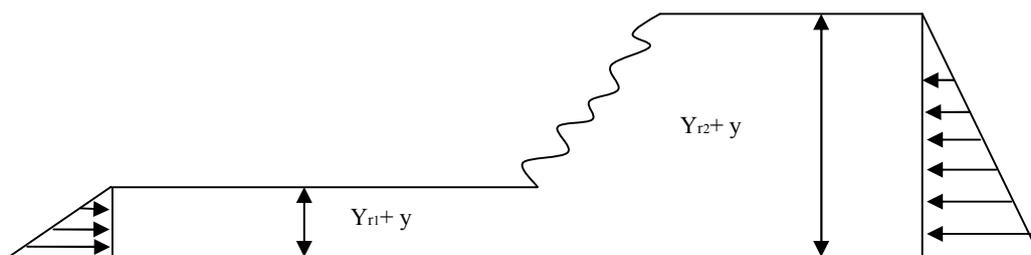
Une série de courbes de  $\psi$  par rapport  $\phi$  a été construite, chaque courbe représente une valeur différente de  $\Theta$ .

D'après ces courbes, la valeur correcte de  $\psi$  peut être déterminée pour donner la valeur de  $\phi$  et de  $\Theta$ , puisque la valeur est la même pour les sections amont et aval.

### II.2.3. Analyse de bande longitudinale (volume de contrôle)

La somme de la force de pression et de la quantité de mouvement dans la bande de la section amont de l'onde n'est pas nécessairement la même qu'en aval, en raison de la possibilité de retour latéral de la quantité de mouvement du côté profond au côté peu profond du canal.

L'augmentation de la quantité de mouvement sur le côté profond du canal et également une diminution sur le côté peu profond. Cette condition exige que la quantité de mouvement doive être transférée latéralement à travers le canal. Si le retour latéral de la quantité de mouvement est très grand, le retour physique sera impossible. Les critères de l'existence du ressaut hydraulique sont basés sur l'ampleur (magnitude) du retour latéral de la quantité de mouvement.



**Figure 2.5 :** Section de la bande longitudinale

L'équation de la quantité de mouvement pour une bande est présentée sous la forme suivante :

$$\frac{1}{2} \gamma (y_{r1+y})^2 + v_1^2 (y+y_{r1}) = \frac{1}{2} \gamma (y_{r2+y})^2 + v_2^2 (y+y_{r2}) \quad (3.4)$$

On a:  $V = Q/At(1+2\phi)$ , divisant par  $\gamma y_o^2$ , l'expression suivante est obtenue pour la bande.

$$P + M/\gamma y_o^2 = \frac{1}{2} (y/y_o + \phi_1)^2 + \Theta (y/y_o + \phi_1) / (1+2\phi_1)^2 = \frac{1}{2} (y/y_o + \phi_2)^2 + \Theta (y/y_o + \phi_2) / (1+2\phi_2)^2$$

(3.5)

Pour l'équilibre

$$(P+M)_{s1} = (P+M)_{s2} \quad (3.6)$$

On a :

$$G = (P+M)_{s2} / (P+M)_{s1} \quad (3.7)$$

M=1 pour l'équilibre

M>1 pour P+M déficience en amont

M<1 pour P+M surplus en amont

De la géométrie :

$$y/y_0 = 1 - x/x_0 \quad (3.8)$$

Remplaçant (3.8) dans (3.5) :

$$\frac{1}{2} (1 - x/x_0 + \phi_1)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_1) / (1 + 2\phi_1)^2 = \frac{1}{2} (1 - x/x_0 + \phi_2)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_2) / (1 + 2\phi_2)^2 \quad (3.9)$$

Remplaçant (3.9) dans (3.7) :

$$G = \frac{\frac{1}{2} (1 - x/x_0 + \phi_2)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_2) / (1 + 2\phi_2)^2}{\frac{1}{2} (1 - x/x_0 + \phi_1)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_1) / (1 + 2\phi_1)^2} \quad (3.10)$$

Le paramètre G ressemble au paramètre de forme H utilisé dans les études de la couche limite. La valeur de G est une mesure approchée de la quantité de mouvement à toute la bande longitudinale, et la valeur de H représente la mesure approchée de la quantité de mouvement dans la couche limite. Autrement, le critère de séparation de la couche limite est souvent exprimé par le taux de changement de H plutôt que la valeur communément utilisée de H. La valeur de G ou  $dG/d(x_0-x)$  peuvent être des mesures valables si le ressaut hydraulique est possible.

La valeur maximale de G se produit au fond le peu profond, où  $x/x_0=1$

$$G_m = \frac{\frac{1}{2} \phi_2^2 + \Theta \phi_2 / (1 + 2\phi_2)^2}{\frac{1}{2} \phi_1^2 + \Theta \phi_1 / (1 + 2\phi_1)^2} \quad (3.11)$$

Les valeurs de  $G$  par rapport à  $\phi$  pour les différentes valeurs de  $\Theta$  sont illustrées dans la figure 3.3.

D'une manière similaire

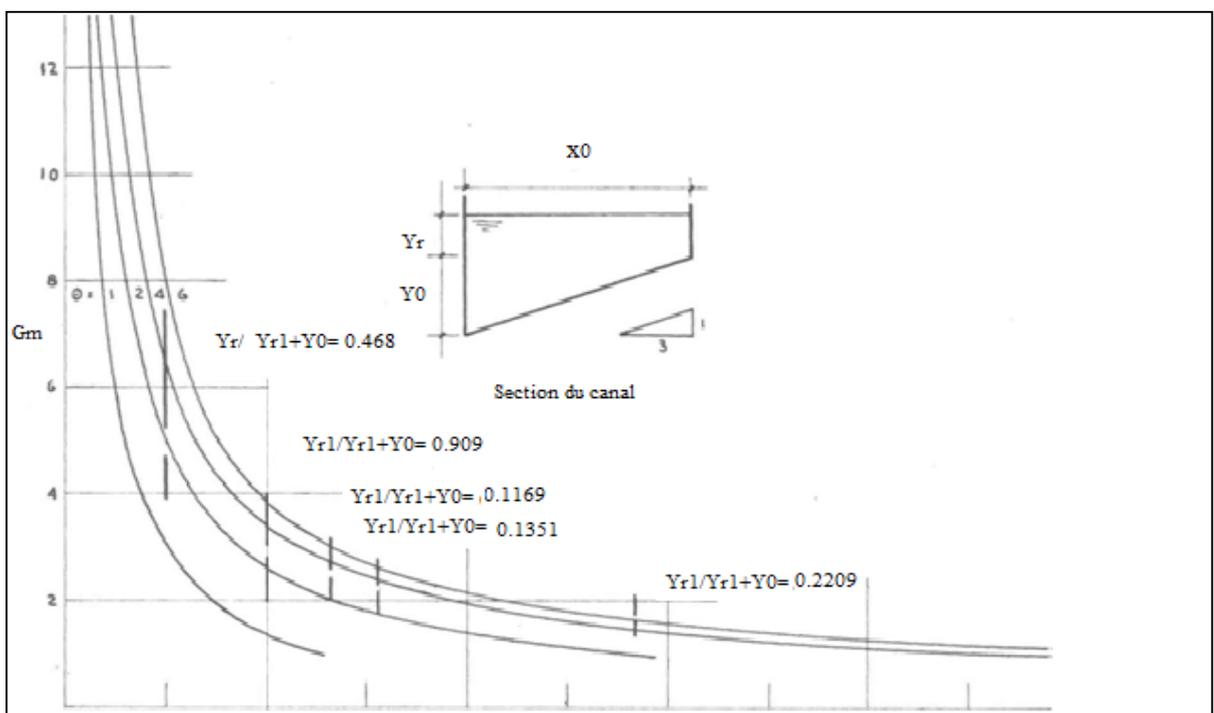
$$\frac{dG/d(x/x_0)}{x/x_0} = 1 = G(\phi_2 - \phi_1) / \phi_1 \phi_2 \quad (3.12)$$

Les valeurs  $\frac{dG/d(x/x_0)}{x/x_0} = 1$  sont tracés en fonction de  $\phi_1$  pour les différents valeurs de  $\Theta$  (Figure 3.4).

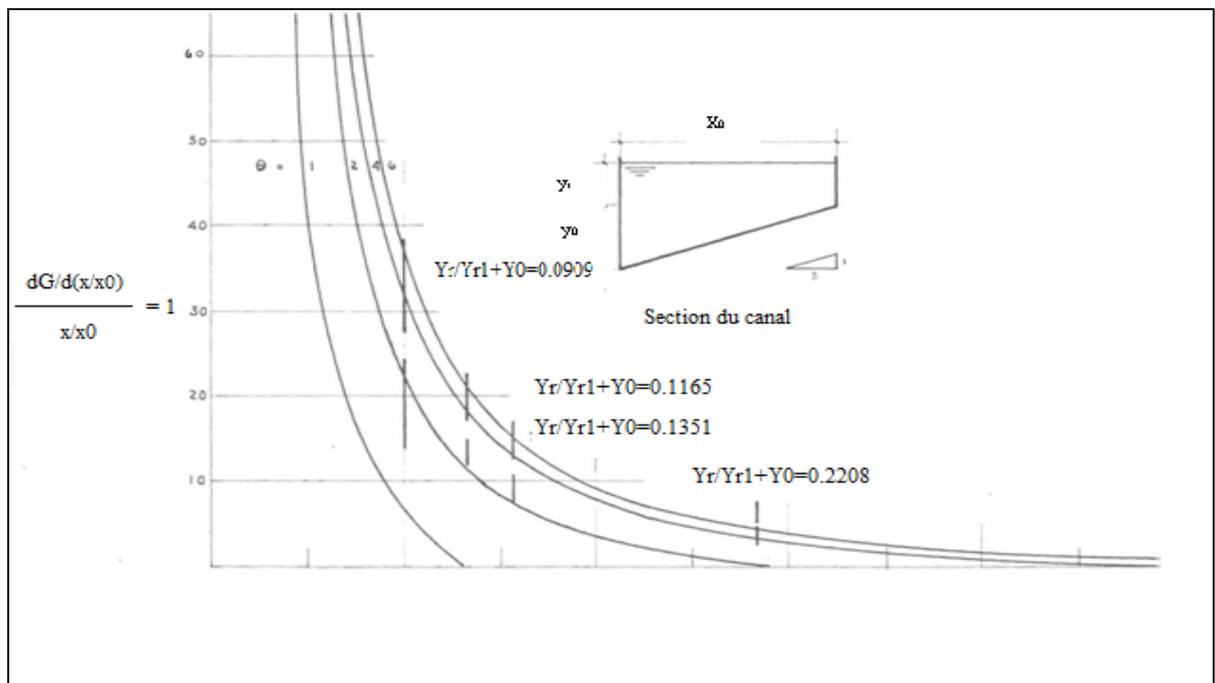
Le diagramme de  $G_m$  et  $\frac{dG/d(x/x_0)}{x/x_0} = 1$  montre les valeurs correspondant aux essais. Les essais sont effectués à cinq largeurs différentes de canal ou à cinq valeurs différentes de  $y_{r1}/y_{r1} + y_0$ .

La valeur du paramètre  $Y_{r1}/Y_{r1} + Y_0$  pour la section transversale rectangulaire est égale à l'unité. Dans ce cas, le ressaut est toujours possible et le rapport  $G$  c'est 1, il ya la force de pression plus l'équilibre de la quantité de mouvement dans chaque bande longitudinale. Dans une section triangulaire, la valeur de  $Y_{r1}/Y_{r1} + Y_0$  est égale à zéro, la formation du ressaut est impossible et les vagues ondulantes et rouleaux sur le côté peu profond sont présents ; la valeur maximale correspondante de  $G$  est infinie, ce qui signifie qu'il y a une force de pression plus une diminution de la quantité de mouvement en aval et qui ne peut pas être fourni, rendant impossible la formation du ressaut hydraulique.

Les valeurs théoriques calculées pour le rapport  $G_m$  et tracées dans la figure 3.3 sont toujours plus grandes que l'unité, ce qui veut dire qu'il y a une augmentation de la quantité de mouvement sur le coté profond du canal et une diminution sur le coté le peu profond.



**Figure 2.6 :** Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté peu profond



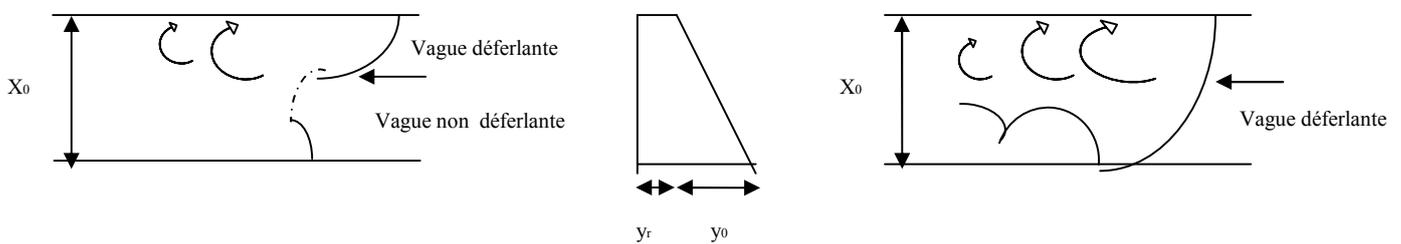
**Figure 2.7 :** Diagramme adimensionnel du taux de changement de M sur le coté peu profond

#### II.2.4. Discussion des résultats

Il existe deux types différents d'écoulement :

- Le premier type se compose d'ondes ondulantes à travers le canal et des rouleaux sur le côté peu profond. Une seconde vague bien définie a toujours été observée avec ce type d'écoulement. Un modèle de ce type d'écoulement est représenté sur les figures (3.5a et 3.5b).
- Le deuxième type consiste en une onde perpendiculaire à la section transversale qui peut être appelée ressaut hydraulique ; aucune seconde vague n'a été observée. Ce type d'écoulement est également esquissé dans les figures (3.5c et 3.5d).

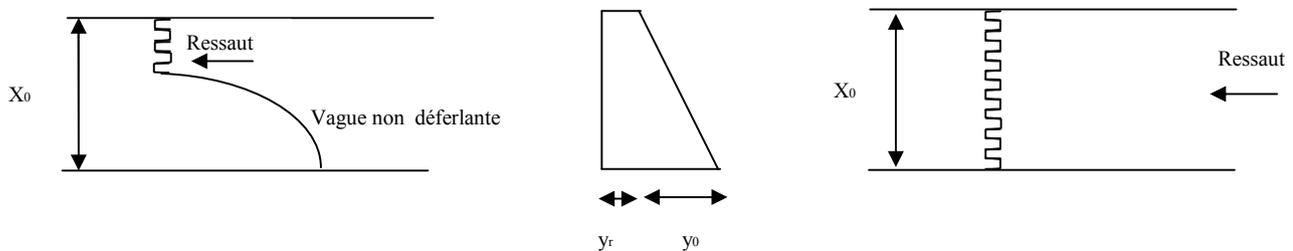
Les critères utilisés pour analyser les deux types de l'écoulement observés sont qu'un certain transfert latéral de la quantité de mouvement est nécessaire pour obtenir une onde perpendiculaire ; dans le cas où ce retour latéral de la quantité de mouvement ne peut pas être fourni, aucun ressaut hydraulique n'est possible.



a-Vague déferlante partielle

b- Vague

Premier type d'écoulement (série n°1 et n°4)

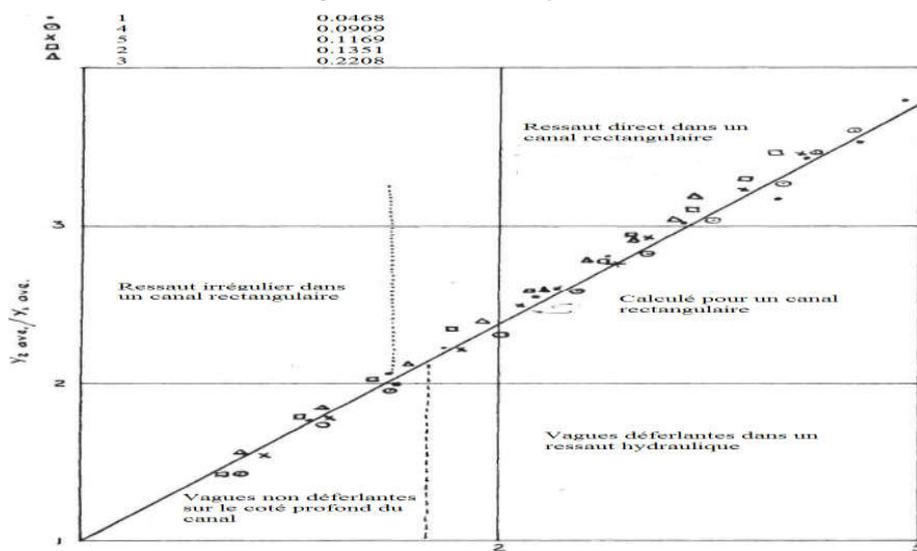


c-Ressaut partiel

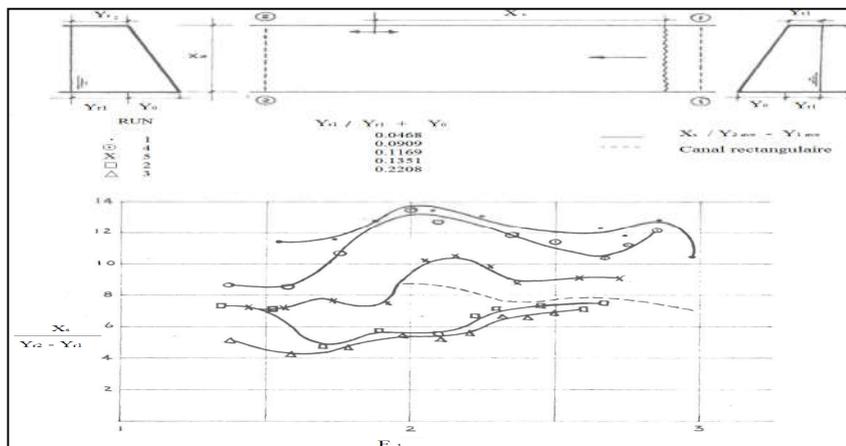
d- Ressaut

Deuxième type d'écoulement (série n°2 et n°3)

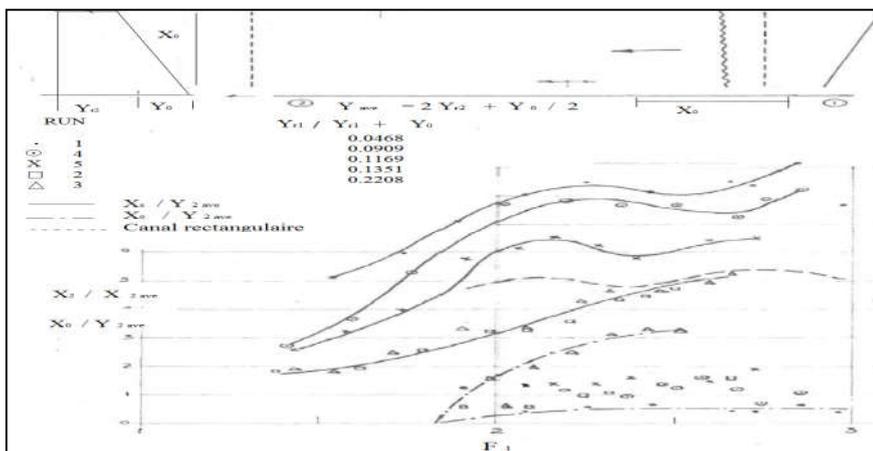
Figure 2.8 : Schéma général d'écoulement



**Figure 2.9 :** Rapports de profondeur moyenne en fonction de numéro de Froude



**Figure 2.10:** Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral du côté peu profond



**Figure 2.11 :** Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral des deux côtés du canal

La valeur du nombre Froude légèrement inférieure à 2.0 peut être considérée comme la limite entre la vague de rupture et de non-rupture indépendamment de la forme du canal.

Dans la figure n° 3.7, les deux types de l'écoulement (vagues ondulantes ou ressaut hydraulique) sont bien différenciés. Les valeurs de  $X_s/Y_{r2}-Y_{r1}$  supérieur à 8 correspondent à des vagues ondulantes et des remous sur le côté peu profond. Quand le ressaut est obtenu, la valeur de  $X_s/Y_{r2}-Y_{r1}$  n'est jamais supérieure à 8. Les valeurs maximales obtenues par Bakhmeteff et Matzke pour la longueur sur la hauteur du ressaut dans un canal rectangulaire sont affichés en pointillés dans la figure 3.8 La valeur de ce rapport est d'environ 8 sur un canal rectangulaire.

Si le ressaut n'est pas obtenu, la longueur du retour latéral sur le côté peu profond augmente à mesure que la largeur du canal augmente ; la limite sera lorsque la section transversale du canal est triangulaire, la longueur de l'écoulement inverse sur le côté peu profond étant infinie ; l'événement est prouvé expérimentalement. Pour la condition du ressaut, la longueur du retour latéral sur le côté peu profond était pratiquement la même pour tous les séries (Figures 7 et 8).

Les valeurs maximales du rapport de la longueur de ressaut sur la profondeur amont du ressaut pour un canal rectangulaire ( $L_j/h_1$ ) obtenu par Bakhmeteff et Mr Matzke sont affichées en pointillés sur la figure 8. La valeur maximale de ce rapport est d'environ 5.

A partir de la figure 8, la longueur du retour latéral sur le côté profond augmente avec la diminution de la largeur du canal. Cette diminution est due par la diminution du fond du canal incliné. La limite sera donc, quand la longueur du retour inverse devient égale à la longueur dans les deux côtés du canal, c'est le cas d'un canal rectangulaire.

## II.2.5. Conclusion

Ce chapitre a concerné le ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire. Une étude a été proposée qui est celle d'Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954).

Cette étude a été consacrée à l'évaluation par la voie de l'expérimentation des caractéristiques de la longueur et la profondeur du ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire.

L'expérimentation s'est intéressée, également, à évaluer le transfert de la quantité du mouvement latéral. Un paramètre généralisé pour mesurer le retour de cette quantité de mouvement est le rapport de la force de pression plus le débit de la quantité de mouvement aval dans une large bande de l'unité à celle en amont de la transition. Alberto José Rodriguez-Diaz (1954) a montré que lorsque le ressaut hydraulique est formé, la valeur de ce paramètre ne dépasse pas 2,8.

L'étude expérimentale d'Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954) ont permis de déterminer les paramètres suivants:

1. En fonction de la valeur du nombre de Froude, l'écoulement est divisé en deux types. Si le nombre de Froude est inférieur à 1.83, des vagues déferlantes partielles sont obtenues ; et si le nombre de Froude est supérieur à 1.83, des vagues déferlantes sur toute la section du canal sont observées.
2. la valeur limite théorique de  $F_1 = 1.73$  pour les conditions de ressaut irrégulier et direct dans le canal rectangulaire sont très proches de la valeur de  $F_1 = 1.83$  obtenu pour ce canal. Par conséquent, la valeur du nombre de Froude un peu inférieur à 2 peut être considéré comme la limite entre les vagues déferlantes et non déferlantes indépendamment de la forme du canal.
3. Dans un canal rectangulaire, le nombre de Froude est suffisant pour décrire le type de l'onde, puisque seulement deux types sont possibles ; le ressaut irrégulier et direct. Dans un canal non

rectangulaire une division supplémentaire est nécessaire, puisque deux phénomènes complètement différents sont possibles ; le type de l'écoulement constitué des vagues ondulantes et des tourbillons dans le côté peu profond, c'est le ressaut hydraulique. la ligne de démarcation entre ces deux types d'écoulement est donnée soit par la valeur de  $G$  ou la valeur de  $dG/d(x/x_0)$  du côté peu profond. La condition de formation du ressaut est :  $G_m < 2.8$  ou  $dG/d(x/x_0) = 1 < 18.4$

4. Dans le cas de  $G_m$  est supérieur à 2.8, la longueur de retour latéral sur le côté peu profond augmente rapidement (si il ya une déviation par rapport à la forme rectangulaire) ; et elle devient infinie (si le canal est triangulaire).
5. La longueur du retour latéral sur le coté profond est toujours plus petite que celle sur le côté peu profond, elle augmente également par la diminution de la largeur du canal. Donc, la condition limite dans le canal rectangulaire est obtenue si la longueur des deux côtés du canal est la même.
6. La longueur du retour latéral sur le coté peu profond pour un ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire ( $F_1 > 1.83$  et  $G_m < 2.8$ ) est plus petite que la longueur du ressaut dans un canal rectangulaire.
7. Les conclusions 5 et 6 indiquent que le ressaut hydraulique dans une section non rectangulaire est plus efficace en tant que dissipateur d'énergie que dans une section rectangulaire.

## Chapitre III

# étude de compacité hydraulique en canal rectangulaire

## Etude de la compacité du ressaut hydraulique en canal rectangulaire

### III.1. Introduction

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse (*Forster et Skinde* (1950), *Achour* (1997)). Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau aval, de contrôler sa position lors des changements des paramètres de l'écoulement et contribuent enfin à une meilleure compacité du bassin amortisseur (*Bretz* (1987), *Hager et Li* (1992)).

Nous examinerons les travaux de *Debabeche* (2003), qui ont été consacrés à l'étude expérimentale de l'influence du seuil à paroi mince sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire.

L'objectif principal de ce chapitre est de déterminer l'effet de la compacité du ressaut hydraulique dans un canal à section droite rectangulaire sur les hauteurs conjuguées  $Y$ ; et de présenter des relations empiriques exprimant la variation du rapport  $Y=h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées, en fonction de nombre de Froude  $F_1$  et du facteur de compacité  $\gamma$  défini comme le rapport  $Lr^*/x$ .

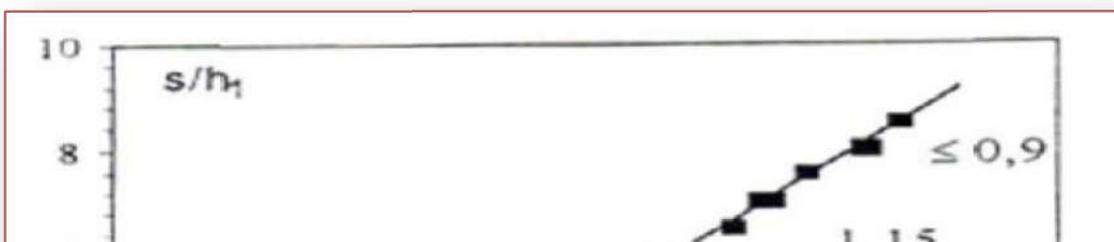
### III.2. Hauteur relative du seuil

La figure (3.1) montre la variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.

La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que la relation  $S= f (F_1)$  est quasi-linéaire pour chaque configuration du ressaut. Par ailleurs, pour une valeur donnée du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, la hauteur relative  $S$  du seuil diminue lorsque le rapport de compacité  $\gamma$  augmente. Pour chaque rapport de compacité  $\gamma$ , les points de mesures expérimentales s'ajustent par la méthode des moindres carrés, autre d'une droite d'équation  $S = a (F_1-1) + b$ .

La relation linéaire traduisant la variation de  $s/h_1$  en fonction de  $F_1$  et du rapport  $\gamma$  de compacité, est la suivant :

$$S= (1, 07-0, 29\gamma). (F_1-1)-0, 48 \text{ pour } 2, 5 < F_1 < 12 \quad (3.1)$$



**Figure 3.1** : variation de  $S/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité  $\gamma$  (■) 0,9, (◇) 1,15, (o) 1,45, (●) 1,93 (—) courbes d'ajustements.

### III.3. Rapport des hauteurs conjuguées

#### III.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées pour $\gamma \leq 0,9$

Pour une large gamme des nombres de Froude allant de 1,5 à 12, la mise en place d'un seuil mince à l'aval du bassin, à une distance  $x$  du seuil supérieur à la longueur  $L_r$  du rouleau, correspondant à une rapport de compacité  $\gamma \leq 0,9$ , n'a pratiquement aucune influence sur le rapport  $Y^*$  des hauteurs conjuguées du ressaut classique.

Afin de mettre en évidence cette influence, on s'intéresse aux configurations du ressaut contrôlé relatives aux rapports de compacité  $\gamma > 0,9$ .

#### III.3.2. Rapport des hauteurs conjuguées pour $\gamma > 0,9$

La figure 3.1 représente les points de mesures expérimentales et leurs ajustements. Les points de mesures expérimentales s'éloignent de la courbe théorique du ressaut classique selon Bélanger ( $\gamma \leq 0,9$ ), au fur et à mesure que le rapport de compacité  $\gamma$  augmente. Cet éloignement commence à se remarquer à partir de  $\gamma > 1,25$ .

Par ailleurs, pour chaque rapport  $\gamma$  de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme  $Y = a F_1 + b$ .

Le rapport de compacité  $\gamma$  :  $\gamma = L_r^*/x$  (3.2)

D'après le chapitre 1 Le nombre de Froude s'écrit :

$$F_1^2 = Q^2 / (g \cdot b^2 \cdot h_1^3) \quad (3.3)$$

D'après Hager et A1 (1990) :

$$\lambda r = -12 + 160 \cdot \text{Tgh}(F_1/20) \quad \text{pour } h_1/b < 0,1 \quad (3.4)$$

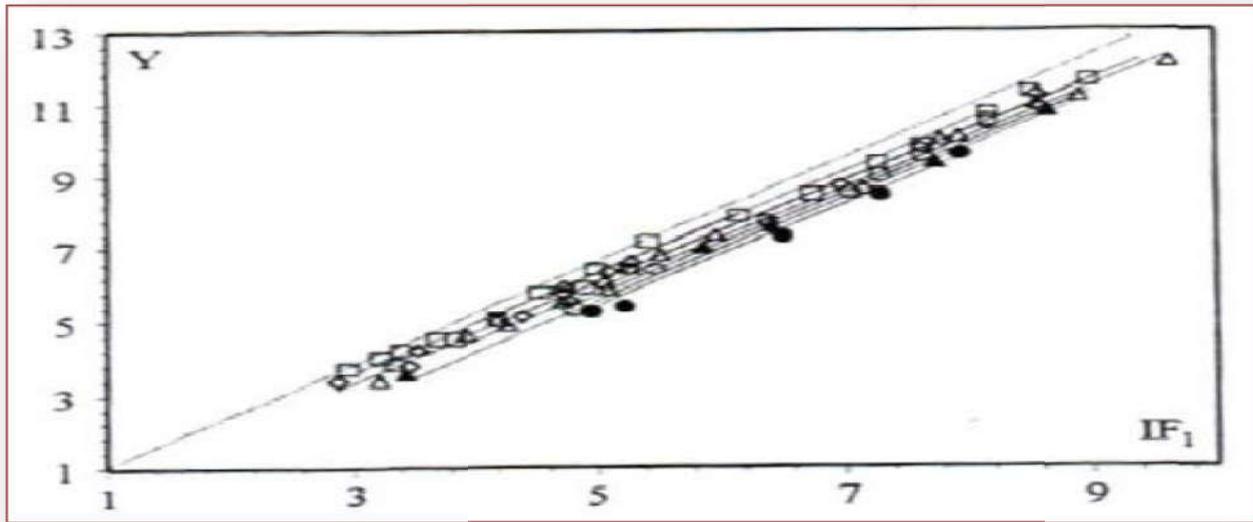
$$\lambda r = -12 + 100 \cdot \text{Tgh}(F_1/12.5) \quad \text{pour } 0,1 < h_1/b < 0,7 \quad (3.5)$$

$$\lambda r = Lr^*/h_1 \quad (3.6)$$

Donc on peut écrire :

$$Lr^*/h_1 = -12 + 160 \cdot \text{Tgh}(F_1/20) \quad \text{pour } h_1/b < 0,1 \quad (3.7)$$

$$Lr^*/h_1 = -12 + 100 \cdot \text{Tgh}(F_1/12.5) \quad \text{pour } 0,1 < h_1/b < 0,7 \quad (3.8)$$

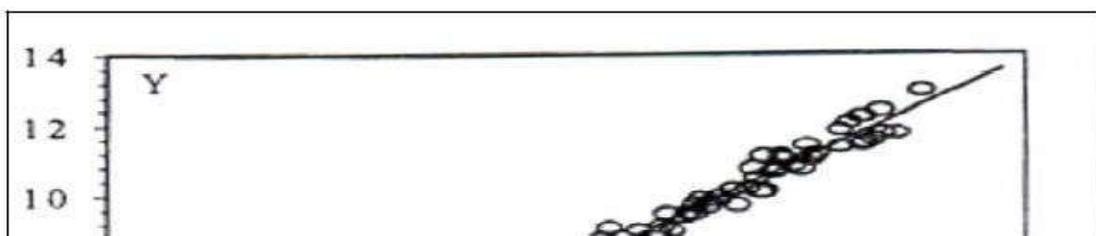


**Figure 3.2 :** variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité  $\gamma$  : ( $\square$ ) 1, ( $\diamond$ ) 1,15 ( $\Delta$ ) 1,3, ( $\circ$ ) 1,45, ( $\blacktriangle$ ) 1,6, ( $\bullet$ ) 1,93, (----) courbe théorique du ressaut classique selon Bélanger ( $\gamma \leq 0,9$ ). (—) Courbe d'ajustement.

Une relation unique de la forme  $Y = f(F_1, \gamma)$  est alors proposée, permettant de déterminer le rapport  $Y = h_2/h_1$  en fonction de nombre de Froude  $Fr_1$  de l'écoulement incident pour toutes les configurations du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal rectangulaire. Celle-ci s'écrit comme suit :

$$Y = 1.386 F_1 - \sqrt{2} \cdot \text{Ln}(\gamma) - 0.617 \quad \text{pour } 2.5 \leq F_1 \leq 11. \quad (3.9)$$

La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure (3.3).



**Figure 3.3** : Variation du rapport  $Y$  de hauteur conjuguées en fonction de  $(1.386.Fr_1 - \sqrt{2} \cdot \ln(\gamma) - 0,617)$ . (o) points expérimentaux. (—) droite d'équation :  $h_2/h_1 = 1.386.F_1 - \sqrt{2} \cdot \ln(\gamma) - 0,617$

#### III.4. Conclusion

Le troisième chapitre s'est intéressé, dans un premier temps, à la variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, pour une valeur donnée du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, la hauteur relative  $S$  du seuil diminue lorsque le rapport de compacité  $\gamma$  augmente. L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport  $S$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident suit une loi de type quasi-linéaire.

L'étude s'est intéressée, dans un second temps, à la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident. Il a été montré que pour chaque rapport  $\gamma$  de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme  $Y = a F_1 + b$ .

## Conclusion de la première partie

Cette première partie est entièrement consacrée à l'état des connaissances sur les

écoulements brusquement variés. Le ressaut hydraulique est défini comme une brusque transition d'un écoulement en régime torrentiel en un écoulement en régime fluvial, alors que le ressaut est utilisé pour la dissipation d'énergie dans des bassins de dissipation. A travers trois chapitres, on a essayé de présenter une synthèse bibliographique plus ou moins exhaustive, sur le ressaut classique et le ressaut contrôlé par seuil, dans deux types de profils de canaux prismatiques, à savoir : le canal rectangulaire et le canal trapézoïdal. 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 : Les hauteurs initiale et finale, la longueur du ressaut  $L_j$  et la longueur du rouleau  $L_r$ . On a commencé par l'équation de base, démontrée par Bélanger (1828) ; cette dernière est obtenue par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut classique. La détermination de la valeur du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement à l'amont du ressaut hydraulique, a permis à Bradley et Peterka (1957) de donner leurs classifications des différentes formes du ressaut. D'autres formes du ressaut, ont été abordées, à travers les travaux de Forster et Skrinde (1950), sur le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince et épaisse.

L'objectif du deuxième chapitre de cette étude, consiste à faire le point sur les travaux principaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. La détermination des caractéristiques du ressaut, a été souvent l'objectif principal des travaux entrepris par : Posey et Hsing (1938), Silvester (1964), Ohtsu (1976), et plus récemment ceux de Hager et Wanoschek (1989). Le cas du canal trapézoïdal est le plus général : par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du

ressaut, nous avons déterminé la relation des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et nous avons déduit le cas du canal rectangulaire et triangulaire. La même chose pour la détermination du rendement du ressaut, mais, pour ce cas, l'application du théorème de Bernoulli est nécessaire.

Le troisième chapitre de notre étude bibliographique, a permis de présenter l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire (compacité du ressaut), nous avons présenté l'étude de Debabeche (2003). L'objectif principal de cette étude est de trouver des relations empiriques exprimant la variation de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil ainsi que celle du rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées, en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et du facteur de compacité  $\gamma$  défini comme le rapport de la longueur du rouleau  $L_r^*$ .

conclusion générale

## CONCLUSION GENERALE

Notre étude présente une analyse expérimentale du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique. L'étude a pour but de déterminer expérimentalement l'influence du seuil sur les autres caractéristiques du ressaut.

Deux parties ont été nécessaires : la 1<sup>ère</sup> partie est la partie bibliographique qui se divise en deux chapitres :

La première partie a concerné les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond horizontal et trapézoïdal.

L'étude bibliographique a examiné dans un premier temps, les travaux de *Bradley et Peterka* (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de *Hager* (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. Le deuxième chapitre présente l'étude de *Wanoschek et Hager* (1989) sur le ressaut dénoyé dans un canal trapézoïdal, des relations seront données pour la quantification des longueurs caractéristiques du ressaut noyé se produisant dans canal rectangulaire et triangulaire ainsi que la longueur du ressaut dénoyé pour le canal trapézoïdal.

Le deuxième chapitre a concerné en deuxième lieu le ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire. Une étude a été proposée qui est celle d'*Alberto José et Rodriguez-Diaz* (1954).

Cette étude a été consacrée à l'évaluation par la voie de l'expérimentation des caractéristiques de la longueur et la profondeur du ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire.

L'expérimentation s'est intéressée, également, à évaluer le transfert de la quantité du mouvement latéral. Un paramètre généralisé pour mesurer le retour de cette quantité de mouvement est le rapport de la force de pression plus le débit de la quantité de mouvement aval dans une large bande de l'unité à celle en amont de la transition. *Alberto José Rodriguez-Diaz* (1954) a montré que lorsque le ressaut hydraulique est formé, la valeur de ce paramètre ne dépasse pas 2,8.

La deuxième partie a été consacrée à la position de la problématique et à la description des essais et à l'analyse expérimentale des résultats obtenus. A travers cette analyse nous avons proposé les relations fonctionnelles régissant le ressaut hydraulique, contrôlé par seuil mince, évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique. Un nombre suffisant des relations entre les différents paramètres du ressaut hydraulique, nous permettra, dans la pratique, de dimensionner notre bassin amortisseur.

# PRINCIPALES NOTATIONS

A1	L'aire de la section mouillée initiale [m <sup>2</sup> ]
A2	L'aire de la section mouillée finale [m <sup>2</sup> ]
A(x)	L'aire de la section mouillée correspondant à x [m <sup>2</sup> ]
b1	Base du canal trapézoïdal on amont [m]
Fr1	Nombre de Froude incident [-]
P1	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut [N]
P2	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut [N]
g	Accélération de la pesanteur [m.s <sup>-2</sup> ]
h1	Hauteur initiale du ressaut [m]
h2	Hauteur finale du ressaut [m]
h2*	Hauteur finale du ressaut classique rectangulaire [m]
h(x)	Profondeur de l'eau à la distance x du pied du ressaut [m]
Lr	Longueur du retour latéral du courant [m]
Lj	Longueur du ressaut [m]
Lr*	Longueur du rouleau classique rectangulaire [m]
Lj*	Longueur du ressaut classique rectangulaire [m]
m	cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale [-]
M	coefficient de forme [-]
Q	Débit volume [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
Re	Nombre de Reynolds [-]
s	Hauteur du seuil [m]
S	Hauteur relative du seuil [-]
V	Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiale et finale [m <sup>3</sup> ]
v1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale [m.s <sup>-1</sup> ]
v2	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale [m.s <sup>-1</sup> ]
x	Position de seuil [m]
X	Abscisse du profil de surface du ressaut hydraulique [-]
Y	Y=f(x) Ordonnée du profil de surface du ressaut hydraulique [-]
N	Viscosité cinématique [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
λj	longueur relative du ressaut [-]
λr	longueur relative du rouleau [-]
ω	Poids spécifique du liquide [N.m <sup>-3</sup> ]
ρ	Masse volumique du liquide [kg.m <sup>-3</sup> ]
γ	Compacité du ressaut =Lr/h <sub>1</sub> [-]

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achour, B., Debabeche, M., (2003), Control of Hydraulic jump by sill in a triangular channel, J. Hydraulic Research, Vol. 41, No. 3, pp. 97-103

Anderson, V., M. (1978). Undular hydraulic jump, Proc., ASCE, J. Hydraulic Division, Vol. 104(HY8), pp. 1185-1188, discussion 1979, 105 (HY9), 1208-1211, 1980,106(HY7), 1252-1254.

Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954

Argyropoulos, P., A., (1962), General solution of the hydraulic jump in sloping channels, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, Vol. 88, HY4, pp. 61-75.

Beiram, M., K., Chamani, M., R., (2006), Hydraulic Jumps in Sloping Channels: Sequent Depth Ratio, J. Hydraulic Engrg., vol 32(10), pp. 1061-1068.

Bradley, J.N., Peterka, A.J., (1957), The hydraulic design of stilling basins: Hydraulic jumps on a horizontal apron, paper 1401, proc. Amer. Soc. Civ. Engrs., J. Hydraulic. Division, Vol.83, HY5.

Cherhabil, S., (2010), Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à pente variable, Doctorat en sciences, Département de Génie Civil et Hydraulique, Université de Biskra.

Chow, V. T., (1958), Open channel hydraulics, McGraw-Hill, New York.

Chow, V.T., (1959), Open channel Hydraulics, McGraw Hill, New York, NY.

Debabeche, M., (2003), Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques, Doctorat d'état, Département d'Hydraulique, Université de Biskra.

Debabeche, M., (2008), Les écoulements brusquement variés, cours de 1ère année magister, photocopié, Université de Biskra.

Debabeche, M., Achour, B., (2007), Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel, J. Hydraulic Research Vol. 45, No. 1, pp. 135–139.

Debabeche, M., Cherhabil, S., Hafnaoui, A. et Achour, B. (2009), Hydraulic jump in a sloped triangular channel, Can. J. Civ; Eng. 36: 655-658 (2009).

Hager, W.H., Wanoschek, R (1989), Hydraulic jump in trapezoidal channel, J. hydraulic research, Vol. 27, 1989, N.3.

Hager, W.H., (1989), Hydraulic jump in U-shaped channel, Proc.ASCE, J. Hydraulic Engineering, 115, 667-675.

Hager, W.H., Bretz, N.V., (1988), Sill-controlled stilling basin, the international symposium on hydraulics for high dams, 273-280.

Hager, W.H., Sinniger, R., (1985,1986), Flow Characteristics of the hydraulic Jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise, J. Hydraulic Research, Vol. 23, pp. 101-113, 1985, Vol. 24, pp. 207-215, 1986.

Hager, W.H., Sinniger, R., (1987), Construction hydraulique, Ecoulement stationnaire, Edition suisse romande.

Hager, W.H., Wanoschek, R., (1987), Hydraulic Jump in Triangular Channel, J. Hydraulic Research, Vol. 25, Nr. 5, pp. 549-564.

Hachemi Rachedi, L., (2005), Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, Mémoire de magister en hydraulique, Département d'hydraulique, Université de Biskra.

Mc Corcodal, 1994, Journal of Hydraulic Research, VOL. 32, 1994, NO.1; 119-130.

Ohashi et al. (1973): Design of Combined Hydraulic Jump and Ski-Jump Energy Dissipator of Flood Spillway. XIII ICOLD Congress Madrid Q.41, R.19: 311-333.

Okada, A., et Aki, S. (1955). Experimental study of hydraulic jump on reversed slope apron. J. Tech. Lab., 5(6), Tokyo (in Japanese).

Pagliara, S. et peruginelli, A. 2000, Journal of Hydraulic Engineering/ November 2000/ 847-850.

Rajartnam, N. (1963): Discussion to "General Solution of the Hydraulic Jump in sloping Channels" by P.A. Argyropoulos. Proc. ASCE, J. Hydraulics Division 89(HY1) : 258-261.

Rajaratnam, N., (1965), Hydraulic Jump in horizontal conduit, Water Power, 17, pp. 80-83.

Rajaratnam, N., (1966), Hydraulic jump in sloping channel, J. irrigation and Power (India), 23(Apr): pp.137-149, Discussion, 1967, 24(Jump): pp.285-293.

Rajaratnam, N., (1967), Hydraulic jumps, Advances in Hydro science, Vol. 4, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York.

Rajaratnam, N., Murahari, V., (1971), A contribution to forced hydraulic jumps, J. Hydraulic Research, vol. 9, 217-239.

Rajaratnam, N., Subramania, K., (1967), Flow equation for the sluice gate, Proc. ASCE, J. Irrigation and Drainage Division, Vol. 93, IR3, 167-186.

Rajaratnam, N., Subramania, K., (1968, 1969, 1970), Profil of the hydraulic jump, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, vol. 94, 1968, HY3 663-673; vol. 95, 1969, HY1 546-557, HY2 725-727; vol. 96, 1970, HY2 579-581.

Rajaratnam, N., (2002), Hydraulic jump on corrugated beds, J. Hydraulic Engrg., Volume 128, Issue 7, 656-663.

Rand, W., (1957), An approach to generalised design of stilling basin, Trans. New-York, Academy of Sciences, Vol. 20(2), 173-191.

Rand, W., (1965), Flow over a vertical sill in an open channel, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, vol. 91, HY4 97-122.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique