

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

Université Mohamed Khider –Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil et Hydraulique

Référence :...../2018



جامعة محمد خيضر - بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية و الري

المرجع :...../2018

Mémoire de Master

2^{eme} année

Spécialité : Hydraulique

Option : Aménagement et ouvrage Hydraulique

THEME:

**Etude expérimentale des longueurs
caractéristiques du ressaut hydraulique
dans un canal trapézoïdale asymétrique**

Présenté par:

Merazga Yacine

Encadreurs:

Dr : Bjaoui Ali

Promotion Juin 2018

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Partie I

REVUE DE LA LITTERATURE

INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE	1
I. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE.....	2
I.1.Introduction.....	2
I.2. Définition et description du ressaut.....	2
I.3. Ressaut hydraulique classique.....	3
I.3.1. Classification du ressaut classique	3
a. Le pré – ressaut	4
b. Ressaut de transition	4
c. Ressaut stable	4
d. Ressaut agité ou clapoteux	5
I. 3.2. Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut	5
I. 3.3. Caractéristiques géométriques du ressaut.....	7
I.3.3.1. Hauteurs du ressaut	7
I.3.3.2. Longueur du rouleau	8
I.3.3.3. Longueur du ressaut	9
I.3.3.4. Rendement du ressaut	10
I.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire	13
I.4.1. Introduction	13
I.4.2.Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince (approche de Forster et Skinde,1950)	13
I.5. Conclusion	16
I.2. Ressaut dénoyé en canal trapézoïdal	17
I.2.1. Ressaut dénoyé en canal trapézoïdal symétrique.....	17
I.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	17
I.2.1.1.1 Cas particulier du canal rectangulaire.....	18
I.2.1.1.2. Cas particulier du canal triangulaire.....	18
I.2.1.2.Pertes de charges relatives.....	19
I.2.1.2.1 Cas du canal trapézoïdal.....	20
I.2.1.2.3. Cas du canal triangulaire	21

I.2.1.3. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	21
I.2.1.4. conclusion	22
I.2.2. Ressaut dénoyé en canal trapézoïdal asymétrique	23
I.2.2.1. Approche d’Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954 :	23
I.2.2.2. Analyse de la section totale.....	24
I.2.2.3. Analyse de bande longitudinale (volume de contrôle).....	25
I.2.2.4. Discussion des résultats.....	29
I.2.4. Conclusion.....	31
CONCLUSION A LA PREMIERE PARTIE	33
Partie II	
INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE.....	34
I.1. Introduction.....	34
I.2. Description du dispositif expérimental.....	34
I.3 Appareillage de mesures.....	39
I.3.1. Débitmètre à diaphragme	40
I.3.1.1 Technique de mesure de débit.....	40
I.3.1.2 Vérification de la validité de la relation (1.1).....	42
I.3.2. Limnimètre.....	43
I.4 Les seuils minces.....	44
II.3.4. Conclusion.....	45
II.4. ETUDE EXPERIMENTALE.....	49
II.4.1. Introduction.....	46
II.1. Introduction.....	46
II.1.2. procédé de détermination du débit volume Q.....	46
II.2.1. Procédure expérimentale	46
II.3. Analyse des résultats expérimentaux.....	47
II.3.1. Etude expérimentale de la variation des longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal trapézoïdal asymétrique contrôlé par seuil mince.	47
II.3.1.1. Variation de la longueur relative du ressaut L_j/h_1 en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident	47
II.3.1.2. Variation de la longueur relative du ressaut L_j/h_2 en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident	52

II.3.1.3. Variation de la longueur relative du ressaut L_r/h_1 en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident pour le coté plus profond.....	57
II.3.1.4. Variation de la longueur relative du ressaut L_r/h_1 en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident pour le coté peu profond.....	62
II.3.1.5. Variation de la longueur relative du ressaut L_r/h_2 en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident pour le coté plus profond:	67
II.3.1.4. Variation de la longueur relative du ressaut L_r/h_2 en fonction du nombre du Froude Fr_1 incident pour le coté peu profond:	71
III.3.3. Conclusion a la deuxième partie.....	76
Conclusion générale	
Références bibliographiques	
Principales notations	

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine des constructions hydrauliques, il est souvent question de restituer l'eau d'un ouvrage hydraulique vers un cours d'eau. Un ouvrage hydraulique, tel qu'un barrage, est muni d'un déversoir pour laisser passer les débits de crues que la retenue ne peut accumuler. Au pied de ce barrage se situe un bassin amortisseur, conçu pour être le siège de la dissipation d'énergie. Un changement de régime de l'écoulement intervient alors dans le dissipateur : à son entrée, le régime est torrentiel, à sa sortie il est fluvial ; cette transition s'appelle ressaut hydraulique. Pour contrôler et stabiliser la position dans le bassin, la disposition d'un seuil en travers de l'écoulement est souhaitable.

Le ressaut hydraulique a fait l'objet de nombreuses études, aussi bien théoriques qu'expérimentales. C'est surtout le canal rectangulaire qui a attiré l'attention de nombreux chercheurs, en raison sans doute de sa simplicité géométrique et de la facilité de sa mise en œuvre. L'expérimentation a montré qu'en règle générale, le ressaut est bien régi par l'équation de la quantité de mouvement quelque soit la forme du canal considéré. Cette équation a pour but de déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique évoluant dans des profils prismatiques tel que le canal rectangulaire.

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse **Forster et Skinde (1950); Achour (1997)**, continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative **Hager et Sinniger (1985)**. 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)**.

Récemment plusieurs chercheurs ont abordé la question du ressaut hydraulique d'un point de vue théorique et appliqué, les plus importants et les plus récents d'entre eux sont certainement **Hager et Sinniger (1990), Hager et Bretz (1987) et Rajaratnam (2002)** qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal, **Hager et Wanoschek (1987), Achour et Debabeche (2003) et Debabeche et Achour (2007)** dont les travaux sont relatifs au ressaut triangulaire horizontal. Par ailleurs, (**Rajaratnam, 1966; Mc Corcodal, 1994; Pagliara. S. et Peruginelli, 2000 ; Beiram et Chamani, 2006...**) ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné.

Pratiquement, on a besoin de déterminer les dimensions du bassin dissipateur pour donner une bonne configuration à ce dernier qui doit répondre aux exigences de l'écoulement. Ces dimensions sont liées physiquement aux caractéristiques du ressaut et à la forme géométrique de la section du canal dans lequel il évolue.

Toutes les études sont effectuées dans le domaine du ressaut hydraulique, pour aboutir à une meilleure configuration du bassin d'amortissement, tel que : la forme géométrique et le type d'obstacles, qui servent dans la plus part des cas à dissiper une grande partie de l'énergie cinétique dans le bassin. Donc, le choix de tel ou tel type se fait à la base des études expérimentales effectuées au laboratoire.

Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier expérimentalement le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique.

Notre présent mémoire comporte deux parties :

➤ La première partie est divisée en trois chapitres :

*Le premier chapitre consiste à passer en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique en canal rectangulaire, nous étudierons la classification effectuée par **Bradley et Peterka (1957)**. Nous citerons aussi les travaux de **Hager et Sinniger (1986)**, **Hager et al.(1990)** et ceux de **Forster et Skrinde (1950)** en deuxième lieu, nous examinerons les travaux les plus récents de **Debabeche (2003)** qui seront l'objet de base de notre étude bibliographique, sur le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal rectangulaire.

*Le deuxième chapitre concerne le ressaut hydraulique évoluant dans le canal de forme trapézoïdale autrement dit non rectangulaire. Ce chapitre sera divisé en deux sous chapitres. Le premier concerne le ressaut dans le canal trapézoïdal symétrique dont on exposera les travaux de **Hager et Wanocek (1989)** relatives à ce type de ressaut. Dans le deuxième sou-chapitre le ressaut hydraulique évoluant dans le canal trapézoïdal asymétrique sera exposé à travers les travaux de **José Vasquez Diaz(1954)**.

La deuxième partie de ce mémoire concerne notre étude expérimentale sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique. Notre objectif sera de déterminer expérimentalement des relations fonctionnelles permettant le calcul aisé des longueurs caractéristiques de ce type de ressaut.

Introduction à la première partie

Cette première partie consiste à passer en revue sur les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique. Ce phénomène hydraulique, a été l'objet de recherche de plusieurs hydrauliciens, étrangers et locaux. Ces chercheurs ont abouti à des résultats fiables, basés sur des essais effectués aux laboratoires, et ceci pour obtenir une parfaite structure des bassins d'amortissements.

Pour organiser notre travail, nous avons divisé la première partie en trois chapitres essentiels. Le premier chapitre est consacré à l'évaluation dans le temps du ressaut hydraulique. En premier lieu, nous avons abordé le ressaut hydraulique classique, évoluant en canal de section droite rectangulaire, de pente faible ou nul, et nous avons présenté l'équation de **Bélanger (1828)**, qui donne la relation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident. Ainsi les travaux de **Hager et al (1990)** et ceux de **Hager et Sinniger (1986)** font l'objet de la détermination des caractéristiques géométriques du ressaut.

Le deuxième chapitre à concerné le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince et les travaux de **Forster et Skrinde (1950)**.

Le troisième chapitre concerne le ressaut hydraulique évoluant dans le canal trapézoïdal symétrique et asymétrique.

I. Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

I.1. Introduction

Le ressaut hydraulique a fait l'objet de nombreuses études, aussi bien théoriques qu'expérimentales. C'est surtout le canal rectangulaire qui a attiré l'attention de nombreux chercheurs, en raison sans doute de sa simplicité géométrique et de la facilité de sa mise en œuvre. L'expérimentation a montré qu'en règle générale, le ressaut est bien régi par l'équation de la quantité de mouvement quelque soit la forme du canal considéré. Cette équation a pour but de déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique évoluant dans des profils prismatiques tel que le canal rectangulaire.

I.2. Définition et description du ressaut

Le ressaut hydraulique est une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement permanent, qui se produit lors du passage du régime torrentielle au régime 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 (Figure 1.1).

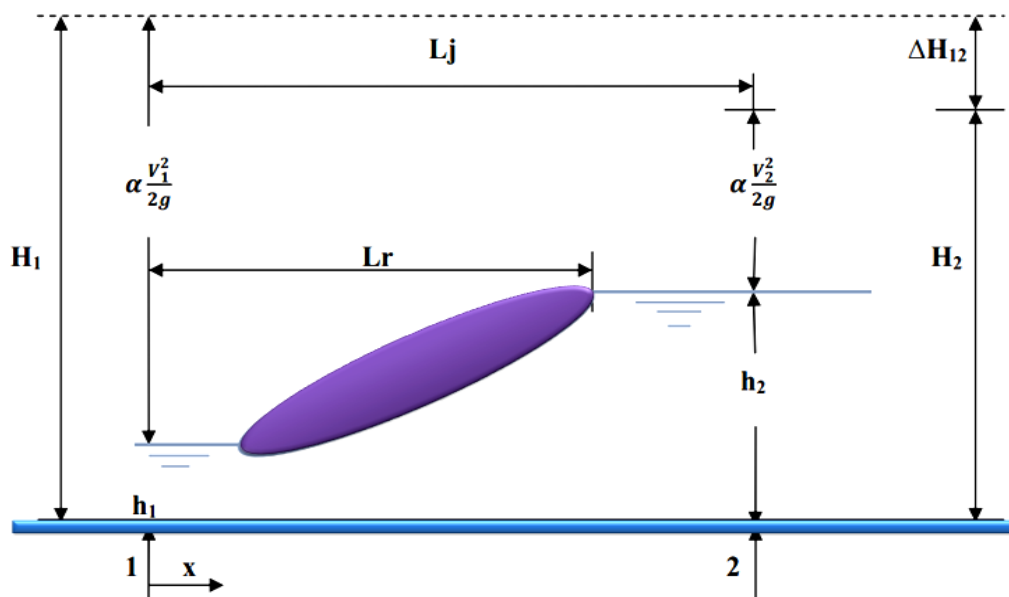


Figure 1.1: Schématisation d'un ressaut hydraulique avec les principales notations

Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal de section droite en rectangulaire de pente nulle ou faible.

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 h_1 et h_2 , appelées également hauteurs conjuguées.

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ses sections initiale et final. L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un nombre de Froude $Fr_1 > 1$ étroitement lié au débit volumique, 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 $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude Fr_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 changement des paramètres de l'écoulement tels que les débits et de contribuer enfin à une meilleure compacité du bassin.

I.3. 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.3.1. Classification du ressaut classique

Selon la classification proposée par **Bradley et Peterka (1957)**, le ressaut classique peut se présenter sous quatre configurations distinctes. Cette classification se base principalement sur la valeur du nombre de Froude Fr_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, en excluant les formes obtenues pour $Fr_1 < 1,7$. Ces dernières sont décrites par plusieurs auteurs tel que **Anderson (1978)** et ne répondent pas aux exigences d'un bassin de dissipation d'énergie ; les ressauts correspondants sont dits ondulés présentant tantôt une surface libre régulièrement perturbée et lisse ($1 < Fr_1 < 1,4$), tantôt une surface libre irrégulièrement ondulée ($1,4 < Fr_1 < 1,7$) (Figure 1.2.a).

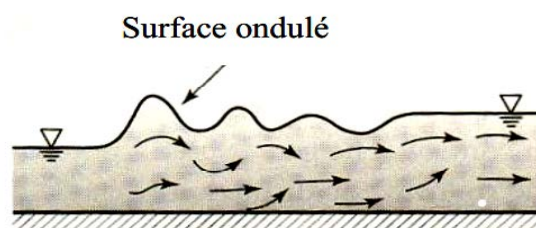


Figure 1.2.a : Ressaut ondulé

Selon la classification de **Bradley et Peterka (1957)** on distingue quatre configurations de ressaut :

a. Le pré – ressaut : Il est obtenu pour la gamme $1,7 < Fr_1 < 2,5$ (Figure 1.1.b). La surface du ressaut est composée d'une série de petits rouleaux pour $Fr_1 = 1,7$; ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude Fr_1 augmente. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible.

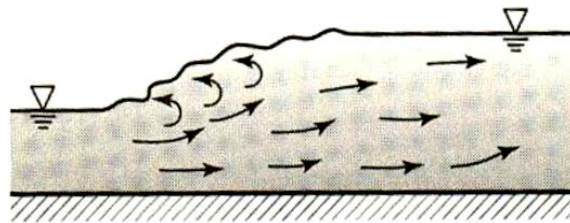


Figure 1.2.b : Le pré-ressaut

b. Ressaut de transition : Le ressaut de transition est obtenu pour la gamme $2,5 < Fr_1 < 4,5$ (Figure 1.2.c). 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.

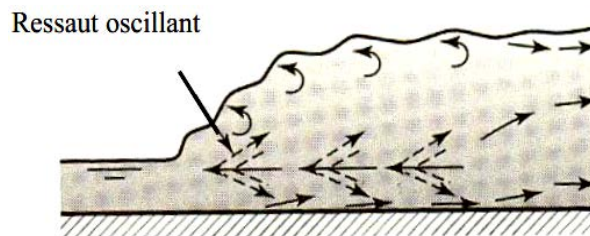


Figure 1.2.c : Le ressaut de transition

c. Ressaut stable : Il est obtenu pour la gamme $4,5 < Fr_1 < 9$ (Figure 1.2.d). 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.

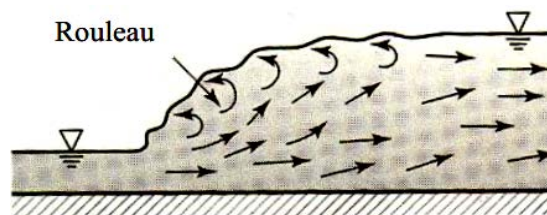


Figure 1.2.d : Le ressaut stable

d. Ressaut agité ou clapoteux : Obtenu pour $Fr_1 > 9$ (Figure 1.2.e). Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très grande. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.

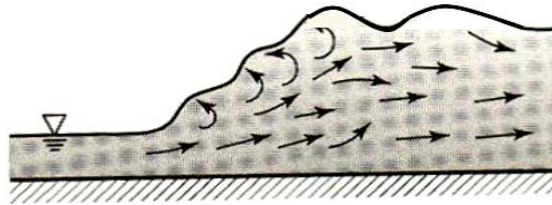


Figure 1.2.e : Le ressaut clapoteux

I. 3.2. 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 ΔH_{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 1.3)

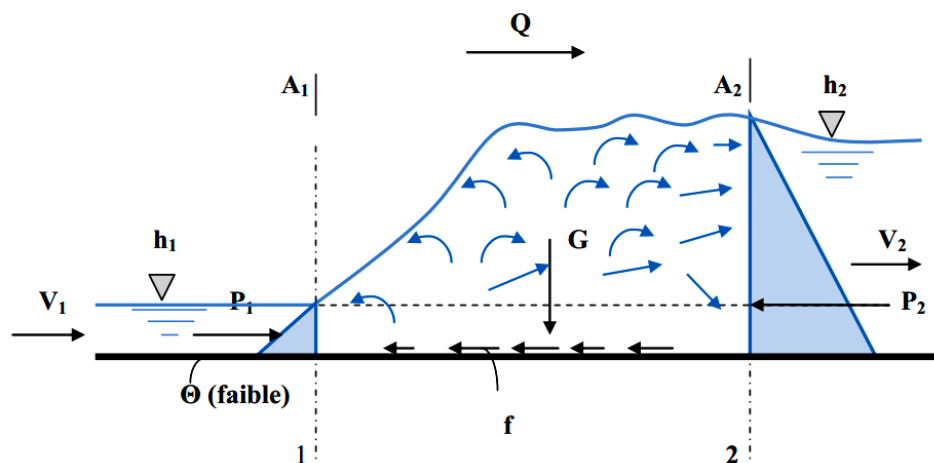


Figure 1.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut

L'équation de continuité permet d'écrire :

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} \quad (1.1)$$

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

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

D'après le résultat classique dû à **Bélangier (1828)** qui s'obtiendra en appliquant le théorème *d'Euler* qui ne fait intervenir que les forces extérieures et qui ne met pas en cause les pertes de charges dues à la turbulence et aux remous intérieurs. Donc l'auteur a appliqué ce théorème à la masse liquide contenue entre les sections (A_1) et (A_2) et a supposé :

- la répartition des pressions dans les sections (A_1) et (A_2) est hydrostatique.
- les frottements sur les parois et le fond du canal le long de la faible distance séparant (A_1) et (A_2) sont négligeables par rapport à la perte de charge due à la turbulence créée par le ressaut.
- les vitesses des différents filets liquides dans chacune des sections (A_1) et (A_2) sont parallèles à la vitesse moyenne V , et considérées uniformes.
- la résistance de l'aire est négligeable.

Donc l'application de la deuxième loi de *Newton* nous donne :

$$\beta_2 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_2 - \beta_1 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_1 = P_1 - P_2 + G \cdot \sin\theta - f \quad (1.3)$$

Où :

β : Facteur de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité

Puisque la répartition des vitesses est supposée uniforme.

ρ : la masse volumique du liquide en mouvement.

Q : débit volume.

V : vitesse d'écoulement.

g : accélération de la pesanteur.

G : poids de la tranche liquide située entre 1 et 2.

P_1 et P_2 : forces des pressions hydrostatiques.

θ : angle d'inclinaison du canal (pour un ressaut classique $\theta = 0^\circ$)

f : force de frottement (considérée comme négligeable).

En tenant compte de tous ces paramètres la relation (1.3) s'écrit :

$$\frac{1}{2} \bar{\omega} \cdot b \cdot h_1^2 + \rho \cdot Q \cdot V_1 = \frac{1}{2} \bar{\omega} \cdot b \cdot h_2^2 + \rho \cdot Q \cdot V_2 \quad (1.4)$$

Le nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut évoluant dans un canal rectangulaire s'écrit.

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{g \cdot b^2 \cdot h_1^3} \quad (1.5)$$

Après avoir introduire les relations (1.1), (1.2) et (1.5) dans la relation (1.4) on obtiendra :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (1.6)$$

Et en fin on a abouti à l'équation de **Bélangier (1828)**, liant le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut au nombre de Froude F_1 , en réalité c'est une équation d'une droite représentée par la figure (1.4).

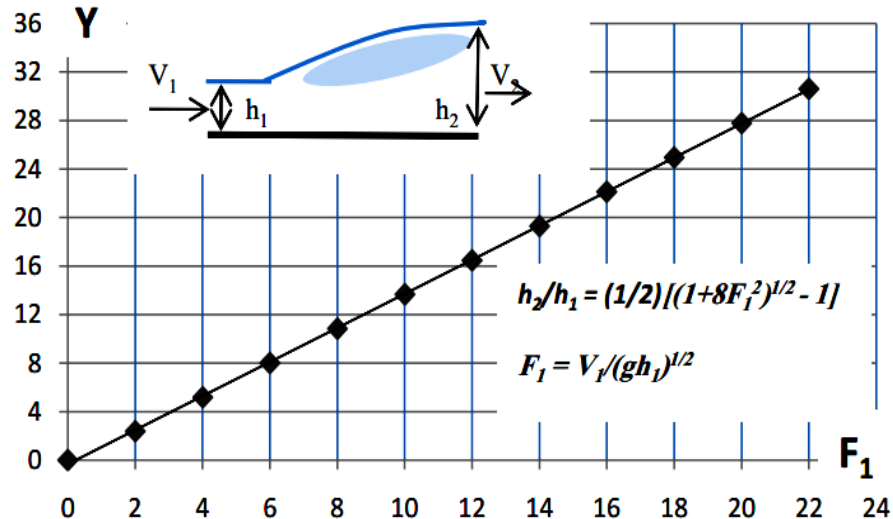


Figure 1.4 : Représentation graphique de l'équation de Bélangier (1828)

Hager et Sinniger (1986), ont donné une relation plus simple que la relation (1.6), et applicable pour un nombre de *Froude* $F_1 > 3$.

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2} \quad (1.7)$$

I. 3.3. Caractéristiques géométriques du ressaut

Les caractéristiques géométriques du ressaut sont définies ci-dessus, hauteur du ressaut h , L_r et L_j ces dernières sont très difficiles à déterminer. En effet, il est généralement délicat de définir la fin du ressaut. Dans ce cas les auteurs ont employé la voie expérimentale pour évaluer ces grandeurs.

I.3.3.1. Hauteurs du ressaut

La hauteur du ressaut a été définie comme étant égale à : $h = h_2 - h_1$ (1.8)

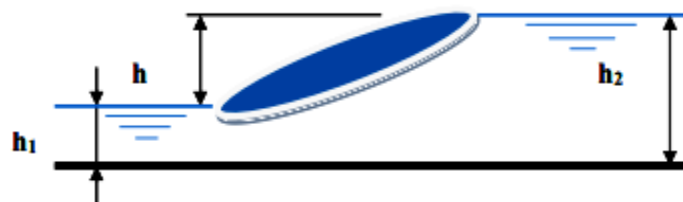


Figure 1.5 : Hauteur du ressaut

I.3.3.2. Longueur du rouleau

En 1990 Hager *et al* définissent deux types de longueur du rouleau tous dépendent de forme du ressaut étudié. En effet, ils ont introduit la notion de longueur du rouleau développé et non développé. La figure (1.6) illustre ces deux types du ressaut et les longueurs L_r qui correspondent.

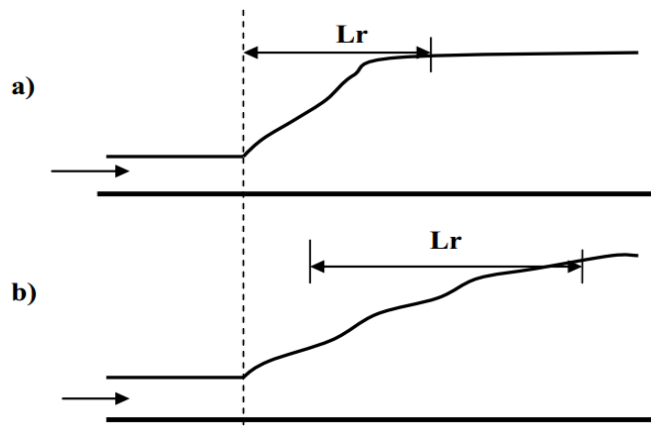


Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique :

a) Rouleau développé, b) Rouleau non développé

Le rouleau développé présente une surface relativement lisse et est caractérisée 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.

Le rouleau non-développé se caractérise 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.

Les essais effectués par Hager *et al.* (1990) indique que, pour le cas du ressaut classique, le rapport $\lambda_r^* = L_r^* / h_1$ dépend du nombre de Froude Fr_1 et du rapport d'aspect $w = h_1/b$. Les auteurs proposent les relations suivantes:

$$\lambda_r^* = -12 + 160 \operatorname{Tgh}(Fr_1/20) \quad \text{pour } w = h_1/b < 0,1 \quad (1.10)$$

$$\lambda_r^* = -12 + 100 \operatorname{Tgh}(Fr_1/12,5) \quad \text{pour } 0,1 < w < 0,7 \quad (1.11)$$

« *Tgh* » désigne la tangente hyperbolique.

Les auteurs notent que pour $Fr_1 < 8$, les relations (1.10) et (1.11) peuvent être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

$$\lambda_r^* = L_r^* / h_1 = 8 \cdot (Fr_1 - 1,5) ; \quad 2,5 < Fr_1 < 8 \quad (1.12)$$

I.3.3.3. Longueur du ressaut

Il résulte de ce qu'on a dit précédemment que le ressaut se produit toujours au cours du passage d'un régime torrentiel à un régime fluvial. La longueur L_j est la caractéristique du ressaut la plus difficile à déterminer, mais on estime que cela est possible que si :

- la surface libre est pratiquement horizontale.
- la surface de turbulence du rouleau est faible.
- les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.
- l'écoulement graduellement varie apparaît à l'extrémité aval du rouleau.

Pratiquement, pour calculer les dimensions du bassin d'amortissement, on considère comme limite d'aval du ressaut le point à partir duquel le revêtement du béton n'est plus 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 comme suit :

$$L_j^* / h_1 = 220 \cdot Tgh \left[(Fr_1 - 1) / 22 \right] \quad (1.13)$$

D'après **Hager et al. (1990)**, la variation de la longueur relative $\frac{L_j}{h_2}$ en fonction du nombre de Froude Fr_1 montre que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à 6 pour une gamme pratique $4 < Fr_1 < 12$.

$$L_j^* / h_2^* = 6 \quad (1.14)$$

D'autres formules ont été proposées, pour un canal de section droite rectangulaire, selon **Carlier (1980)** on a :

- formule de **Smetana (1933)** $L_j = 6(h_2 - h_1)$

$$(1.15)$$

Pour un nombre de *Froude* au-delà de $Fr_1 = 3$ selon **Sinniger** et **Hager (1985)**, on peut également appliquer la formule empirique suivante.

$$\frac{L_j}{h_2} = \frac{35\sqrt{F_1}}{(8+F_1)} \quad (1.16)$$

Et qui conduit aux mêmes résultats.

I.3.3.4. Rendement du ressaut

Le ressaut provoque une importante dissipation d'énergie mécanique ; ce phénomène est irréversible. Les caractéristiques de la turbulence sont très complexes et dépendent fortement des conditions à l'amont.

Par l'application du théorème de **Bernoulli (1738)** on peut déterminer la perte d'énergie, $\Delta H_{12} = H_1 - H_2$ produite par le ressaut en admettant que $Z_1 = Z_2$ (canal horizontal), (figure 1.7), on obtient :

$$\Delta E_{12} = \Delta H_{12} = \left(\alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \right) - \left(\alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \right) \quad (1.17)$$

D'où : la charge totale dans la section amont est :

$$H_1 = \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \quad (1.18)$$

Et la charge totale dans la section aval est :

$$H_2 = \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \quad (1.19)$$

On désigne par : V_1 et V_2 les vitesses moyennes qui correspondent aux sections amont et aval du ressaut et le facteur de correction de l'énergie cinétique α est admis égale à l'unité.

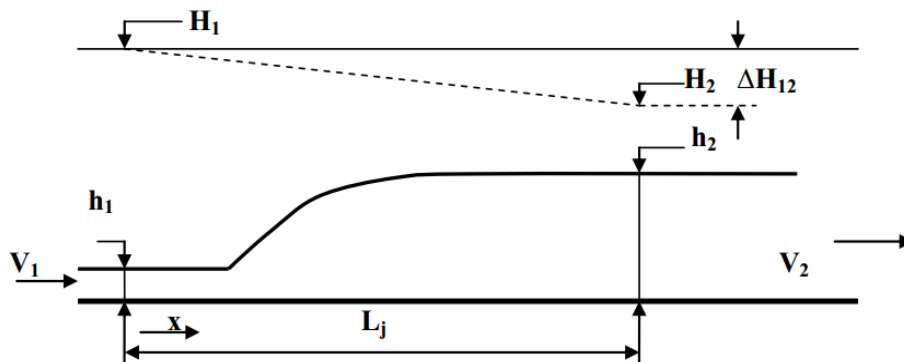


Figure 1.7 : (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

Puisque l'écoulement est permanent l'équation de la quantité de mouvement nous donne :

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (1.20)$$

Où : $A_1 = b \cdot h_1$

$$A_2 = b \cdot h_2$$

Donc on introduisant la relation (1.18) dans (1.15) on obtient, tous calcul faits, l'expression classique de la perte de charge due au ressaut en canal rectangulaire de pente faible ou nul.

$$\Delta H_{12} = (h_1 - h_2) + \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) \cdot \left(\frac{q^2}{2g} \right) \quad (1.21)$$

$q = \frac{Q}{b}$, est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'expression de la quantité de mouvement définie par la relation (1.4).

$$\frac{q^2}{2g} = \frac{(h_1 \cdot h_2^2 + h_1^2 \cdot h_2)}{4} \quad (1.22)$$

On remplaçant la relation (1.20) dans (1.19) on obtient :

$$\Delta H_{12} = \frac{(h_2 - h_1)^3}{(4h_2 \cdot h_1)} \quad (1.23)$$

Donc à partir de la relation (1.21) on peut conclure la perte de charge due au ressaut classique et ne dépend que des hauteurs conjuguées. La capacité de dissipation du ressaut est représentée par η :

$$\eta = \frac{\Delta H_{12}}{H_1} = \frac{(H_1 - H_2)}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (1.24)$$

Le rapport $\frac{H_2}{H_1}$ est appelé efficacité du ressaut. Donc pour déterminer les charges totales dans les sections amont et aval on utilise les relations (1.16) et (1.17) et en tenant compte de la relation (1.5) du nombre de Froude on obtiendra :

$$H_1 = h_1 \cdot \left[1 + \frac{F_1^2}{2} \right] \quad (1.25)$$

$$H_2 = h_1 \cdot \left[Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right] \quad (1.26)$$

Où Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par la relation (1.6) de **Bélangier (1828)**.

En remplaçant (1.23) et (1.24) dans l'expression du rendement du ressaut (1.22) on obtiendra :

$$\eta = 1 - \left[\frac{\left(Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right)}{\left(1 + \frac{F_1^2}{2} \right)} \right] \quad (1.27)$$

Hager et Sinniger (1986) ont proposé une expression approchée qui nous permet de calculer simplement le rendement du ressaut est cela pour un nombre de Froude $Fr_1 > 2$.

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2 \quad (1.28)$$

Les relations (1.27) et (1.28) sont représentées graphiquement sur un système des coordonnées cartésiennes, illustrés par la figure (1.8)

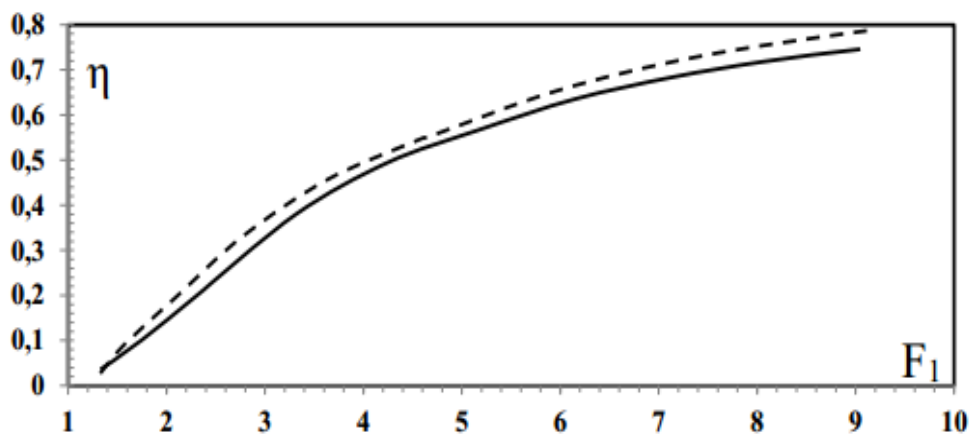


Figure 1.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude Fr_1 (—) Courbe tracée selon la relation (1.25), (-----) courbe tracée Selon la relation (1.26)

D'après l'analyse de la courbe $\eta = f(Fr_1)$ nous constatons que le rendement η du ressaut classique est supérieur à 50 % pour une valeur de nombre de Froude $Fr_1 \geq 5.1$ et que les rendements calculés par l'application de la relation (1.26) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.25) d'autre par; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

I.7.5. Profil de surface généralisée dans un canal rectangulaire :

Le profil d'un ressaut hydraulique classique à aussi été mesure par de nombreux chercheurs. A partir de mesures expérimentales de Murzyn & Chanson (2009) et de Chachereau & Chanson (2011), Chanson(2011) à propose la loi auto similaire suivante :

$$\frac{h - h_1}{h - h_2} = \left(\frac{x - x_1}{Lr} \right)^{0.441}$$

Ou h , h_1 , h_2 sont respectivement la profondeur, la profondeur juste en amont ressaut, la profondeur à la fin du rouleau et x , x_1 et L_r sont respectivement l'abscisse de point profondeur h , l'abscisse du début du ressaut et la longueur du rouleau. Il s'agit du profil moyen de la surface libre, celle-ci étant en fait fortement fluctuante. L'écart type de ces fluctuations de profondeur a aussi été mesuré (Murzyn et Chanson (2009)), (Chachereau & Chanson (2011)), (Chanson(2011)). Un profile proche du profile expérimental a également été calculé par (Valiani, 1997).

Selon les essais de Rajaratnam et Subramanya et Schröder, la représentation adimensionnelle du profile de surface est possible si $3.5 < F_1 < 10$ et $h_1 > 0.05m$. Selon Schröder, on introduit

$$X = \frac{x}{L_r}, \quad f = \frac{h-h_1}{h_2-h_1}$$

Ou x est la coordonnée longitudinale avec origine au pied du ressaut.

La figure (2.1) permet la détermination du profile de la surface $h(x)$, en supposant que h_1 , h_2 et L_r sont connus. A cause des ondes se surface et de la forte turbulence, la surface réelle de ressaut n'est pas une ligne précise et unique. Des fluctuations temporelles caractérisent la surface sur toute la longueur de ressaut.

I.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire

I.4.1. Introduction

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse (**Forster et Skinde, 1950**), continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative (**Hager et Sinniger, 1985**). 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**).

L'analyse dimensionnelle montre que la relation liant :

- le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.
- la hauteur géométrique s du seuil.
- la hauteur initiale h_1 du ressaut.
- la hauteur h_2 à l'amont immédiat du seuil.
- la position X du seuil comptée à partir du pied du ressaut.
- la profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval du seuil.

I.4.2. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince (*approche de Forster et Skrinde, 1950*)

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* Fr_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 1.9).

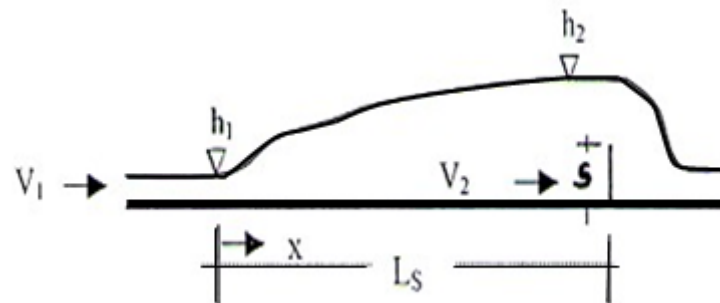


Figure 1.9: Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

Le seuil de hauteur s est dénoyé et fonctionne comme un déversoir ; la profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval n'a ainsi aucune influence sur le débit franchissant le seuil. Cette condition est satisfaite lorsque :

$$h_3 < h_2 - 0,75.s \quad (1.27)$$

La figure (1.10) montre la variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident, pour les valeurs 3, 5 et 10 de la position relative X/h_2 du seuil.

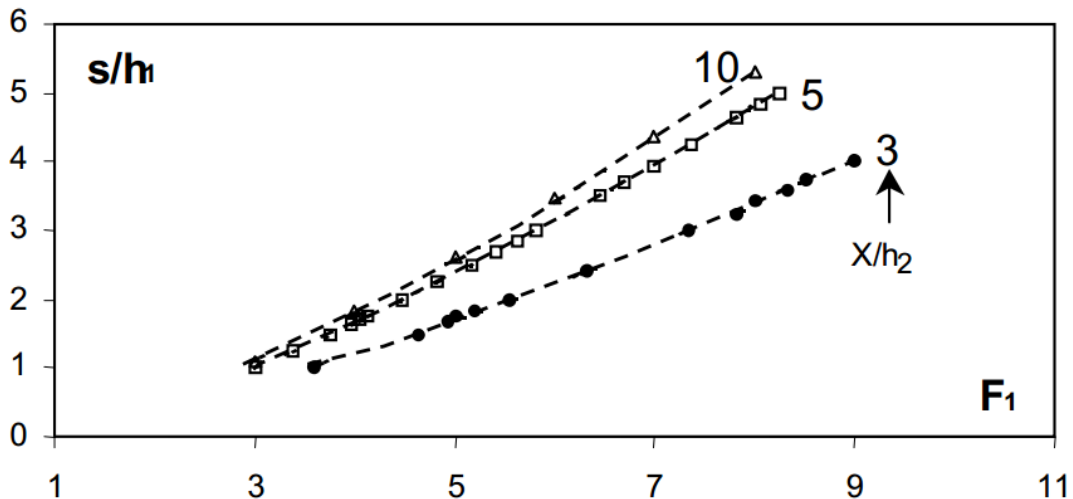


Figure (1.10): Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative X/h_2 du seuil (Forster et Skinde, 1950).

La figure 10 montre que tout point du diagramme est représenté par la paire de coordonnées $(Fr_1, s/h_1)$. Lorsque les valeurs de ces coordonnées sont définies, le diagramme permet de déterminer le paramètre X indiquant l'emplacement du seuil. Si le point défini par $(Fr_1, s/h_1)$ se situe :

- entre deux courbes du diagramme, la valeur de la position relative X/h_2 doit être déterminée par interpolation.
- au-dessus de l'une des courbes du diagramme, le seuil de hauteur s est trop haut et le ressaut peut se déplacer vers l'amont sous l'influence du seuil.
- au-dessous de l'une des courbes du diagramme, le seuil est trop bas et le ressaut peut se déplacer vers l'aval en laissant place à un écoulement torrentiel sur le radier du bassin amortisseur.

On peut également constater que pour l'ensemble des valeurs du nombre des Froude Fr_1 , les courbes expérimentales obtenues se rapprochent les unes au fur et à mesure que le rapport x/h_2 augmente et pour x/h_2 compris entre 5 et 10, la hauteur relative s/h_1 du seuil ne subit pas de grandes variations. En pratique, on considère que la position relative x/h_2 du seuil est approximativement égale à 6.

I.5. 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 Fr_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 Fr_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 $Y^* = f(Fr_1)$ 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 $S = s/h_3$ du seuil en fonction du nombre de Froude Fr_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.

I.2. Ressaut dénoyé en canal trapézoïdal

I.2.1. Ressaut dénoyé en canal trapézoïdal symétrique

I.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:

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

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

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

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

Les 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) à 5 variables est réduite à 3 variables ($F_1^2; M, Y$):.

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

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° ; 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 $h_2 = Y h_1$

I.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 (1.31) 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

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

I.2.1.1.2. Cas particulier du canal triangulaire

En remplaçant dans l'équation (1.30):

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

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.

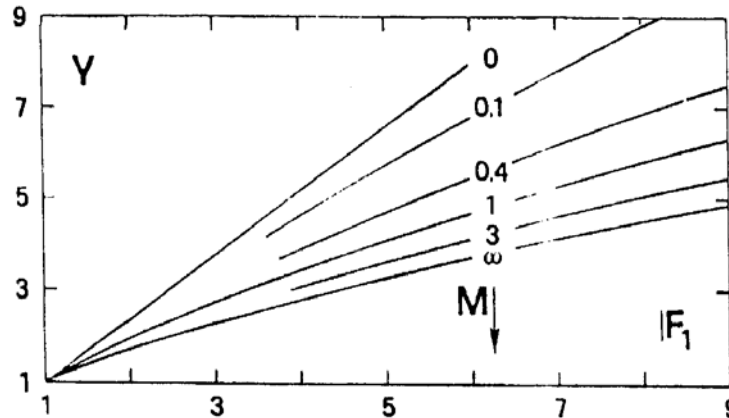


Figure 2.1: variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de nombre de Froude et de la hauteur relative M . $M = 0$: Profil rectangulaire. $M \rightarrow \infty$: Profil triangulaire. $0 < M < \infty$: Profils trapézoïdaux

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

I.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 ΔH 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 ΔH à la charge initiale

$$H_1 \eta = \frac{\Delta H}{H_1}$$

η appelée par fois l'efficacité d'un ressaut hydraulique.

$$\begin{aligned} H_1 &= h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \\ H_2 &= h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

I.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:

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2 (b+2mh_1)}{g (bh_1+mh_1^2)^3}$$

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.

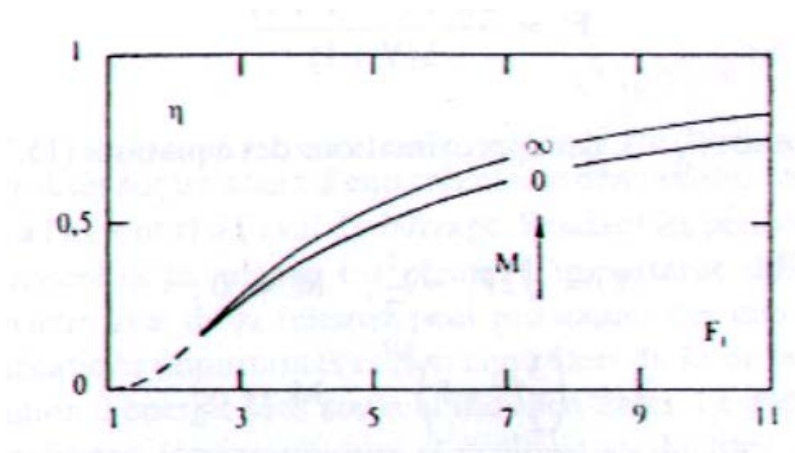


Figure 2.3 efficacité, $\eta = \frac{\Delta H}{H_1}$, en fonction de Froude Fr_1 pour les profils rectangulaire ($M = 0$) et triangulaire ($M \rightarrow \infty$)

I.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

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

I.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 η 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 η aussi grande que possible. Pourtant, il existe des raisons pratiques qui conduisent normalement à exclure les profils triangulaires.

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

Les différences de longueur en fonction de σ 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.

I.2.1.4. conclusion

Dans ce deuxième chapitre on a présenté 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.

I.2.2. Ressaut dénoyé en canal trapézoïdal asymétrique

I.2.2.1. 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 (2.4).

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.

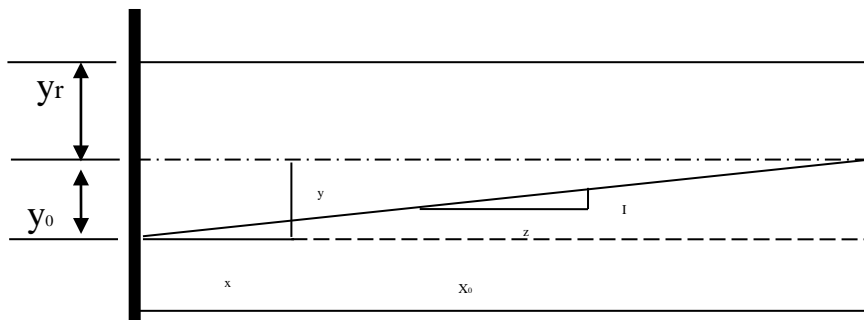


Figure (2.4) : Section transversale du canal

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

X_s : Longueur du retour latéral sur le côté peu profond du canal

X_d : Longueur du retour latéral sur le côté 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

$$\Psi = P + M / At \cdot \frac{y_0}{2}$$

$$At = \frac{x_0 y_0}{2} \text{ Surface du triangle (Air d'apparition du ressaut)}$$

$$\Phi = y_r / y_0$$

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

$$F_1 = \text{Nombre de Froude}$$

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.

I.2.2.2. 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 :

$$P + M = \frac{1}{2} x_0 y_r^2 \gamma + \frac{1}{2} x_0 y_0 \gamma (y_r + y_0/3) + \varphi Q^2 / x_0 y_r + \left(\frac{1}{2} x_0 y_0\right) \quad (2.16)$$

La forme adimensionnelle :

$$\Psi = \phi^2 + \phi + \frac{1}{3} + \Theta / (1 + 2\phi) \quad (2.17)$$

D'après l'équation de la quantité de mouvement, ψ_1 (amont) = ψ_2 (aval) :

$$\phi_1^2 + \phi_1 + \frac{1}{3} + \Theta / (1 + 2\phi_1) = \phi_2^2 + \phi_2 + \frac{1}{3} + \Theta / (1 + 2\phi_2) \quad (2.18)$$

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

La solution de Φ_2 pour des valeurs données de Φ_1 et Θ a été réalisée graphiquement en traçant ψ par rapport à ϕ pour une valeur donnée de Θ .

Une série de courbes de ψ par rapport ϕ a été construite, chaque courbe représente une valeur différente de Θ .

D'après ces courbes, la valeur correcte de ψ peut être déterminée pour donner la valeur de ϕ et de Θ , puisque la valeur est la même pour les sections amont et aval.

I.2.2.3. 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.

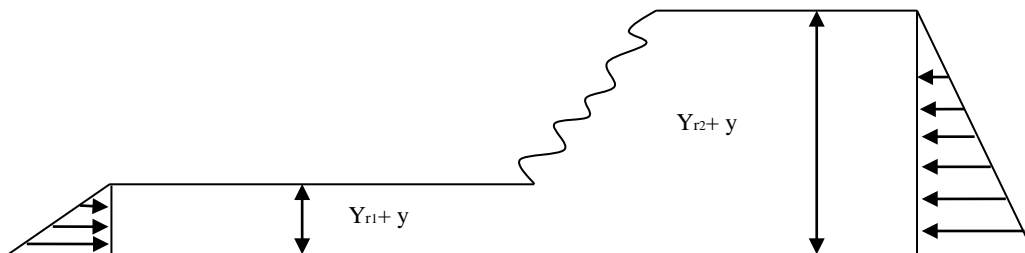


Figure (2.5) : Section de la bande longitudinale

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

$$\frac{1}{2} \gamma (y_{r1+y})^2 + v_1^2 (y+y_{r1}) = \frac{1}{2} \gamma (y_{r2+y})^2 + v_2^2 (y+y_{r2}) \quad (2.19)$$

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

$$\begin{aligned} P + M/\gamma y_o^2 &= \frac{1}{2} (y/y_o + \phi_1)^2 + \Theta (y/y_o + \phi_1) / (1+2\phi_1)^2 \\ &= \frac{1}{2} (y/y_o + \phi_2)^2 + \Theta (y/y_o + \phi_2) / (1+2\phi_2)^2 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Pour l'équilibre

$$(P+M)_{s1} = (P+M)_{s2} \quad (2.21)$$

On a :

$$G = (P+M)_{s2} / (P+M)_{s1} \quad (2.22)$$

$M=1$ pour l'équilibre

$M>1$ pour P+M déficience en amont

$M<1$ pour P+M surplus en amont

De la géométrie :

$$y/y_0 = 1 - x/x_0 \quad (2.23)$$

Remplaçant (3.8) dans (3.5) :

$$\frac{1}{2} (1-x/x_0 + \phi_1)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_1) / (1+2\phi_1)^2 = \frac{1}{2} (1-x/x_0 + \phi_2)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_2) / (1+2\phi_2)^2 \quad (2.24)$$

Remplaçant (3.9) dans (3.7) :

$$G = \frac{\frac{1}{2} (1-x/x_0 + \phi_2)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_2) / (1+2\phi_2)^2}{\frac{1}{2} (1-x/x_0 + \phi_1)^2 + \Theta (1 - x/x_0 + \phi_1) / (1+2\phi_1)^2} \quad (2.25)$$

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 $x/x_0=1$

$$G_m = \frac{\frac{1}{2} \phi_2^2 + \Theta \phi_2 / (1+2\phi_2)^2}{\frac{1}{2} \phi_1^2 + \Theta \phi_1 / (1+2\phi_1)^2} \quad (2.26)$$

Les valeurs de G par rapport à ϕ pour les différentes valeurs de Θ sont illustrées dans la figure (2.6).

D'une manière similaire

$$\frac{dG/d(x/x_0)}{x/x_0} = 1 = G(\phi_2 - \phi_1) / \phi_1 \phi_2 \tag{2.27}$$

Les valeurs $\frac{dG/d(x/x_0)}{x/x_0} = 1$ sont tracés en fonction de ϕ_1 pour les différents valeurs de Θ (Figure 2.7).

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.

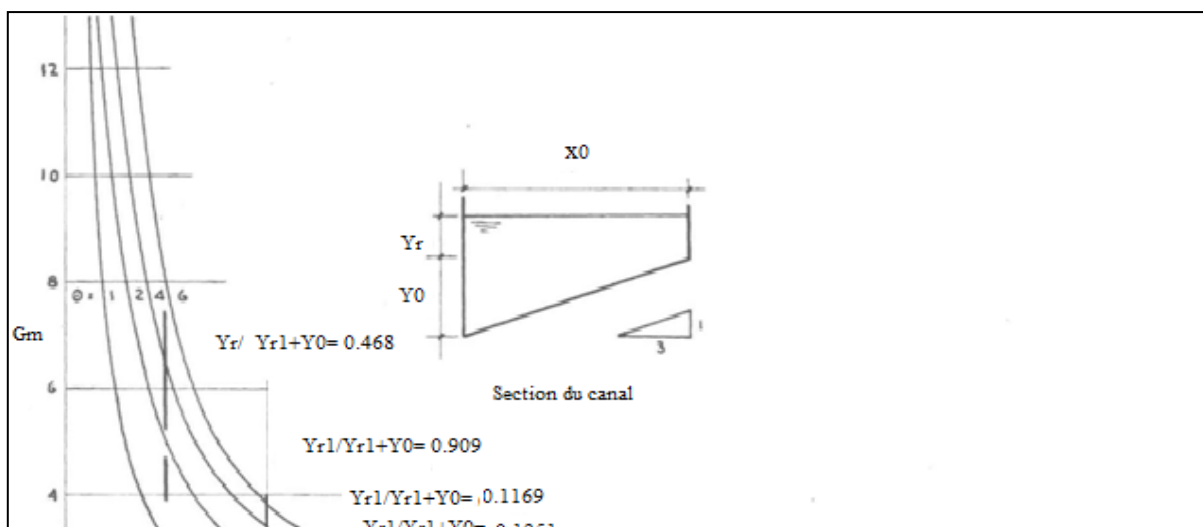


Figure 2.6 : Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté peu profond

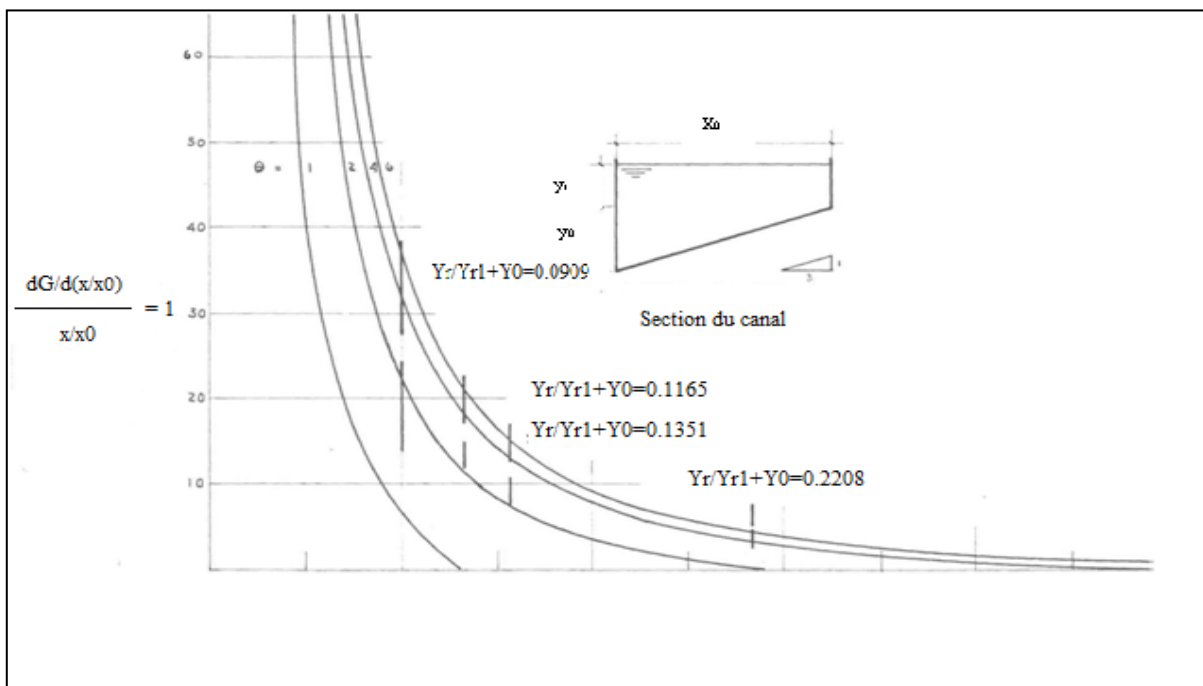


Figure 2.7 : Diagramme adimensionnel du taux de changement de M sur le côté peu profond

I.2.2.4. Discussion des résultats

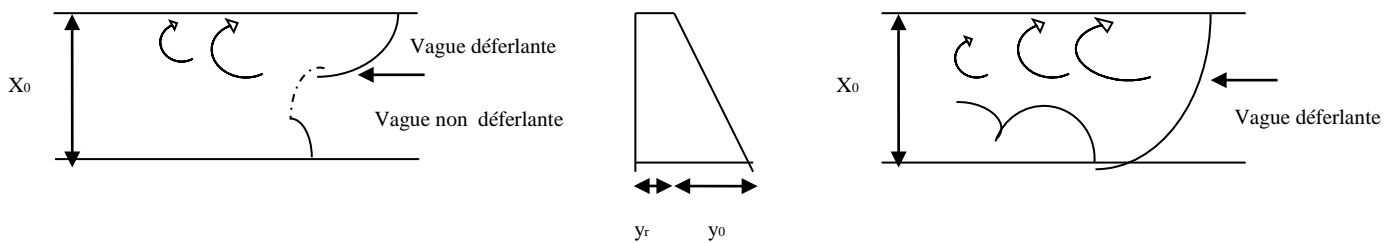
Il existe deux types différents d'écoulement :

- 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).

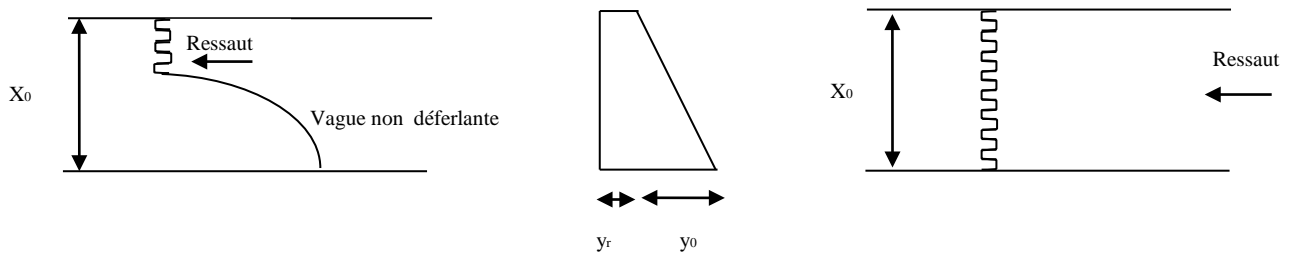
Les critères utilisés pour analyser les deux types de l'écoulement observés sont qu'un certain transfert latéral de la quantité de mouvement est nécessaire pour obtenir une onde perpendiculaire ; dans le cas où ce retour latéral de la quantité de mouvement ne peut pas être fourni, aucun ressaut hydraulique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

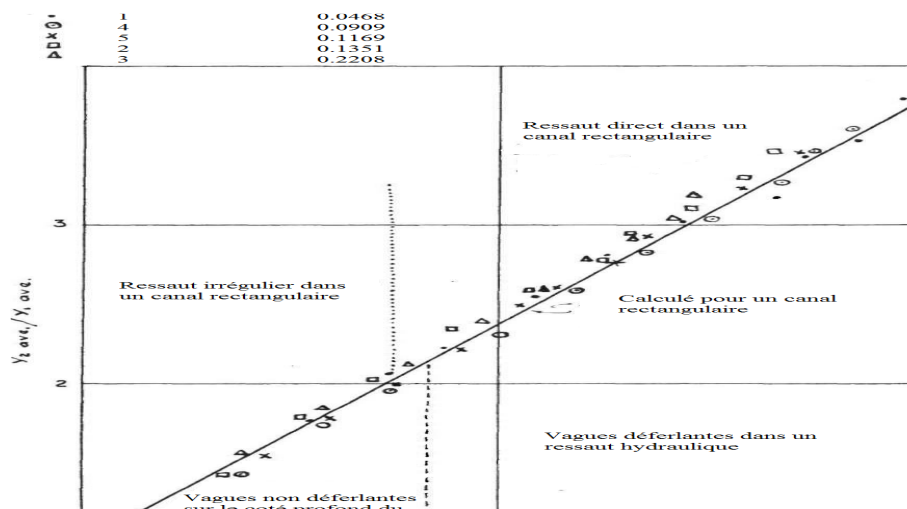


Figure (2.9) : Rapports de profondeur moyenne en fonction de numéro de Froude

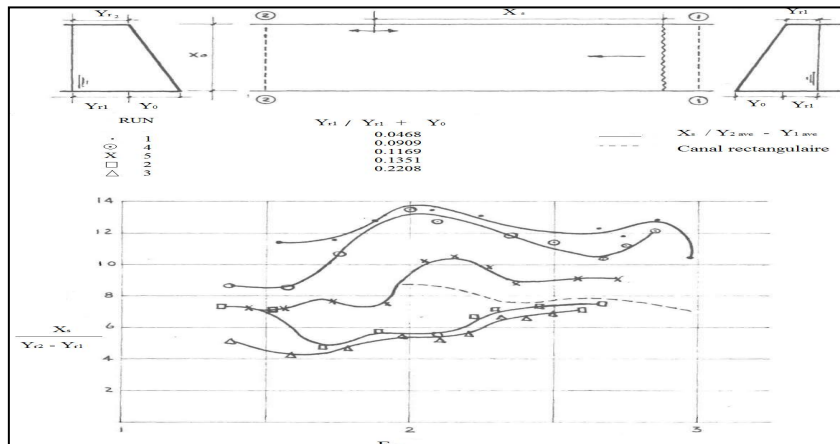


Figure (2.10): Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral du côté peu profond

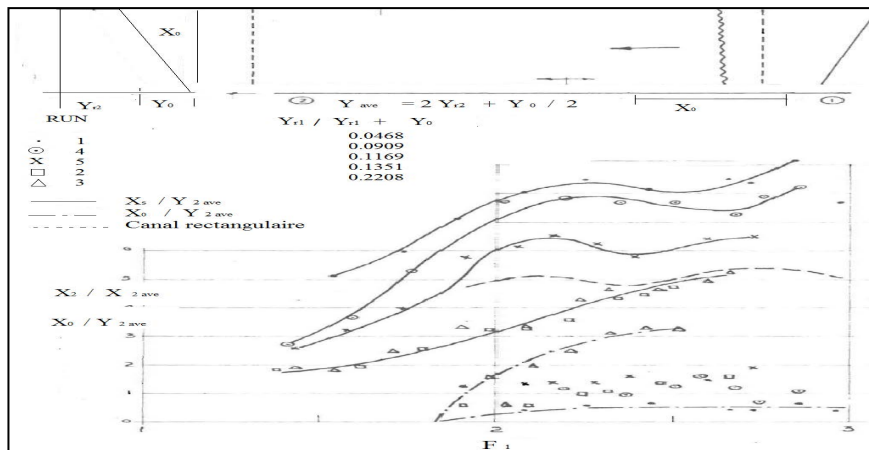


Figure (2.11) : Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral des deux côtés du canal

La valeur du nombre Froude légèrement inférieur 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 (2.10), 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 (2.11) 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 (2.10)(2.11).

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 (2.10), 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.4. Conclusion

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 de 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 Rodríguez-Díaz (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 Rodríguez-Díaz (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 $Fr_1 = 1.73$ pour les conditions de ressaut irrégulier et direct dans le canal rectangulaire sont très proches de la valeur de $Fr_1 = 1.83$ 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 côté 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 côté 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.

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^{ère} 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 de 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, évaluant 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.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alberto, J., Rodriguez-D. (1954), The hydraulic jump in non rectangular open channel. Thesis of master of science in civil engineering. Faculty of the graduate division, Georgia institute of technologie.
- Silveter, R., (1964), The hydraulic jump in al shapes of horizontal channel. Journal of hydraulic Division, ASCE(HYI), 23-55.
- Rajaratnam, N. (1967), Hydraulic jumps. Advances in Hydrosience. Vol.4. Academic Press, New York, 197-280.
- Sinniger, R.O., Hager, W.H., (1988), Ecoulement stationnaire, Presses Polytechniques Romandes, 439P.
- Andersen J, V. M., (1978). Undular hydraulic jump, Proc, ASCE, j, Hydraulics Division, Vol. 104, pp. 1185-1188.
- Bakhmeteff, B. A., Matzke, A E, (1936). The Hydraulic Jump terms of dynamic similarity, Transactions, American society of civil engineers, Vol.101, pp, 630-647.
- Belanger, J.B., (1828). Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes, Carilian-Goeury, Paris.
- Bradley, J. N., Peterka, A. J., (1957). The hydraulic design of stilling basins, Hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I), paper 1401; High dams, earth dams, and large canal structures (Basins II), paper 1402; short stilling basins for canal structures, small outlet works, and small spillways (Basin III), paper 1403; stilling basin and wave suppressors for canal structures, outlet works and diversion dams (Basin IV), paper 1404; stilling basin with sloping; apron (Basin V), paper 1405; small basins for pipe or open channel outlets no tail water required (Basin VI), paper 1406, Proceedings, American Society of Civil Engineers, J. hydraulics division, vol. 83, No.HY5.
- Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Debabeche, M., Achour, B., (2007). Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel. Journal of Hydraulic Research, Vol. 45(1), pp. 135-139.
- Forster, J. W. and Skrinde, R. A., (1950). Control of Hydraulic jump by sills, Trans. ASCE, 115, 973-1022.
- Hager, W., Bremen R., H., et Kawogoshi N. (1990). Classical hydraulic jump; length of roller, J. Hydraulic research 28(5), 591-608.
- Hager, W. H., Li, D., (1992). Sill-controlled Energy Dissipator, J. Hydraulic research, vol.30, n°2, 165-181.

Références bibliographiques

Rajaratnam, N., (1964), Discussion to Silvester (1964) Journal of Hydraulic Division, ASCE 90(HY4), 341-350.

Rajaratnam, N., (1967). Hydraulic jumps, Advances in hydrosience, 4: 197-280, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York, N.Y.

Silvester, R. (1964). Hydraulics Jump in all Shapes of Horizontal Channels, Proc.ASCE, J. Hydr.Divi., 90, 23-55.

Wanoschek, R., Hager, W. H., hydraulic jump in trapezoidal channel, j. hydr. Research, Vol. 27, 1989, 429-446.

Zaid, Z., (1967).effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. Mémoire de Magister, département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

Principales notations

PRINCIPALES NOTATIONS

A_1	L'aire de la section mouillée initiale	$[m^2]$
A_2	L'aire de la section mouillée finale	$[m^2]$
$A(x)$	L'aire de la section mouillée correspondant à x	$[m^2]$
b	Base du canal trapézoïdal	$[m]$
Fr_1	Nombre de Froude incident	$[-]$
P_1	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	$[N]$
P_2	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	$[N]$
g	Accélération de la pesanteur	$[m.s^{-2}]$
h_1	Hauteur initiale du ressaut	$[m]$
h_2	Hauteur finale du ressaut	$[m]$
h_2^*	Hauteur finale du ressaut classique rectangulaire	$[m]$
\bar{h}	Profondeur du centre de gravité de la section mouillée par rapport à la surface libre de l'écoulement	$[m]$
L_r	Longueur du retour latéral du rouleau	$[m]$
L_j	Longueur du ressaut	$[m]$
L_r^*	Longueur du rouleau ressaut classique	$[m]$
L_j^*	Longueur du ressaut classique	$[m]$
m	cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du trapèze par rapport à l'horizontale	$[-]$
Q	Débit volume	$[m^3.s^{-1}]$
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	$[m^3]$
v_1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	$[m.s^{-1}]$
v_2	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	$[m.s^{-1}]$
x	Position de seuil	$[m]$
X	Position relative de seuil	$[-]$
Y^*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	$[-]$
Y_s	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil	$[-]$
ν	Viscosité cinématique	$[m^2.s^{-1}]$
λ_j	longueur relative du ressaut	$[-]$
λ_r	longueur relative du retour latéral du courant	$[-]$
$\bar{\omega}$	Poids spécifique du liquide	$[N.m^{-3}]$
ρ	Masse volumique du liquide	$[kg.m^{-3}]$
η	Rendement du ressaut	$[-]$