

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des sciences appliquées

Département d'Hydraulique et Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Hydraulique

Spécialité : Ressource hydraulique

Thème

Approche théorique de l'effet de la rugosité sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans les canaux prismatique

(Rectangulaire, triangulaire, trapézoïdale)

Présenté par :

Medakene Romaissa

Bakki Adila

Soutenu Publiquement le : 02 /06/ 2018

Devant le jury :

MECHRI.L	MCB	UKMO	Président
ELFERGOGUL.M	MCB	UKMO	Examineur
KATEB.S	MCA	UKMO	Encadreur

Année universitaire 2017/2018

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier mon docteur le Dr. KATÉB Samir, qui n'a pas, à aucun moment, arrêté de prodiguer ses judicieux conseils ni ménager ses efforts pour prêter aide et assistance pour rendre plus aisé mon travail pour l'achèvement du mémoire.

Mes remerciements vont également au Dr. MECHRI.L pour avoir accepté de m'honorer par sa présence en qualité de président de jury.

Je remercie aussi le Dr. ELFERGOGUI pour avoir accepté l'honneur par leur présence dans leur qualité de membre de jury et de juger de la soutenabilité de mon mémoire de mastère.



DÉDICACE

Quoi que de plus que de pouvoir partager les meilleurs moments de sa vie avec Les êtres qu'on aime.

Arrivé au terme de mes études, j'ai le grand plaisir de dédier ce modeste Travail à:

- *L'être le plus cher de ma vie; ma mere.*
- *Toute les enseignants de l'hydraulique*
 - *Ma famille Medakene et bakki.*
 - *Toute ma famille.*
- *Mes amis B.Djamila , A. Widad , B. Warda*
- *Me collègue de ressource hydraulique*
 - *K.Saber et B.M.Sherif*

- *Tous ceux que j'aime et je respecte.*

Medakene.R / Bakki.A

PRINCIPALES NOTATIONS

A	Aire d'une section	[m ²]
a _o	Ouverture d'une section	[m]
b	Largeur du canal	[m]
C _r	Coefficient de résistance	[-]
d, D	Diamètres	[m]
ε	Rugosité absolue des parois du canal	[mm]
F	Force de pression	[N]
F _R	Force de résistance	[N]
F ₁ , IF ₁	Nombre de Froude à l'amont du ressaut	[-]
g	Accélération de la pesanteur	[m/s ²]
h	Profondeur d'écoulement	[m]
\bar{h}	Profondeur du centre de gravité de la section mouillée	[m]
h _c , k	Profondeur critique	[m]
h ₁	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h ₂	Hauteur finale du ressaut	[m]
h ₂ [*]	Hauteur final de ressaut classique.	[m]
H	Charge totale	[m]
H _c	Charge critique	[m]
ΔH	Perte de charge due au ressaut	[m]
L _B	Longueur du bassin	[m]
L _{RF}	Longueur du rouleau de fond	[m]
L _S	Position du seuil par rapport au début du ressaut	[m]
L _j	Longueur du ressaut	[m]
L _r	Longueur du rouleau	[m]
L _j [*]	Longueur du ressaut classique	[m]
L _r [*]	Longueur du rouleau classique	[m]
M	Désigne la hauteur relative initiale du ressaut M= mh ₁ /b	[-]
m	Cotangente de l'angle d'inclinaison d'un talus	[-]
P	Pression	[N/m ²]
Q	Débit volume	[m ³ /s]
Q [*]	Débit relatif	[-]
q	Débit unitaire	[m ² /s]
R _h	Rayon hydraulique	[m]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
s	Hauteur d'un seuil	[m]
S	Hauteur relative d'un seuil	[-]
S _F	Hauteur relative d'un seuil d'un ressaut forcé	[-]
V	Vitesse d'écoulement	[m/s]
v ₂ [*]	Vitesse d'écoulement de ressaut classique.	[m/s]
x	Coordonnée longitudinale	[m]
X	Position d'un seuil [m], coordonnée relative longitudinale	[-]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées	[-]
Y [*]	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
y, Z	Coordonnée verticale adimensionnelle	[-]
y ₁	hauteur relative amont du ressaut (h ₁ /D)	[-]
y ₂	hauteur relative aval du ressaut (h ₂ /D)	[-]
α	Facteur de corrélation de l'énergie cinétique	[-]
ζ	Coefficient de perte de charge	[-]
γ	Rapport (facteur) du ressaut contrôlé	[-]
δ	Perte de charge relative (ΔH/h _c)	[-]
φ	Profondeur relative (h/h _c)	[-]
η	Rendement du ressaut	[-]
η [*]	Rendement du ressaut classique	[-]
λ	Longueur relative	[-]
λ _B	Longueur relative du bassin	[-]
λ _S	Position relative du seuil	[-]
ρ	Masse volumique	[Kg/m ³]
ω	Poids spécifique	[N/m ³]

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

PREMIERE PARTIE

Etude BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	1
Chapitre I : RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE	
I.1 Introduction.....	2
I.2 ressaut hydraulique classique.....	3
I.2.1 Forme du ressaut classique.....	3
I.2.2 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	4
I.2.3 Longueurs caractéristiques du ressaut.....	6
I.2.3.1 Longueur du rouleau	6
I.2.3.2 Longueur du ressaut.....	7
I.2.4 Rendement du ressaut	8
I.3 Conclusion	10
Chapitre II : RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRIANGULAIRE	
II.1 Introduction	11
II.2 Ressaut hydraulique classique	11
II.2.1 Approche de Hager et Wanoschek.....	11
II.2.1.1 Rapport des hauteurs conjuguées	12
.....	
II.2.1.2. Équation de quantité de mouvement.....	14
II.2.1.3. Longueur caractéristique du ressaut.....	16
II.2.1.4. Profil de surface généralisé du ressaut	18
II.3	19
Conclusion.....	
Chapitre III : RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOIDALE	
III.1 Introduction... ..	20
III.2 APPROCHE DE HAGER ET WANOSCHEK (1989).....	20
III.2.1. Généralité.....	20
III.2.2. Description des essais.....	20

III.2.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	20
III.2.4. Longueurs caractéristiques du ressaut	23
III .2.4.1. longueur du rouleau de fond.....	23
III .2.4.2. Longueur du ressaut.....	24
III.2.5. Rendement du ressaut	25
III.2.6. Description du ressaut	26
III.3.Conclusion	27
CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE.....	28

DEUXIEME PARTIE

APPROCHE THEORIQUE

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE.....	29
Chapitre IV : APPROCHE THEORIQUE EN CAS DE CANAL TRAPEZOIDALE	
IV.1.Introduction.....	30
IV.2. Equation de la quantité de mouvement	30
IV.3.conclusion.....	33
Chapitre V : APPROCHE THEORIQUE EN CAS DE CANAL TRAINGULAIRE	
V.1.Introduction.....	34
V.2. Analyse théorique.....	34
V.3.Conclusion.....	39
Chapitre VI : APPROCHE THEORIQUE EN CAS DE CANAL RECTANGULAIRE	
VI.1.Introduction.....	40
VI.2. Analyse théorique.....	40
VI.3.Conclusion.....	44
CONCLUSION DE LA PARTIE THEORIQUE.....	45
CONCLUSION GENERALE.....	46

LISTE DES FIGURES ET LE TABLEAU

Chapitre I

PREMIERE PARTIE

Figure 1.1 :	Forme du ressaut classique selon la classification de BRADLEY et PETERKA (1957).	4
Figure 1.2 :	Ressaut hydraulique classique.....	4
Figure 1.3 :	Aspect du ressaut classique.....	6
Figure 1.4 :	Ligne de charge totale le long du ressaut classique.....	8
Figure 1.5 :	Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude.....	9

Chapitre II

Figure 2.1 :	Ressaut en canal semi-triangulaire selon HAGER et WANOSCHEK (1987)	11
Figure 2.2 :	Variation du nombre de Froude IF_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et de la hauteur relative M.....	13
Figure 2.3 :	Variation des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut triangulaire ($m=1$) en fonction du nombre de Froude IF_1 , selon HAGER et WANOSCWEK (1987).....	16
Figure 2.4 :	Longueur relative L_r/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de nombre de Froude IF_1 , selon HAGER et WANOSCHEK (1987).....	17
Figure 2.5 :	Longueur relative L_j/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude IF_1 , selon HAGER et WANOSCHEK (1987).....	17
Figure 2.6 :	Profil de surface généralisé $y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ($m=1$), selon Hager et Wanoschek (1987)	18

Chapitre III

Figure 3.1 :	Ressaut hydraulique classique.....	20
Figure 3.2 :	Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M	22
Figure 3.3 :	schéma de définition	23
Figure 3.4 :	caractéristique principale du rouleau de fond	23
Figure 3.5 :	longueur relative λ_j du ressaut en fonction de F_1 et de M	24
Figure 3.6 :	Ligne de charge totale le long du ressaut classique	25
Figure 3.7 :	Rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude.....	26
Figure 3.8 :	Illustration schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal.....	26

Chapitre IV

DEUXIEME PARTIE

- Figure 4. 1: Ressaut contrôlé par seuil dans un canal trapézoïdal à fond e parois rugueux. 30
- Figure 4.2 : Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut.... 31
- Figure 4.3 : Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut..... 32

Chapitre V

- Figure 5. 1: Ressaut contrôlé par un seuil un canal triangulaire à parois rugueux..... 34
- Figure 5.2 : Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut... 35
- Figure 5.3 : Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut..... 36

Chapitre VI

- Figure 6. 1: Ressaut contrôlé par un seuil un canal rectangulaire à fond rugueux..... 40
- Figure 6.2 : Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut.... 41
- Figure 6.3 : Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut..... 42



Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les ouvrages de retenue, tels que les barrages hydrauliques, sont souvent soumis à de fortes crues. Dans les 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 caractère érosif. Afin d'éviter d'importantes modifications du lit de la rivière situé à l'aval du barrage, il serait 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.

Le ressaut hydraulique est dit classique, lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente faible ou nulle. Il peut également être contrôlé ou forcé par un seuil mince ou épais, continu ou discontinu, disposé dans le canal en travers de l'écoulement. Le seuil peut être noyé ou dénoyé, à paroi mince ou épaisse.

Le ressaut est dit contrôlé, lorsqu'il se forme entièrement à l'amont du seuil. Il est dit forcé, lorsqu'il se forme de part et d'autre du seuil.

Le seuil a pour rôle de provoquer prématurément la formation du ressaut et de contrôler sa position surtout lors de changement de débit.

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.

Ces dernières années, le ressaut hydraulique a fait l'objet de nombreuses recherches fondamentales et appliquées. Les recherches expérimentales ont d'abord confirmé que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. C'est en d'autres termes la seconde loi de Newton qui est appliquée, annonçant que la variation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut est égale à la résultante des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement.

L'application de la quantité de mouvement a eu pour but d'évaluer le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude incident IF_1 caractérisant l'écoulement à l'amont. La relation la plus simple est celle obtenue par BELANGER pour le cas du ressaut classique en canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible et dont la validité a été vérifiée par plusieurs auteurs.

La longueur minimale du bassin amortisseur correspond en règle générale à la longueur L_j du ressaut défini comme étant la longueur au-delà de laquelle aucune protection du bassin n'est

nécessaire. Dans cette section la profondeur h_2 du ressaut correspond à la hauteur finale du ressaut. Aucun développement théorique n'a pu mener à l'établissement d'une relation analytique permettant d'évaluer la longueur L_j ; seul les essais au laboratoire ont permis de la quantifier. C'est ainsi que BRADLEY ET PETERKA (1957) ont élaboré une courbe moyenne expérimentale, représentant la variation de la longueur relative L_j^*/h_2^* en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut. Les auteurs concluent que pour la gamme pratique des nombres de Froude tels que $4 < F_1 < 12$, la longueur relative L_j^*/h_2^* prend la valeur moyenne de 6 ; ce résultat est encore admis de nos jours.

Une autre caractéristique géométrique du ressaut est la longueur L_r^* sur laquelle s'étend son rouleau de surface. Comme pour la longueur L_j^* , L_r^* n'a pu être évaluée que par la voie expérimentale. Plusieurs auteurs ont quantifié cette longueur (BRADLEY et PETERKA (1957), SAFRANEZ (1929), BAKHMETEFF (1936), MOORE (1943)), mais nous citerons surtout les travaux relativement récents de HAGER (1990) qui montrent que la longueur relative L_r^*/h_1 dépend à la fois du nombre de Froude F_1 et du rapport d'aspect $w=h_1/b$; h_1 et b sont respectivement la hauteur initiale du ressaut et la largeur du canal rectangulaire.

Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire, n'a connu que très peu d'études. Les travaux les plus intéressants dans ce domaine sont ceux de HAGER et WANOSCHEK (1987) concernant le ressaut hydraulique classique du type A, évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° . Ainsi que ceux, plus récemment, de ACHOUR et DEBABECHE (2003) qui ont effectué une étude expérimentale sur le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince et épaisse.

Par ailleurs, à ce jour il y a très peu de documentation sur l'évaluation de l'effet de la rugosité des parois du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique, à l'exception des travaux de Rjarnam (1968) et relatifs au ressaut hydraulique en canal rectangulaire respectivement à fond rugueux, et ceux plus récemment de Ghamri (2005) concernant le ressaut hydraulique en canal profilé en U à fond rugueux. En effet, ce dernier nous a servi de référence afin de mener à bien notre étude.

La présente étude s'intéresse à l'analyse théorique et expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canaux prismatique (rectangulaire, triangulaire et trapézoïdale) à fond rugueuses

L'étude a nécessité deux parties :

✓ Une première partie bibliographique à travers laquelle nous passerons en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique, en canal de section droite triangulaire d'une part, et les études relatives au ressaut évoluant en canal rectangulaire et trapézoïdale , à fond rugueux d'autre part. trois chapitres seront nécessaires, à travers lesquels nous aborderons le ressaut hydraulique classique, contrôlé et forcé en canal triangulaire à parois lisse, le ressaut hydraulique en canal rectangulaire à fond rugueux, le ressaut en canal rectangulaire à fond ondulé et enfin le ressaut hydraulique en canal trapézoïdale à fond rugueux..

✓ Une deuxième partie théorique, ayant pour objectif de trouver une relation théorique de la forme $f(Y, F_1, C_r)$, tels que Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, F_1 est le nombre de Froude incident et C_r est le coefficient de résistance.



PREMIÈRE PARTIE

Etude
Etude
Bibliographie
Bibliographie

INTRODUCTION A LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette première partie de notre étude bibliographique a pour but principal, de passer en revue les travaux les plus intéressants, ayant abordé le ressaut hydraulique en canaux prismatique triangulaire, rectangulaire et trapézoïdale à fond rugueux.

Cette partie bibliographique sera divisée en trois (03) chapitres.

✓ Le premier chapitre de cette partie de notre étude sera consacré à l'étude du ressaut hydraulique dans un canal de section droite rectangulaire, où nous examinerons essentiellement les travaux de BRADLEY et PETERKA (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de HAGER (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

✓ Le second chapitre de cette étude aura trait au ressaut hydraulique classique en canal triangulaire, où nous parlerons des travaux de HAGER et WANOSCHEK (1987) concernant le ressaut "triangulaire" évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90°.

✓ Le troisième chapitre sera consacré au ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, où nous parlerons des travaux de HAGER et WANOSCHEK (1987), relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal de pente géométrique horizontale, à parois latérales inclinées d'un angle de 45°.



Première Chapitre

**RESSAUT HYDRAULIQUE
DANS UN CANAL
RECTANGULAIRE**

I.1. INTRODUCTION

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

Les caractéristiques du ressaut sont essentiellement :

- les longueurs L_r^* et L_j^* qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut.
- les hauteurs initiale h_1 et finale h_2^* , appelées également hauteurs conjuguées.

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

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un nombre de Froude $IF_1 > 1$ étroitement lié au débit volume, à la hauteur initiale h_1 ainsi qu'à la forme géométrique du canal.

On s'accorde à dire que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation liant le rapport $Y^* = h_2^*/h_1$ des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude IF_1 .

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

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

I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

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

I.2.1. Forme du ressaut classique

Selon la classification proposée par BRADLEY et PETERKA (1957), le ressaut classique peut se présenter sous quatre formes distinctes. Cette classification se base essentiellement sur la valeur du nombre de Froude IF_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, en excluant les formes obtenues pour $IF_1 > 1,7$.

Ces dernières sont décrites par plusieurs auteurs dont ANDERSON (1978) et ne répondent pas aux exigences d'un bassin de dissipation d'énergie ; les ressauts correspondants sont dits ondulés présentant tantôt une surface libre régulièrement perturbée et lisse ($1 < IF_1 < 1,4$), tantôt une surface libre irrégulièrement ondulée ($1,4 < IF_1 < 1,7$).

Selon la classification de BRADLEY et PETERKA (1957) on distingue :

1. LE PRE-RESSAUT obtenu pour la gamme $1,7 < IF_1 < 2,5$ (figure 1,a).

La surface du ressaut est composée d'une série de petits rouleaux pour $IF_1 = 1,7$; ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude 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 $2,5 < IF_1 < 4,5$ (figure 1,b). Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

3. LE RESSAUT STABLE obtenu pour la gamme $4,5 < IF_1 < 9$ (figure 1,c). C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans les bassins de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

4. LE RESSAUT AGITE OU CLAPOTEUX obtenu pour $IF_1 > 9$ (figure 1,d). Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très élevée. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.^[5]

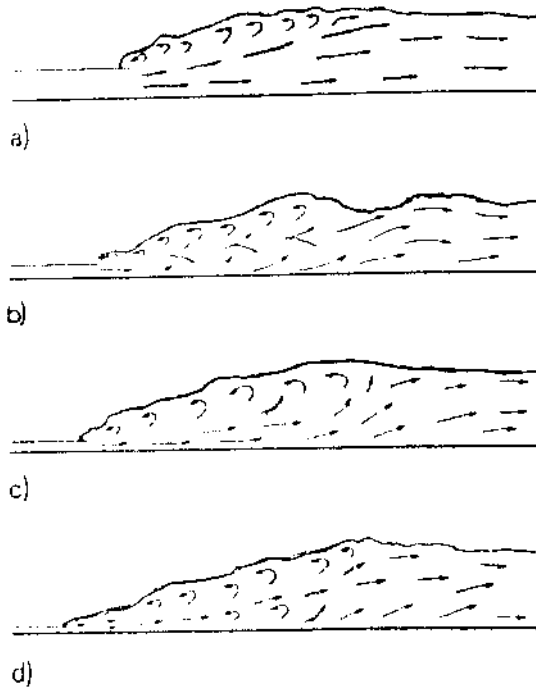


Figure 1.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de BRADLEY et PETERKA (1957). a) pré-ressaut, b) ressaut de transition, c) ressaut stable, d) ressaut agité.

I.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure 1.2 montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiales et finales 1 et 2.

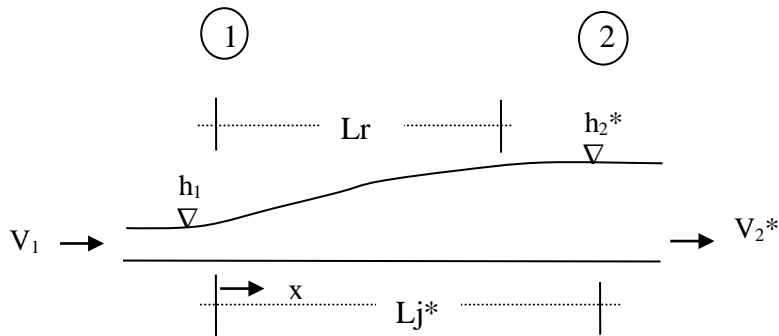


Figure 1.2 : Ressaut hydraulique classique.

L_r : longueur de rouleau

L_j^* : longueur de ressaut classique .

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

$$V_1 = Q/A_1 \tag{1.1}$$

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

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

b: est la largeur du canal rectangulaire.

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

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

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

$$\varpi.b.h_1^2/2 + \rho.Q.v_1 = \varpi.b.h_2^{*2}/2 + \rho.Q.v_2^* \quad (1.3)$$

h_2^* : hauteur final de ressaut classique.

v_2^* : vitesse d'écoulement de ressaut classique.

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

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

$$IF_1^2 = Q^2 / (g.b^2.h_1^3) \quad (1.4)$$

$$Y^* = h_2^*/h_1$$

$$IF_1^2 (b.h_1^2) + (h_1^2 . b)/2 = IF_1^2 (b.Y^{*2}.h_1^2) / Y^{*3} + (Y^{*2}.h_1^2 . b)/2$$

$$IF_1^2 \left(1 - \frac{1}{Y^*} \right) = \left(\frac{Y^{*2}}{2} - \frac{1}{2} \right)$$

$$IF_1^2 \left(\frac{Y^* - 1}{Y^*} \right) = \left(\frac{1}{2} \right) (Y^* + 1) (Y^* - 1)$$

$$2IF_1^2 = (Y^* + 1) Y^*$$

$$8IF_1^2 + 1 = 4Y^{*2} + 4Y^* + 1$$

$$8IF_1^2 + 1 = (2Y^* + 1)^2$$

La relation (1.3) conduit à écrire :

$$Y^* = h_2^*/h_1 = \frac{1}{2} [\sqrt{1 + 8 IF_1^2} - 1] \quad (1.5)$$

La relation (1.5) est connue sous le nom d'équation de Bélanger et permet d'évaluer le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude IF_1 . HAGER et SINNIGER (1985) proposent une relation approchée applicable pour les nombres de Froude $IF_1 > 2$:

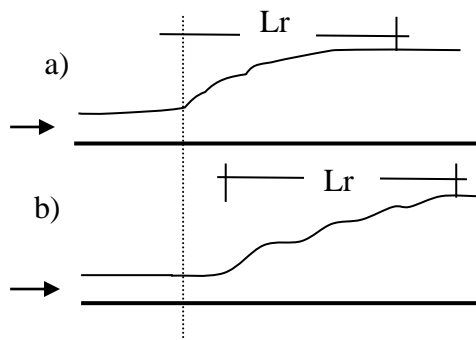
$$Y^* = h_2/h_1 = \sqrt{2} \cdot IF_1 - 1/2 \quad (1.6)$$

I.2.3. Longueurs caractéristiques du ressaut

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

I.2.3.1. Longueur du rouleau

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



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

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

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

Les essais effectués par HAGER (1990) et al montrent que, pour le cas du ressaut classique^[15], 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 :

$$\lambda_r^* = -12 + 160 \tanh (IF_1/20) \text{ pour } w = h_1 / b < 0,1 \quad (1.7)$$

$$\lambda_r^* = -12 + 100 \tanh (IF_1/12,5) \text{ pour } 0,1 < w < 0,7 \quad (1.8)$$

« *tanh* » désigne la tangente hyperbolique.

Les auteurs notent que pour $IF_1 < 8$, les relations (1.7) et (1.8) peuvent être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

$$\lambda_r^* = L_r^* / h_1 = 8.(IF_1 - 1,5) \quad , \quad 2,5 < IF_1 < 8 \quad (1.9)$$

I.2.3.2. Longueur du ressaut

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

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

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

Les essais de BRADLEY ET PETERKA (1957)^[15] ont permis à HAGER et al. (1990)^[15] de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur L_j^* du ressaut. Celle-ci, rapportée à la hauteur initiale h_1 du ressaut, peut s'écrire :

$$L_j^*/h_1 = 220. \tanh [(IF_1-1)/22] \quad (1.10)$$

D'après HAGER et al. (1990)^[15], la variation de la longueur relative L_j^*/h_2^* en fonction du nombre de Froude IF_1 indique que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à 6 pour la gamme pratique $4 < IF_1 < 12$. Ce résultat est encore admis de nos jours.

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

I.2.4. Rendement du ressaut

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

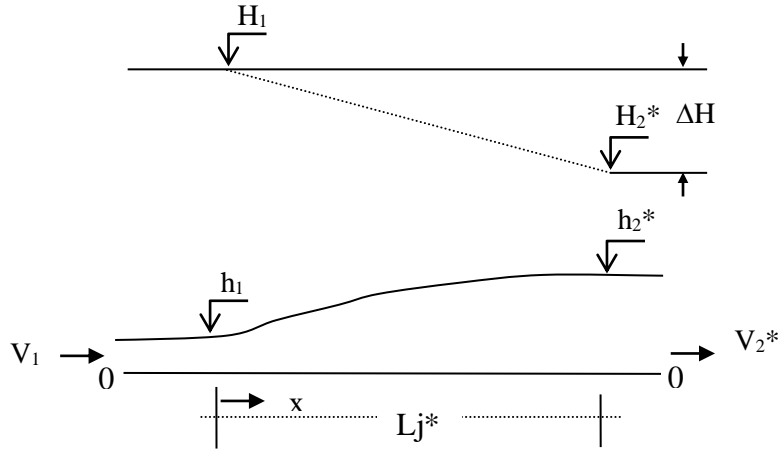


Figure 1.4 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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

$$H_1 = h_1 + \alpha_1 \cdot v_1^2 / (2 \cdot g) \tag{1.12}$$

Tandis que la charge totale dans la section finale est :

$$H_2^* = h_2^* + \alpha_2 \cdot v_2^{*2} / (2 \cdot g) \tag{1.13}$$

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

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

$$\Delta H^* = H_1 - H_2^* \tag{1.14}$$

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

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2^* \cdot A_2^* \tag{1.15}$$

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

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

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

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

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

$$\Delta H^* = (h_2 - h_1^*)^3 / (4 \cdot h_2^* \cdot h_1) \tag{1.18}$$

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

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

$$H_1 = h_1[1+IF_1^2/2] \quad (1.19)$$

$$H_2^* = h_1[Y^*+IF_1^2/(2Y^{*2})] \quad (1.20)$$

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

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

$$\eta^* = 1 - [Y^* + IF_1^2/(2.Y^{*2})]/(1+IF_1^2/2) \quad (1.21)$$

Bien que la relation (1.21) permet le calcul explicite du rendement η^* , HAGER et SINNIGER (1986) proposent une expression approchée, applicable pour $IF_1 > 2$:

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

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

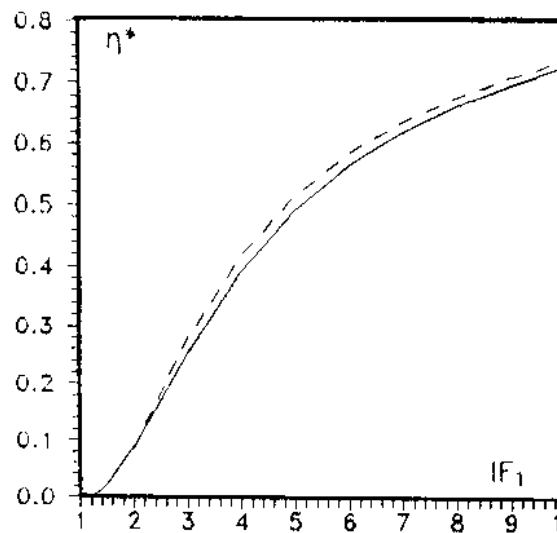


Figure 1.5 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude. (—) Courbe tracée selon la relation (1.21). (---) Courbe tracée selon la relation (1.22).

La figure (1.5) montre d'une part que le rendement η^* du ressaut classique est supérieur à 50% pour $IF_1 \geq 5,1$ et que les rendements calculés en application de la relation approchée (1.21) sont

légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.22) d'autre part ; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

I.3. CONCLUSION

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

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



Deuxième Chapitre

**RESSAUT HYDRAULIQUE
DANS UN CANAL
TRIANGULAIRE**

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons examiner le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons des travaux de HAGER et WANOSCHEK (1987) concernant le ressaut "triangulaire" évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° .

A travers une étude expérimentale assez particulière, les auteurs proposent, notamment, une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut L_r/h_2 et L_j/h_2 , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de m .

En fait, HAGER et WANOSCHEK (1987) extrapolent les résultats issus d'un profil semi-triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° .

II.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

II.2.1. Approche de Hager et Wanoschek

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

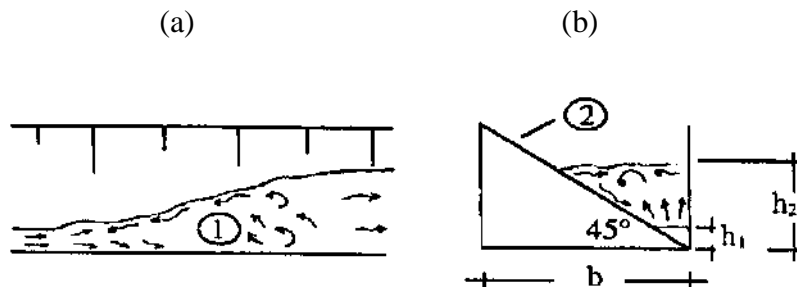


Figure 2.1 : Ressaut en canal semi-triangulaire selon HAGER et WANOSCHEK (1987). (a) vue en plan, (b) coupe transversale.

1. vue en plan du ressaut.

2. paroi en PVC inclinée de 45° .

h_1 et h_2 : hauteurs conjuguées du ressaut.

La paroi verticale du canal est en verre, ce qui permet la visualisation de l'écoulement. L'angle d'ouverture du canal triangulaire est d'environ 45° (44.7°), ce qui correspond à un angle de 90° pour le canal triangulaire symétrique.

Les débits volumes Q ont été variés entre 4 et 20 l/s suivant des pas de $\Delta Q = 2$ l/s. Les essais ont été effectués sous des vitesses de l'écoulement incident variant entre 1,7 et 8,6 m/s et des profondeurs initiales h_1 entre 70 et 76 cm correspondant à des nombres de Froude $2 \leq F_1 \leq 14$

approximativement. En raison du caractère fortement torrentiel de l'écoulement incident, la mesure limnimétrique des profondeurs h_1 a été très délicate.

La mesure limnimétrique des profondeurs de l'écoulement à l'aval du ressaut ont été mesurées avec une incertitude de plus ou moins 2 à 3 cm, en raison de violentes perturbations de la surface libre observées notamment à des nombres de Froude $IF_1 > 10$.

Les vitesses axiales ont été mesurées au moyen d'un tube de Pitot à environ 3 cm de la paroi verticale du canal.^[17]

II.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées

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

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

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

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

$$IF_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (2.2)$$

dans laquelle IF_1 représente le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut et M désigne la hauteur relative initiale du ressaut:

$$IF_1^2 = \frac{Q^2 (b + 2mh_1)}{g(bh_1 + mh_1^2)^3}, \quad Y = \frac{h_1}{h_2}, \quad M = \frac{mh_1}{b} \quad (2.3)$$

La relation (2.2) exprime ainsi, dans le cas d'un canal trapézoïdal, la variation du nombre de Froude à l'amont du ressaut en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées et de la hauteur relative M . Les équations régissant les ressauts en canal de section rectangulaire constante et en canal triangulaire peuvent être déduites de la relation (2.2). Le canal de section droite rectangulaire

constante est un cas particulier du canal trapézoïdal pou 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 $M \rightarrow \infty$.

Lorsque que M est égal à zéro, l'équation (2.2) mène à la relation de Bélanger exprimée par la relation (2.6) du premier chapitre.

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

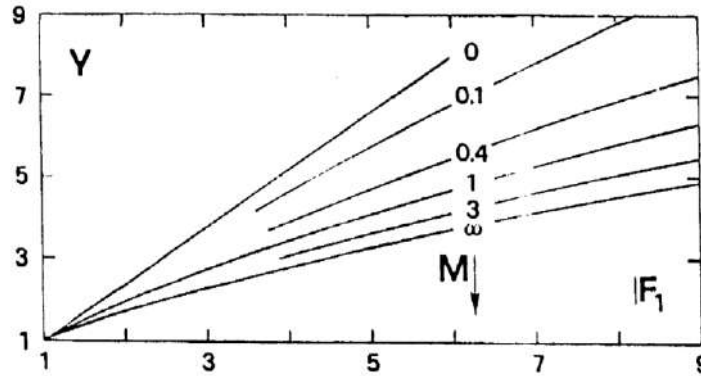


Figure 2.2 : Variation du nombre de Froude IF_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et de la hauteur relative M .

- $M=0$: Profil rectangulaire
- $M \rightarrow \infty$: Profil triangulaire
- $0 < M < \infty$: Profils trapézoïdaux.

La figure 2.2 montre clairement que la plus faible valeur du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut est obtenue dans le cas du profil triangulaire, pour une même valeur du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident.

L'équation de la courbe enveloppe inférieure de la figure 2.2, traduisant la variation du rapport Y du ressaut " triangulaire " en fonction du nombre de Froude IF_1 , est :

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

L'indice " T " indique le profil triangulaire.

L'équation (2.4) montre que Y_T s'exprime de manière fortement implicite en fonction de IF_{1T} ;

HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent alors la relation approchée :

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

La relation approchée (2.5) montre ainsi que $Y_T \sim IF_{1T}^{2/3}$ [17]

II.2.1.2. Équation de quantité de mouvement

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

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

avec $IR=4R_hV/\nu$ le nombre de Reynolds, $R_h = mh/[2.(1 + (1 + m^2)^{1/2})]$ le rayon hydraulique correspondant au profil semi-triangulaire et ν la viscosité cinématique.

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

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

$\varpi = \rho.g$ le poids volumique du liquide, $A(x)$ l'aire de la section mouillée correspondant à x .

Pour le cas du profil semi-triangulaire d'angle d'ouverture de 45° ($m=1$), la relation (2.6) devient :

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

La relation (2.7) s'écrit alors :

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

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

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

$$X = x/L_j$$

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

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

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

Pour les nombres de Froude $IF_1 < 15$, correspondant à des rapports $Y < 7$, l'application de la relation approchée (2.11) occasionne une erreur relative inférieure à 5% par rapport à la valeur exacte calculée par l'équation (2.10)₁.

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

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

En désignant par : $IF_1^2 = 2Q^2/(gmh_1^5)$, $A = [vmhl/(2Q)]^{1/4}$, $S_{fl} = \Lambda.(IF_1^2/10)$, la relation (2.12) s'écrit en termes adimensionnels :

$$1 + \frac{3}{2}IF_1^2 = Y^3 + \frac{3}{2} \frac{IF_1^2}{Y^2} + \frac{3\Lambda Lj}{70 h_1} \left(1 + \frac{6}{Y}\right) IF_1^2 \quad (2.13)$$

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

$$IF_1^2 = \frac{2Y^2 \left(Y^3 - 1 \right)}{3 \left[Y^2 - 1 - \frac{\Lambda Y^2}{6} (6 + Y) \right]} \quad (2.14)$$

Cette dernière relation traduit ainsi la variation du rapport Y des conjuguées du ressaut "triangulaire" ($m=1$) en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, en tenant compte de l'effet des frottements sur les parois du canal ; Cet effet est traduit par le paramètre adimensionnel Λ . Lorsque $\Lambda \rightarrow 0$, l'effet des frottements est négligeable et la relation (2.4) est reproduite. HAGER et WANOSCHEK (1987) notent que l'écart maximum observé entre les valeurs expérimentales des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut et celles issues de l'application de la relation (2.14) ne dépasse guère 3%.

La figure 2.3 montre les mesures expérimentales de HAGER et WANOSCHEK (1987) comparées à la fois aux valeurs théoriques obtenues par l'application de la relation (2.4) ($\Lambda \rightarrow 0$) et à celles issues de l'équation (2.14) pour $\Lambda > 0$. [17]

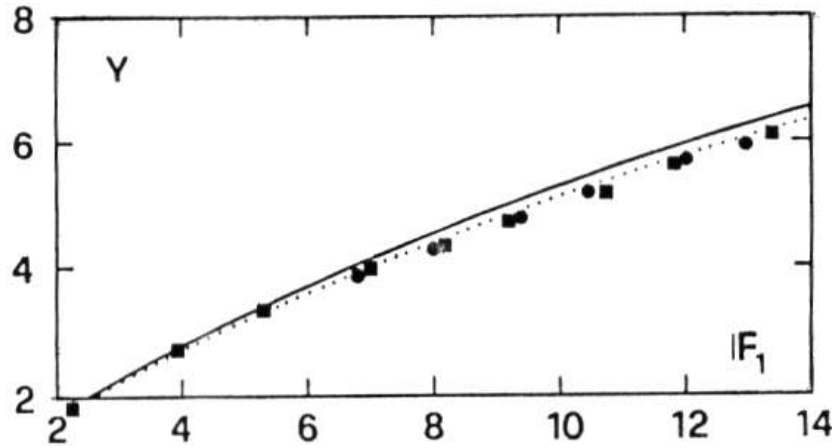


Figure 2.3 : Variation des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut triangulaire ($m=1$) en fonction du nombre de Froude IF_1 , selon HAGER et WANOSCHEK (1987).

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

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

II.2.1.3. Longueur caractéristique du ressaut

La longueur L_j du ressaut est définie comme étant la distance entre le pied du ressaut et la section à l'aval où la surface libre de l'écoulement est maximale et tend à devenir parallèle au fond du canal. Par contre, la longueur L , est la longueur sur laquelle s'étend le rouleau de surface.

Sur la figure 2.3 sont représentées les mesures expérimentales de RAJARATNAM (1964) ($m=0,58$) et celles de HAGER et WANOSCHEK (1987) ($m=1$), qui concernent la longueur relative L_r/h_2 en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident. Il apparaît ainsi que la longueur relative L_r/h_2 dépend exclusivement de m et de IF_1 . La figure 2.4 montre également que la longueur relative L_r/h_2 croît au fur et à mesure que IF_1 augmente et qu'elle décroît avec l'augmentation de m .

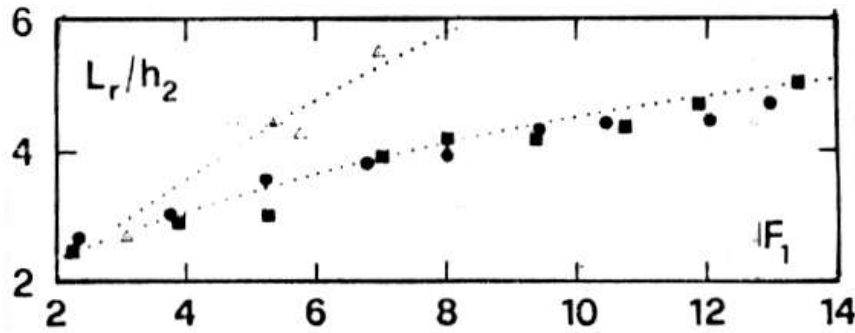


Figure 2.4 : Longueur relative L_r/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude IF_1 , selon HAGER et WANOSCHEK (1987) ($m=1$). (Δ) : $m=0,58$ selon Rajaratnam (1964).

En tenant compte des mesures de RAJARATNAM (1964) ($m=0,58$), HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent une relation générale permettant d'évaluer la longueur relative L_r/h_2 en fonction de IF_1 et de m :

$$L_r/h_2 = 1,8.(m)^{0,5}.IF_1^{10,4/m} \quad , \quad 0,4 < m \leq 1 \quad (2.15)$$

Ainsi, dans la gamme pratique des nombres de Froude de l'écoulement incident tels que $6 \leq IF_1 \leq 9$, la longueur relative L_r/h_2 du rouleau, pour le cas d'un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° ($m=1$), est telle que $3,7 < L_r/h_2 < 4,35$.

En ce qui concerne la longueur relative L_j/h_2 du ressaut "triangulaire", les mesures expérimentales de HAGER et WANOSCHEK (1987) ainsi que celles d'ARGYROPOULOS (1962) sont représentées sur la figure 2.5, en fonction du nombre de Froude IF_1 . Nous pouvons alors remarquer, comme pour L_r/h_2 , que la longueur relative L_j/h_2 dépend à la fois du nombre de Froude IF_1 et du paramètre m . La figure 2.5 montre en outre que L_j/h_2 varie dans le même sens que IF_1 et en sens inverse de m . En incluant les mesures d'ARGYROPOULOS (1962), HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent de calculer L_j/h_2 par application de la relation :

$$L_j/h_2 = 2,4.(m)^{0,5}.IF_1^{0,4/m} \quad , \quad 0,4 < m \leq 1 \quad (2.16)$$

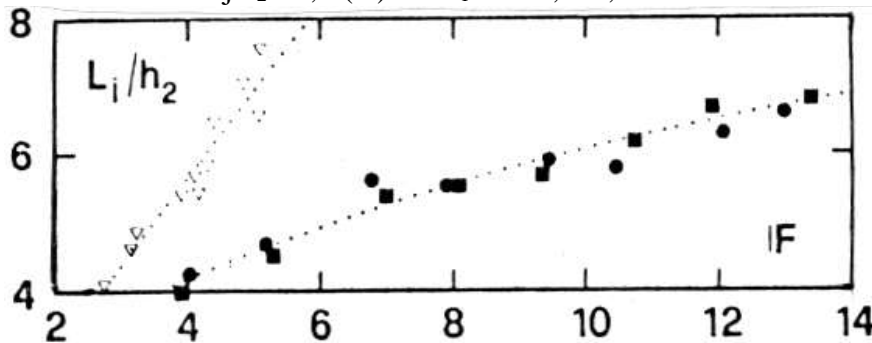


Figure 2.5 : Longueur relative L_j/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude IF_1 , selon HAGER et WANOSCHEK (1987) ($m=1$). (∇) : $m=0,44$ selon ARGYROPOULOS (1962).

II.2.1.4. Profil de surface généralisé du ressaut

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

La figure 2.6 représente les mesures expérimentales de HAGER et WANOSCHEK (1987) concernant le profil de surface généralisé du ressaut "triangulaire" le long de l'axe longitudinal du canal. Les points de mesures, obtenus pour $6,8 \leq lF_1 \leq 11,8$, se situent ainsi sur une même courbe d'équation approchée :

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

" \tanh " désigne la tangente hyperbolique.

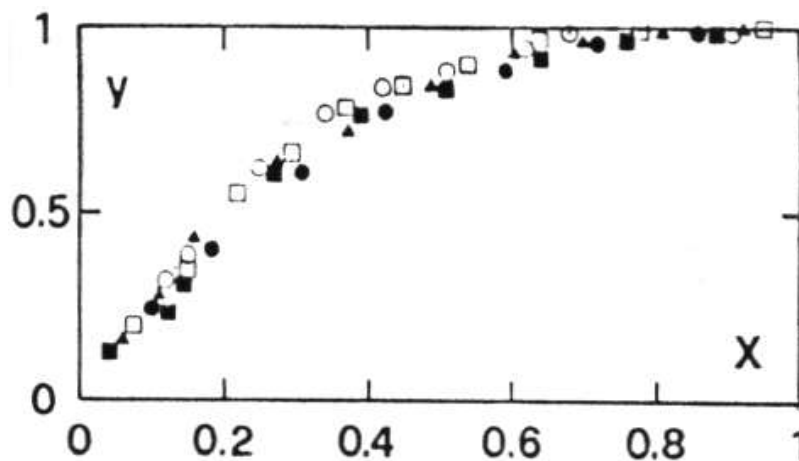


Figure 2.6 : Profil de surface généralisé $y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ($m=1$), selon Hager et Wanoschek (1987).

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

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

HAGER et WANOSCHEK (1987) notent que le profil de surface le long de la paroi inclinée du canal triangulaire (profil latéral) se situe légèrement au-dessous du profil axial précédemment défini, voire même équivalent. ^[17]

II.3. CONCLUSION

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

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

L'étude (1987) montre que les rapports Y expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs à ceux calculés par l'équation de la quantité de mouvement. Cette différence est attribuée à l'effet des frottements sur les parois du canal et l'équation de la quantité de mouvement est alors modifiée en tenant compte de ceux-ci, L'effet des frottements est traduit par le paramètre adimensionnel $A = [vmhl/(2Q)]^{1/4}$, où v est la viscosité cinématique du liquide, m la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontale, h_1 la hauteur initiale du ressaut et Q le débit volume. Lorsque $A = 0$, aucun effet des frottements n'est observé et l'équation de la quantité de mouvement sous sa forme classique est applicable.

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

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



Troisième Chapitre

**RESSAUT HYDRAULIQUE
DANS UN CANAL
TRAPÉZOÏDALE**

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons donner un bref aperçu sur le ressaut hydraulique classique, ensuite nous passerons en revue les travaux de Hager et Wanoschek (1989) relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal de pente géométrique horizontale, à parois latérales inclinées d'un angle de 45° . 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.

III.2 APPROCHE DE HAGER ET WANOSCHEK (1989)

III.2.1. Généralités

La première étude concernant le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal est probablement celle de Posey et Hsing (1938). Ils ont constaté que le rapport des hauteurs conjuguées observées s'ajuste bien avec les prédictions basées sur l'approche dynamique classique. Toutefois, les caractéristiques d'écoulement ont été jugées tout à fait différentes de celles rencontrées dans des canaux rectangulaires. La longueur L_j du ressaut hydraulique dans des canaux trapézoïdaux mesurée le long de l'axe du canal a été jugée moins définie que dans le canal rectangulaire. Sandover et Holmes (1962), ont étudié le ressaut hydraulique dans des canaux trapézoïdaux pour des pentes des parois latérales de 30° , 45° , 60° , ils ont signalé des difficultés dans la corrélation des hauteurs conjuguées prévus par l'approche dynamique avec leurs données, les caractéristiques des longueur ont été impossible à établir. Silvester (1964) s'est référé aux épreuves présentées par Hsing. Ses observations ne couvraient pourtant que les nombres de Froude F_1

III.2.2. Description des essais

Les essais ont été menés dans un canal trapézoïdal symétrique, la pente des parois latérales est de 45° ($m = 1$), de largeur de fond $0,2\text{ m}$, de largeur de la grande base $1,6\text{ m}$, de profondeur $0,7\text{ m}$ et une longueur de 8 m . Les valeurs de $h_1 = 20\text{ mm}$, 40 mm , 60 mm et 80 mm ont été examinés, pour lesquels $M = 0,1$; $0,2$; $0,3$ et $0,4$ respectivement.

III.2.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure (3.1) montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiales et finale 1 et 2.

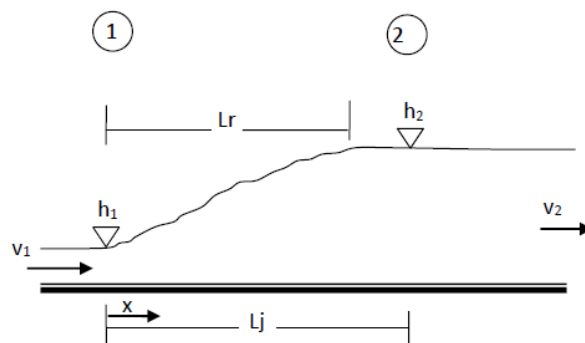


Figure 3.1 : Ressaut hydraulique classique

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

$$v_1 = Q/A_1 \quad (3.1)$$

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

$$A = bh_1 + mh_1^2 \quad (3.2)$$

Tel que:

b : la largeur du canal trapézoïdal.

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

Le ressaut est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En effet, la variation de la quantité de mouvement entre les sections 1 et 2 est égale à la somme des forces extérieures agissant sur l'écoulement. L'application de cette loi nécessite quatre hypothèses simplificatrices:

1. la répartition des pressions dans la section finale et initiale est hydrostatique;
2. la distribution des vitesses 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 P_1 et P_2 s'exerçant sur les sections 1 et 2. Ces forces s'écrivent :

$$P_1 = \omega \bar{h}_1 A_1 \quad (3.3)$$

$$P_2 = \omega \bar{h}_2 A_2 \quad (3.4)$$

$\omega = \rho g$ désigne le poids spécifique du liquide, ρ est la masse volumique du liquide, h_1 et 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 donc écrire que :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1 (3b + 2mh_1)}{6 s_1} \quad (3.5)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2 (3b + 2mh_2)}{6 s_2} \quad (3.6)$$

L'application de la loi de Newton mène à écrire :

$$\frac{bh_1^2}{2} + \frac{mh_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(bh_1 + mh_1^2)} = \frac{bh_2^2}{2} + \frac{mh_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(bh_2 + mh_2^2)} \quad (3.7)$$

h_1 et h_2 sont respectivement les hauteurs initiale et finale du ressaut, et g est l'accélération de la pesanteur.

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_1^2)^3} \quad Y = \frac{h_2}{h_1} \quad M = \frac{mh_1}{b} \quad (3.8)$$

L'équation (3.7) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \left(\frac{1+2M}{2(1+M)} \right) \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (3.9)$$

La relation (3.9) exprime la variation du nombre de Froude à l'amont du ressaut en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées et du coefficient de forme M. Les équations régissant les ressauts en canal de section rectangulaire constante et en canal triangulaire peuvent être déduites de la relation (3.9).

Sur la Figure (3.2) est représentée graphiquement, dans un système d'axes de coordonnées cartésiennes, la relation (3.9) :

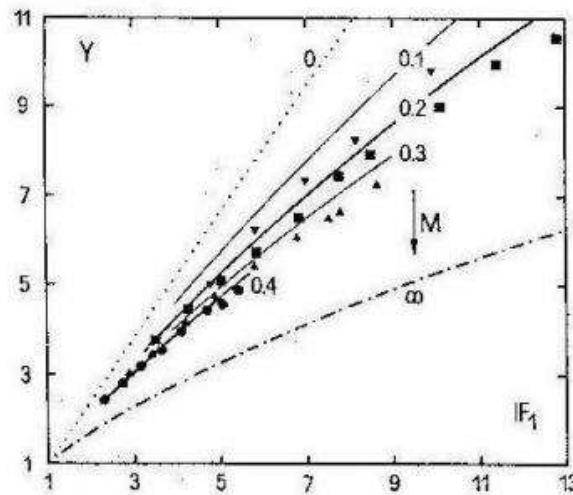


Figure 3.2 : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M.

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

$M=0$: profil rectangulaire.

$M \rightarrow \infty$: profil triangulaire.

La Figure (3.2) montre clairement que la plus faible valeur de rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut est obtenue dans le cas du profil triangulaire, pour une même valeur du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.^[18]

III.2.4. Longueurs caractéristiques du ressaut

III.2.4.1. longueur du rouleau de fond

Une caractéristique particulière de ressaut trapézoïdal pour $F_1 > 4$ est l'apparition d'un rouleau de fond, la figure (3.3) montre un esquisse de définition. Les dimensions du rouleau de fond peut être proposée par L_u (la distance du pied du ressaut au début du rouleau de fond), L_b longueur du rouleau de fond et h_b la hauteur maximal du rouleau de fond.

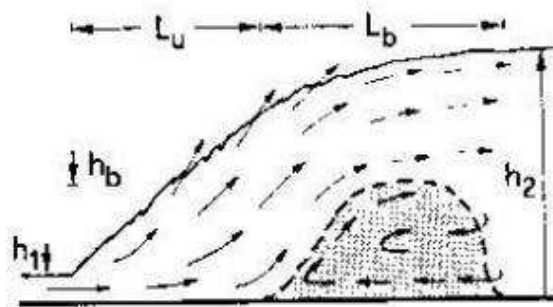


Figure 3.3: schéma de définition

Les figures (3.4).a à c montre les rapports $\lambda_u = L_u/h_2$, $\lambda_b = L_b/h_2$, et h_b/h_2 en fonction du nombre de Froude F_1 pour diverses M. où h_2 correspond à la profondeur de l'écoulement en aval du ressaut.

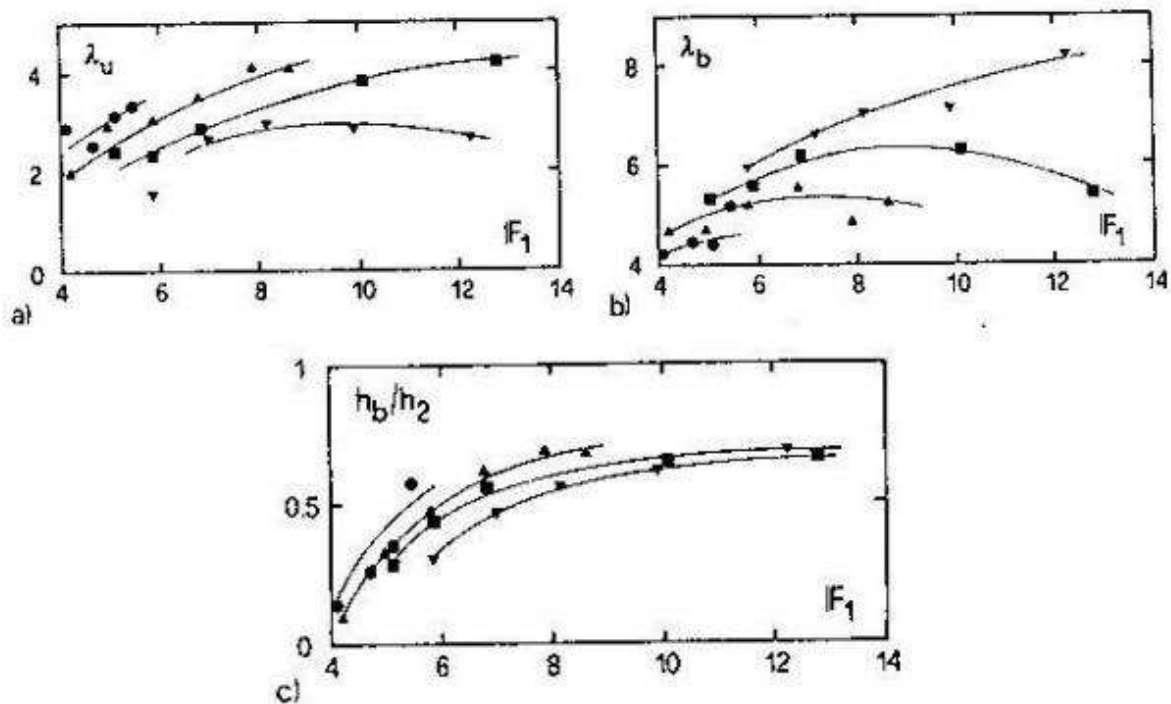


Figure 3.4 : caractéristique principale du rouleau de fond: a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximale.

La figure (3.4) montre que:

- $2 < \lambda_u < 4$, tout à fait près au pied du ressaut.
- pour une valeur bien déterminée de F_1 , λ_u augmente avec l'augmentation de M .
- $\lambda_b \gg \lambda_u$ et peut atteindre des valeurs aussi supérieures que la valeur 8.
- λ_b diminue avec l'augmentation de M .
- la fin du rouleau de fond ($\lambda_u + \lambda_b$) est pratiquement indépendante de M , et augmente avec l'augmentation de F_1 arrivant à 10,5.
- h_b/h_2 augmente avec l'augmentation de M et de F_1 .

III.2.4.2. Longueur du ressaut :

Une autre longueur importante est la longueur du ressaut L_j , bien que de nombreuses définitions de mesure de cette longueur ont été avancées; Il a été conseillé de laisser la position de la fin du ressaut où l'ébullition de surface disparaît. A ce stade, les poches de bulles d'air remontent à la surface indiquant la fin de la zone de dégazage, de tout évidence, le niveau de turbulence diminue ensuite de manière significative et indique la fin du ressaut.

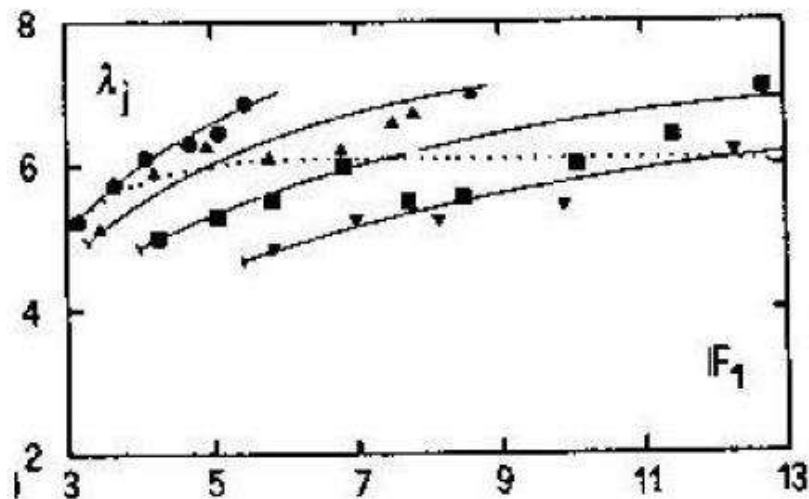


Figure 3.5: longueur relative λ_j du ressaut en fonction de F_1 et de M

La figure (3.5) représente les mesures expérimentales de Hager et Wanoschek (1989) ($m=1$) concernant la longueur relative L_j/h_2 en fonction du nombre de Froude F_1 et de M , il apparaît par conséquent que la longueur relative L_j/h_2 dépend uniquement de M et de F_1 .^[18]

III.2.5. Rendement du ressaut :

La figure (3.6) montre la ligne de charge totale le long de la longueur L_j sur laquelle s'étend le ressaut classique.

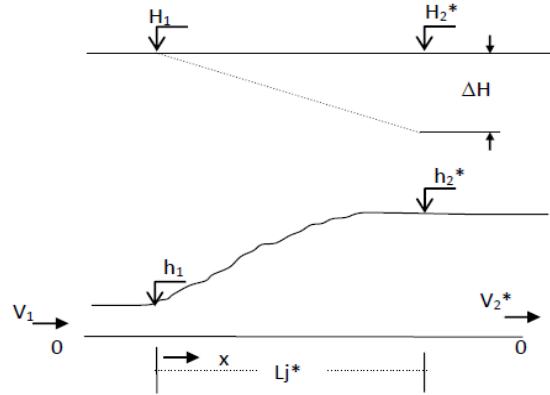


Figure 3.6 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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

$$H_1 = h_1 + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} \quad (3.10)$$

Tandis que la charge totale dans la section finale est :

$$H_2^* = h_2^* + \alpha_2 \cdot \frac{v_2^{2*}}{2g} \quad (3.11)$$

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

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

$$\Delta H^* = H_1 - H_2^* \quad (3.12)$$

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

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2^* \cdot A_2 \quad (3.13)$$

$$\text{Où } A_1 = bh_1 + mh_1^2 \text{ et } A_2 = bh_2^* + mh_2^{2*}$$

Le nombre de Froude de l'écoulement incident dans un canal de section droite trapézoïdal est défini par la relation :

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

En tenant compte des relations précédentes, le rendement du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal horizontal, s'écrit comme suit :

$$\eta^* = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2(1+M)^3}{2Y^2(1+2M)(1+YM)^2}}{1 + \frac{F_1^2(1+M)}{2(1+2M)}} \quad (3.14)$$

$Y = h_2^*/h_1$ étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.

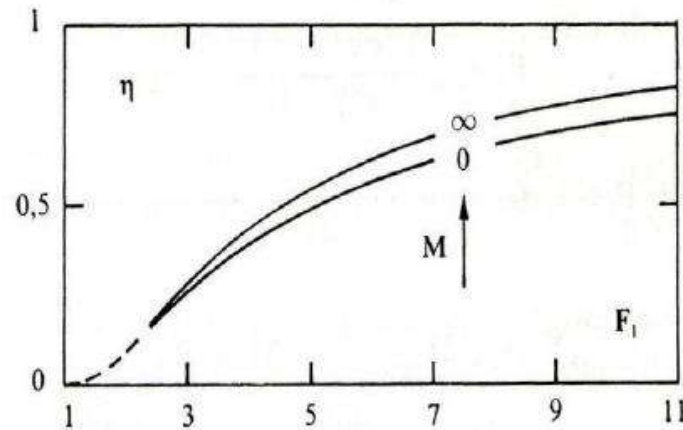


Figure 3.7 : Rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude.

$M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire.

La figure (3.7) montre que le rendement du ressaut dans les canaux trapézoïdaux est compris entre les courbes de rendement du ressaut dans le canal triangulaire et du canal rectangulaire. Par ailleurs, pour le même nombre de Froude F_1 le rendement η est important pour le canal triangulaire.

III.2.6. Description du ressaut :

Selon Hager, par rapport au ressaut hydraulique bien connu dans des canaux rectangulaires, la configuration d'écoulement du ressaut dans les canaux trapézoïdaux est tout à fait différente. Le ressaut classique est caractérisé par un écoulement de fond à grande vitesse et un rouleau de surface qui les recouvre.

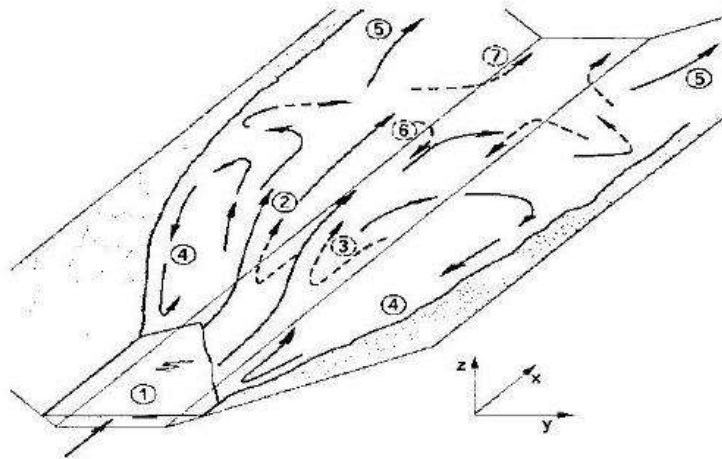


Figure 3.8 : Illustration schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal. (\rightarrow) courants de surface, ($- \rightarrow$) courant de fond.

La figure (3.8) illustre un tracé schématique des caractéristiques de l'écoulement principal dans un ressaut trapézoïdal. La grande vitesse de l'écoulement (1) est soulevé en l'air et forme une zone éclaboussures (2) en raison de la présence d'une zone de séparation de fond (3), dénommé rouleau de fond. Le courant principal circule donc près de la surface et diverge lentement vers les parois latérales. Cela est dû à la concentration des débits (1) à la partie centrale de la section transversale, et la dépression résultant le long des parois latérales. Une première partie de l'écoulement latéral revient en amont et formes les zones de retour latérales de l'écoulement (4) sur les deux cotes du

canal. Une seconde partie reste à la surface et poursuit vers l'aval, (5). Une troisième partie plonge le long des parois latérales en pente et alimente le rouleau de fond, (6). Plus en aval, ce courant n'est plus entraîné par le rouleau de fond, mais continue directement vers l'aval, (7).

Un ressaut hydraulique trapézoïdal est donc régi par des phénomènes d'écoulement très spatial. La présence du rouleau de fond comporte plusieurs différences au ressaut classique ^[18]:

- Les vitesses sur le fond sont considérablement réduites;
- Le flux principal est remonté à la surface, mais diverge des deux côtés du canal;
- Par conséquent, les vitesses maximales se produisent le long des parois latérales près de la Surface libre.

III.3.Conclusion :

Cette partie de notre étude bibliographique à pour objectif de faire le point sur les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. La détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique, 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).

CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette première partie de notre étude a eu pour objectif de présenter à travers trois chapitres les travaux les plus importants dans le domaine du ressaut hydraulique.

- Le premier chapitre a eu pour but d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Le ressaut hydraulique classique, où nous avons mis l'accent sur les travaux de Hager (1990), relatif aux caractéristiques du ressaut classique. Nous avons montré que l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre ses sections initiale et finale, en négligeant les pertes de charge autres que celles dues au ressaut, mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement.

- Le second chapitre de cette partie bibliographique, a permis de mettre l'accent sur la démarche expérimentale assez particulier de Hager et Wanoschek (1987) qui extrapolent les résultats issus d'un profil semi triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° . L'étude montre que les rapports Y expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs à ceux calculés par l'équation de la 56 quantité de mouvement. Cette différence est attribuée à l'effet des frottements sur les parois du canal et l'équation de la quantité de mouvement est alors modifiée en tenant compte de ceux-ci. L'effet des frottements est traduite par le paramètre adimensionnel $\Lambda = [vmh_l / (2Q)]^{1/4}$, lorsque $\Lambda = 0$. Aucun effet des frottements n'est observé et l'équation de la quantité de mouvement sous sa forme classique est applicable. Hager et Wanoschek (1987) proposent une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut L_r/h_2 et L_j/h_2 , en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident et de m . Par la suite l'étude aborde le profil de surface généralisé du ressaut. Une équation représentative du profil de surface généralisé le long de l'axe du canal est alors proposée.

- Le troisième et le dernier chapitre a abordé, la classification du ressaut classique proposé par Bradley et Pterka (1957), dans un second temps, il a été cité les travaux de Hager et Wanoschek (1989), relatifs au ressaut hydraulique classique dans un canal trapézoïdal à angle d'ouverture de 45° . L'étude a concerné les caractéristiques du ressaut notamment ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau de 57 fond. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale.



DEUXIÈME PARTIE

Approche

Approche
Théorique

INTRODUCTION A LA PARTIE THEORIQUE

La deuxième partie de notre présente étude est une tentative, de trouver une relation théorique de la forme $f(Y, F_1, C_r)$, tels que Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, F_1 est le nombre de Froude incident et C_r est le coefficient de résistance. Ce dernier exprime l'effet de la rugosité des parois et des fonds des canaux prismatique (rectangulaire, trapézoïdale et triangulaire) sur le ressaut hydraulique.

En effet, la relation $f(Y, F_1, C_r)$ ne peut être obtenue que par l'application de l'équation de la quantité de mouvement sous sa forme classique, entre les sections initiale et finale du ressaut, en tenant compte de la force de résistance F_R due à la rugosité des parois du canal.



Quatrième Chapitre

**APPROCHE THÉORIQUE
EN CANAL
TRAPÉZOÏDALE**

IV. 1. Introduction :

Cette partie de notre étude sera consacré à un développement théorique, permettant de trouver une relation semi-théorique de la forme $f(Y, F_1, C_r)$, tels que Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, F_1 est le nombre de Froude incident et C_r est le coefficient de résistance. Ce dernier exprime l'effet de la rugosité des parois du canal trapézoïdal sur le ressaut hydraulique.

Cette relation fonctionnelle a été établie par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut, en tenant compte des hypothèses simplificatrices citées précédemment.

IV. 2. Equation de la quantité de mouvement :

Nous avons appliqué l'équation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite trapézoïdal à angle incliné d'une pente positive par rapport à l'horizontale (Figure 4.1).

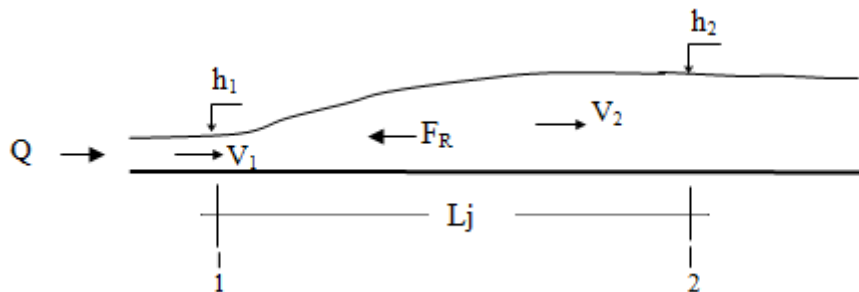


Figure4. 1: Ressaut contrôlé par seuil dans un canal trapézoïdal à fond e parois rugueux.

On peut appliquer l'équation de quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut, en tenant compte de la force de résistance F_r due à la rugosité appliquée au fond du canal. Cette équation s'écrit comme suit :

$$F_1 - F_2 - F_r = \rho Q v_2 - \rho Q v_1$$

où :

F_1 et F_2 sont respectivement les forces de pression s'exerçant sur les sections amont et aval du ressaut : $F_1 = P_1 A_1$ et $F_2 = P_2 A_2$

V_1 et V_2 : sont respectivement les vitesses aux sections amont et aval du ressaut,

ρ : est la masse volumique du liquide,

Q : est le débit volume.

F_r : est la force de résistance due à la rugosité des parois du canal, dont l'expression est la suivante :

$$F_r = C\rho Lj \left(\frac{v_1^2}{2g}\right) P \tag{4.1}$$

g : l'accélération de la pesanteur (m/s^2) ;

L_j : Longueur du ressaut (m) ;

C : un coefficient du à la rugosité ;

p : Périmètre mouillé du canal.

L'équation (4.1) peut s'écrire alors ou la forme :

$$F_1 - F_2 - F_r = \rho Q v_2 - \rho Q v_1 \tag{4.2}$$

P étant la pression hydrostatique.

L'expression (4.2) s'écrit pour un canal rectangulaire sous la forme suivante :

$$\rho g \bar{h}_1 A_1 - \rho g \bar{h}_2 A_2 - CLj \rho g \left(\frac{v_1^2}{2g}\right) P = \rho Q v_2 - \rho Q v_1 \tag{4.3}$$

- Les aires de la section 1 et 2 ont pour expressions :

$$A_1 = bh_1 + mh_1^2$$

$$A_2 = bh_2 + mh_2^2$$

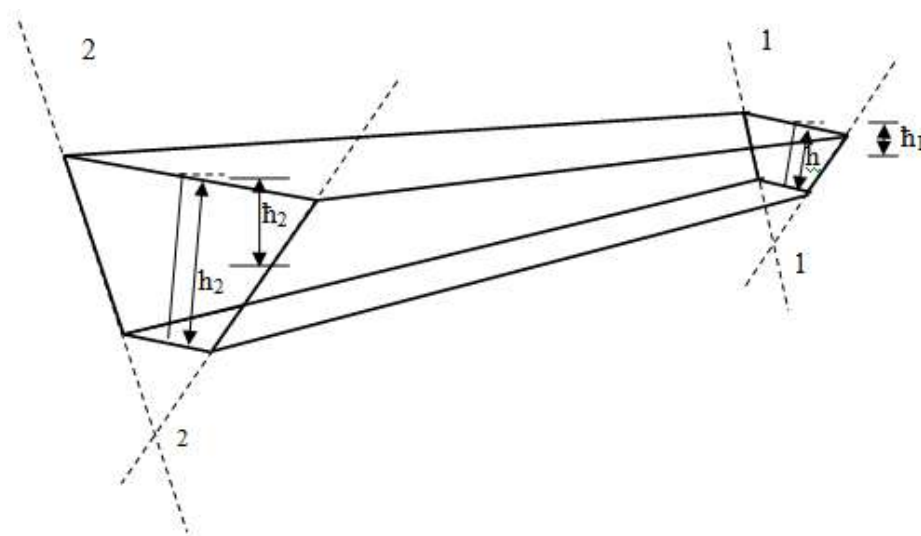


Figure 4.2: Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut.

- Les positions des centres de gravité des sections mouillées A_1 et A_2 sont respectivement :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1 (3b+2mh_1)}{6 A_1}$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2 (3b+2mh_2)}{6 A_2}$$

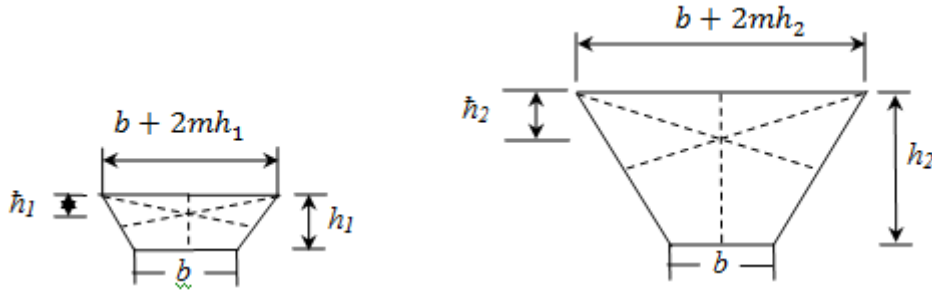


Figure 4.3 : Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut.

$$\rho g \frac{h_1 (3b+2mh_1)}{6 A_1} A_1 + \rho Q v_1 - CLj \rho g \frac{v_1^2}{2g} P = \rho Q v_2 + \rho g \frac{h_2 (3b+2mh_2)}{6 A_2} A_2 \quad (4.4)$$

- Les vitesses : $v_1 = \frac{Q}{A_1}$ et $v_2 = \frac{Q}{A_2}$

- $Y = h_2/h_1$ étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.

- Tell que : $M = \frac{mh_1}{b}$

- Le nombre de Froude incident de la section trapézoïdal est : $IF_1^2 = \frac{Q^2}{gB^2 h_1^3}$

Pour un canal trapézoïdal de L'équation (4.4) devient :

$$\rho g \frac{h_1^2}{6} (3b + 2mh_1) + \rho \frac{Q^2}{A_1} - CLj \rho g \frac{Q^2}{2gA_1^2} P = \rho \frac{Q^2}{A_2} + \rho g \frac{h_2^2}{6} (3b + 2mh_2) \quad (4.5)$$

$$bh_1^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} M \right) + \frac{Q^2}{gbh_1(1+M)} - CLj \frac{Q^2}{2gb^2h_1^2(1+M)^2} P = bY^2h_1^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} YM \right) + \frac{Q^2}{gbYh_1(1+MY)} \quad (4.6)$$

En introduisant l'expression du nombre de Froude dans l'équation (4.6) on obtient :

$$bh_1^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} M \right) + \mathbb{F}_1^2 \frac{b^2h_1^2(1+M)^2}{b(1+2M)} - CLj \frac{Q^2}{2gb^2h_1^2(1+M)^2} P = bY^2h_1^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} YM \right) + \mathbb{F}_2^2 \frac{b^2Y^2h_1^2(1+MY)^2}{b(1+2MY)} \quad (4.7)$$

Et en faisant le développement suivant :

$$\mathbb{F}_1^2 \frac{bh_1^2(1+M)^2}{(1+2M)} \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+YM)} \right] - \frac{CLj}{2} \frac{Q^2}{gb^2h_1^2(1+M)^2} P = bh_1^2 \left[Y^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} YM \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} M \right) \right] \quad (4.8)$$

En multipliant et diviser la fraction par le $(1 + M)$ et ajoutant (M) et soustrairez de la relation :

$$\mathbb{F}_1^2 \frac{bh_1^2(1+M)^2}{(1+2M)} \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+YM)} \right] - \frac{CLj}{2} \frac{Q^2 bh_1(1+M+M-M)}{gb^3h_1^3(1+M)^3} P = bh_1^2 \left[Y^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} YM \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} M \right) \right] \quad (4.9)$$

$$\mathbb{F}_1^2 \frac{bh_1^2(1+M)^2}{(1+2M)} \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+YM)} \right] - \mathbb{F}_1^2 \left[\frac{CLjP}{2} \left(1 - \frac{M}{1+2M} \right) \right] = bh_1^2 \left[Y^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}YM \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}M \right) \right] \quad (4.10)$$

Le développement de la relation (4.10) :

$$\mathbb{F}_1^2 \frac{(1+M)^2}{(1+2M)} \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+YM)} \right] - \mathbb{F}_1^2 \left[\frac{CLjP}{2bh_1} \left(\frac{1+M}{1+2M} \right) \right] = \left[Y^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}YM \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}M \right) \right] \quad (4.11)$$

$$\mathbb{F}_1^2 \frac{(1+M)^2}{(1+2M)} \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+YM)} - \frac{CLjP}{2bh_1(1+M)} \right] = \left[Y^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}YM \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}M \right) \right] \quad (4.12)$$

Soit : $K = \frac{CLjP}{2bh_1(1+M)}$

Le développement de (4.12) permet d'écrire :

$$\mathbb{F}_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+YM)} - K \right] = \frac{1+2M}{(1+M)^2} \left[Y^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}YM \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}M \right) \right] \quad (4.13)$$

On pose :

$$Cr = K / \left(1 - \frac{1+M}{Y(1+YM)} \right) \quad (4.14)$$

Remplaçant (4.14) dans la relation (4.13) on obtient la relation finale (4.15) :

$$\mathbb{F}_1^2 [1 - Cr] = \frac{\frac{1+2M}{(1+M)^2} \left[Y^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}YM \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}M \right) \right]}{\left(1 - \frac{1+M}{Y(1+YM)} \right)} \quad (4.15)$$

IV. 3. Conclusion :

A travers une analyse théorique nous avons pu obtenir une relation semi-théorique de la forme $f(Y, \mathbb{F}_1, C_r)$, permettant de trouver le rapport des hauteurs conjuguées connaissant le coefficient de résistance et le nombre de Froude incident. Seulement, le coefficient étant une inconnue dans l'équation (4.15), il est nécessaire de procéder à une analyse expérimentale de cette expression afin d'évaluer la relation qui lie le coefficient C_r de résistance à la rugosité absolue ε .



Cinquième Chapitre

**APPROCHE THÉORIQUE
EN CANAL
TRIANGULAIRE**

V. .1. Introduction

Ce chapitre de la troisième partie de notre étude sera consacré à un développement théorique, permettant de trouver une relation semi-théorique de la forme $f(Y, F_1, C_r)$, tels que Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, F_1 est le nombre de Froude incident et C_r est le coefficient de résistance. Ce dernier exprime l'effet de la rugosité des parois du canal triangulaire sur le ressaut hydraulique.

V. .2. Analyse théorique

La Figure 5.1 montre un ressaut contrôlé par seuil dans un canal de section droite triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° à parois rugueuses. Le seuil dénoyé est placé à l'extrémité aval du canal, afin de surélever le plan d'eau à l'aval. h_1 et h_2 représentent les hauteurs conjuguées respectivement de la section initiale et finale du ressaut.

L'écoulement étant en régime torrentiel à l'amont et fluvial à l'aval.

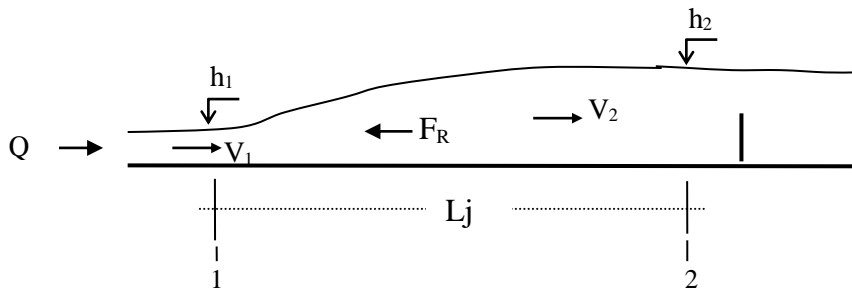


Figure 5.1 : Ressaut contrôlé par un seuil un canal triangulaire à parois rugueux

Etant donnée les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ la répartition hydrostatique des pressions, dans les sections amont et aval ;
- ✓ les frottements entre les particules d'eau et les parois du canal sont négligeables ;
- ✓ la pente du canal est faible ou presque nulle ;
- ✓ la résistance de l'air est négligeable, l'écoulement est permanent ;

on peut appliquer l'équation de quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut, en tenant compte de la force de résistance F_R due à la rugosité appliquée aux parois du canal . Cette équation s'écrit comme suit :

$$F_1 - F_2 - F_R = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad (5.1)$$

où :

F_1 et F_2 sont respectivement les forces de pression s'exerçant sur les sections amont et aval du ressaut : $F_1 = P_1 A_1$ et $F_2 = P_2 A_2$

V_1 et V_2 sont respectivement les vitesses aux sections amont et aval du ressaut,

ρ est la masse volumique du liquide,

Q est le débit volume.

pour un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° , $m = 1$.

F_R est la force de résistance due à la rugosité des parois du canal, dont l'expression est la suivante :

$$F_R = C \rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) p \tag{5.2}$$

g : l'accélération de la pesanteur (m/s^2) ;

L_j : Longueur du ressaut (m) ;

C : un coefficient du à la rugosité ;

p : Périmètre mouillé du canal.

L'équation (5.1) peut s'écrire alors sous la forme :

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 - C \rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) p = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \tag{5.3}$$

P étant la pression hydrostatique.

L'expression (5.3) s'écrit pour un canal triangulaire sous la forme suivante :

$$\rho g \bar{h}_1 A_1 - \rho g \bar{h}_2 A_2 = \rho Q^2 \left(\frac{1}{h_2^2} - \frac{1}{h_1^2} \right) + C \rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) p \tag{5.4}$$

- Les aires des sections 1 et 2 ont pour expressions : $A_1 = h_1^2$ et $A_2 = h_2^2$

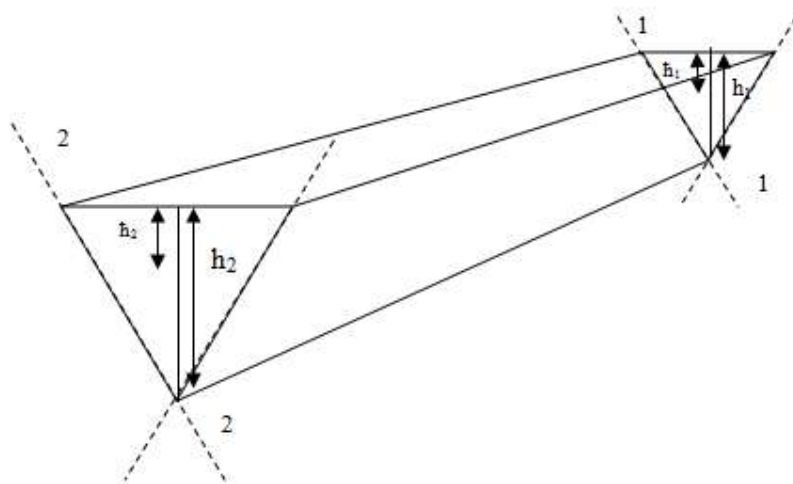


Figure 5.2: Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut.

- Les positions des centres de gravité des sections mouillées A_1 et A_2 : sont respectivement :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{3} \text{ et } \bar{h}_2 = \frac{h_2}{3}.$$

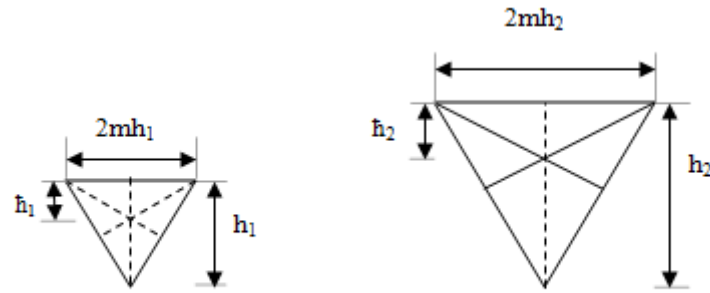


Figure 4.3 : Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut.

- Les vitesses : $V_1 = \frac{Q}{h_1^2}$ et $V_2 = \frac{Q}{h_2^2}$
- $Y = h_2/h_1$ étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.
- Le nombre de Froude incident de la section triangulaire est : $IF_1^2 = \frac{2Q^2}{gm^2h_1^5}$
pour un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° , $m = 1$.

L'équation (5.4) devient :

$$pg \left(\frac{h_1^3}{3} - \frac{h_2^3}{3} \right) = pQ^2 \left(\frac{1}{Y^2 h_1^2} - \frac{1}{h_1^2} \right) + C_p g L_j \left(\frac{Q^2}{2gh_1^4} \right) p \quad (5.5)$$

En faisant $\frac{\rho Q^2}{h_1^2}$ en facteur, l'équation (5.5) devient :

$$pg \left(\frac{h_1^3}{3} - \frac{h_2^3}{3} \right) = \frac{\rho Q^2}{h_1^2} \left(\frac{1}{Y^2} - 1 + C_g \frac{L_j}{2gh_1^2} p \right) \quad (5.6)$$

En divisant les deux membres par le terme pg , (5.6) devient :

$$\left(\frac{h_1^3}{3} - \frac{h_1^3 Y^3}{3} \right) = \frac{Q^2}{gh_1^2} \left(\frac{1}{Y^2} - 1 + C_g \frac{L_j}{2gh_1^2} p \right) \quad (5.7)$$

En faisant h^3 en facteur l'équation (5.7) devient :

$$\frac{1 - Y^3}{3} = \frac{Q^2}{gh_1^5} \left(\frac{1}{Y^2} - 1 + C \frac{L_j}{2h_1^2} p \right) \quad (5.8)$$

En introuisant l'expression du nombre de Froude dans l'équation (5.8) on obtient :

$$\frac{1 - Y^3}{3} = \frac{IF_1^2}{2} \left(\frac{1}{Y^2} - 1 + C \frac{Lj}{2h_1^2} p \right) \quad (5.9)$$

En remplaçant le perimetre mouillé p par sa valeur $p=2\sqrt{2}$, (5.9) devient :

$$\frac{1 - Y^3}{3} = \frac{IF_1^2}{2Y^2} \left(1 - Y^2 + C \frac{LjY^2}{h_1} \sqrt{2} \right) \quad (5.10)$$

L'équation (5.10) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$IF_1^2 = \frac{2Y^2(1 - Y^3)}{3 \left(1 - Y^2 + \frac{Y^2 Lj C \sqrt{2}}{h_1} \right)} \quad (5.11)$$

ensuite :

$$\frac{1}{IF_1^2} = \frac{3 \left(1 - Y^2 + \frac{Y^2 Lj C \sqrt{2}}{h_1} \right)}{2Y^2(1 - Y^3)} \quad (5.12)$$

et en faisant le developement suivant :

$$\left(1 - Y^2 + \frac{Y^2 Lj C \sqrt{2}}{h_1} \right) = (1 - Y^3) \times \left(1 - \frac{Lj C \sqrt{2}}{Y h_1} \right) + \frac{Lj C \sqrt{2}}{Y h_1} + Y^3 - Y^2 \quad (5.13)$$

et en remplaçant (5.13) dans (5.12) on obtient l'expression (5.15):

$$\frac{2}{3IF_1^2} = \frac{(1 - Y^3) \times \left(1 - \frac{Lj C \sqrt{2}}{Y h_1} \right) + \left(\frac{Lj C \sqrt{2}}{Y h_1} + Y^3 - Y^2 \right)}{Y^2(1 - Y^3)} \quad (5.15)$$

$$\frac{2}{3IF_1^2} = \frac{\left(1 - \frac{Lj C \sqrt{2}}{Y h_1} \right)}{Y^2} + \frac{\left(\frac{Lj C \sqrt{2}}{Y h_1} + Y^3 - Y^2 \right)}{Y^2(1 - Y^3)} \quad (5.16)$$

$$\text{soit } K = \frac{Lj C \sqrt{2}}{Y h_1}$$

l'expression (5.16) devient :

$$\frac{2}{3IF_1^2} = \frac{(1 - K)}{Y^2} + \frac{K + Y^3 - Y^2}{Y^2(1 - Y^3)} \quad (5.17)$$

le developpement de (5.17) permet d'ecrire :

$$\frac{2}{3IF_1^2} - \frac{K}{Y^2} \left(\frac{Y^3}{1-Y^3} \right) = \left(\frac{Y^3 - Y^2}{Y^2(1-Y^3)} \right) + \frac{1}{Y^2} \quad (5.18)$$

enn multipliant les deux membres par le terme $Y^2(1-Y^3)$ on aura :

$$\frac{2Y^2(1-Y^3)}{3IF_1^2} - KY^3 = Y^2(1-Y^3) \left(\frac{Y^3 - Y^2}{Y^2(1-Y^3)} + \frac{1}{Y^2} \right)$$

ensuite :

$$\frac{2(1-Y^3)}{3IF_1^2} - KY = (1-Y^3) \left(\frac{Y^3 - Y^2}{Y^2(1-Y^3)} + \frac{1}{Y^2} \right) \quad (5.19)$$

l'expression (5.19) peut être alors developpé selon les étapes suivantes :

$$\frac{1}{IF_1^2} \left[\frac{2}{3}(1-Y^3) - IF_1^2 KY \right] = \left(\frac{1-Y^2}{Y^2} \right)$$

$$\frac{1}{IF_1^2} \times \left[\frac{2}{3}(1-Y^3) - IF_1^2 KY \right] = \left(\frac{1-Y^2}{Y^2} \right)$$

et en divisant les deux membres par le terme $\frac{Y^2}{1-Y^2} IF_1^2$ on aura :

$$\left(\frac{Y^2}{1-Y^2} \right) \left[\frac{2}{3}(1-Y^3) - IF_1^2 KY \right] = IF_1^2$$

et puis :

$$\begin{aligned} \frac{2Y^2(1-Y^3)}{3(1-Y^2)} - \left(\frac{Y^3}{1-Y^2} \right) IF_1^2 K &= IF_1^2 \\ \frac{2Y^2(1-Y^3)}{3(1-Y^2)} &= IF_1^2 \left(1 - \frac{KY^3}{Y^2-1} \right) \end{aligned} \quad (5.20)$$

on pose $C_r = \frac{KY^3}{Y^2-1}$

En remplaçant K par sa valeur, le rapport C_r s'ecrit comme suit :

$$C_r = \frac{L_j C Y^2}{(Y^2-1)h_1} \quad (5.21)$$

Remplaçant (5.21) dans la relation (5.20) on obtient la relation finale (5.22) :

$$IF_1^2(1 - C_r) = \frac{2Y^2(1 - Y^3)}{3(1 - Y^2)} \quad (5.22)$$

Pour recouvrement totale de canal

En effet, cette expression est semi-théorique du fait que le coefficient de résistance C_r , ne peut être trouvé qu'à partir de données expérimentales.

Pour un coefficient C_r nul, l'expression (5.22) revient à l'équation théorique (1.5) de Hager et Wanoschek (1987) d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire à parois parfaitement lisse :

En outre, à travers une analyse expérimentale, l'expression (5.22) nous permettra d'évaluer la variation du coefficient C_r en fonction des autres caractéristiques du ressaut hydraulique.

V. .3. Conclusion

A travers une analyse théorique nous avons pu obtenir une relation semi-théorique de la forme $f(Y, F_1, C_r)$, permettant de trouver le rapport des hauteur conjuguées connaissant le coefficient de résistance et le nombre de Froude incident. Seulement, le coefficient étant une inconnue dans l'équation (5.22), il est nécessaire de procéder à une analyse expérimentale de cette expression afin d'évaluer la relation qui lie le coefficient C_r de résistance à la rugosité absolue ε .



Sixième Chapitre

**APPROCHE THÉORIQUE
EN CANAL
RECTANGULAIRE**

VI. 1. Introduction

Ce chapitre de la troisième partie de notre étude sera consacré à un développement théorique, permettant de trouver une relation semi-théorique de la forme $f(Y, F_1, C_r)$, tels que Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, F_1 est le nombre de Froude incident et C_r est le coefficient de résistance. Ce dernier exprime l'effet de la rugosité de canal rectangulaire sur le ressaut hydraulique.

VI. 2. Analyse théorique

La Figure 6.1 montre un ressaut contrôlé par seuil dans un canal de section droite rectangulaire symétrique à fond rugueuses. Le seuil dénuyé est placé à l'extrémité aval du canal, afin de surélever le plan d'eau à l'aval. h_1 et h_2 représentent les hauteurs conjuguées respectivement de la section initiale et finale du ressaut.

L'écoulement étant en régime torrentiel à l'amont et fluvial à l'aval.

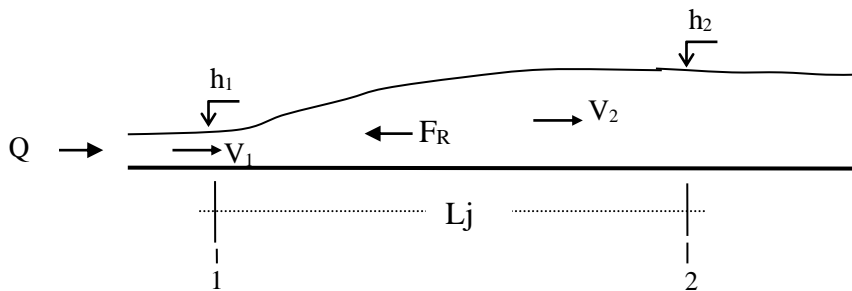


Figure 6.1 : Ressaut contrôlé par un seuil un canal rectangulaire à fond rugueux .

Etant donnée les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ la répartition pression hydrostatique des pressions, dans les sections amont et aval ;
- ✓ les frottements entre les particules d'eau et les parois du canal sont négligeables ;
- ✓ la pente du canal est faible ou presque nulle ;
- ✓ la résistance de l'air est négligeable, l'écoulement est permanent ;

on peut appliquer l'équation de quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut, en tenant compte de la force de résistance F_R due à la rugosité appliquée au fond du canal .

Cette équation s'écrit comme suit :

$$F_1 - F_2 - F_R = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad (6.1)$$

où :

F_1 et F_2 sont respectivement les forces de pression s'exerçant sur les sections amont et aval du ressaut : $F_1 = P_1 A_1$ et $F_2 = P_2 A_2$

V_1 et V_2 sont respectivement les vitesses aux sections amont et aval du ressaut,

ρ est la masse volumique du liquide,

Q est le débit volume.

F_R est la force de résistance due à la rugosité de fond du canal, dont l'expression est la suivante :

$$F_R = C\rho gLj\left(\frac{V_1^2}{2g}\right)p$$

g : l'accélération de la pesanteur (m/s^2) ;

Lj : Longueur du ressaut (m) ;

C : un coefficient du à la rugosité ;

p : Périmètre mouillé du canal.

L'équation (6.1) peut s'écrire alors sous la forme :

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 - C\rho gLj\left(\frac{V_1^2}{2g}\right)p = \rho QV_2 - \rho QV_1 \tag{6.2}$$

P étant la pression hydrostatique.

L'expression (6.2) s'écrit pour un canal rectangulaire sous la forme suivante :

$$\rho g \bar{h}_1 A_1 - \rho g \bar{h}_2 A_2 = \rho Q^2 \left(\frac{1}{bh_2^2} - \frac{1}{bh_1^2} \right) + C\rho gLj\left(\frac{V_1^2}{2g}\right)p \tag{6.3}$$

- Les aires des sections 1 et 2 ont pour expressions : $A_1 = bh_1^2$ et $A_2 = bh_2^2$

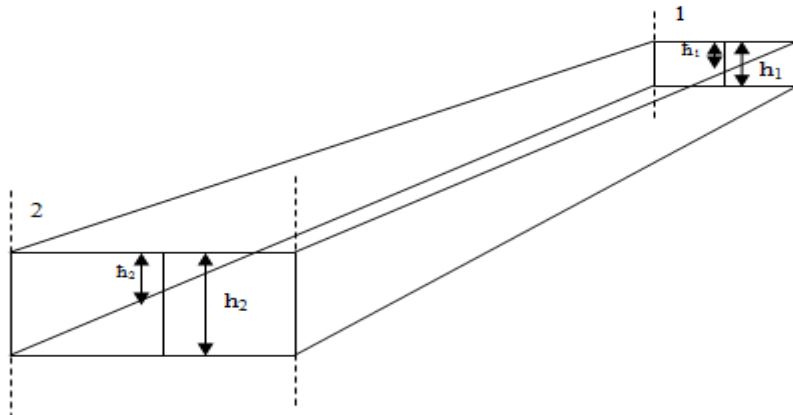


Figure 6.2: Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut.

- Les positions des centres de gravité des sections mouillées A_1 et A_2 :sont respectivement :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{2} \text{ et } \bar{h}_2 = \frac{h_2}{2} .$$

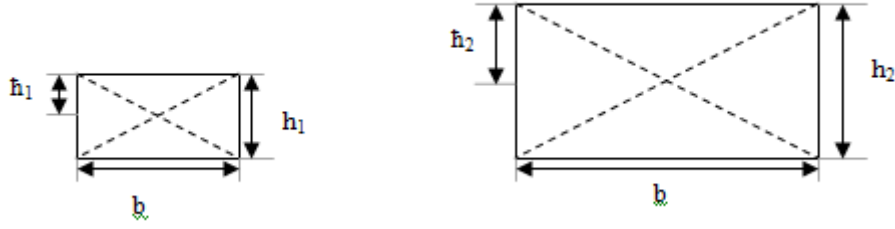


Figure 6.3 : Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut.

- Les vitesses : $V_1 = \frac{Q}{bh_1^2}$ et $V_2 = \frac{Q}{bh_2^2}$

- $Y = h_2/h_1$ étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.

- Le nombre de Froude incident de la section rectangulaire est : $IF_1^2 = \frac{Q^2}{gB^2h_1^3}$

L'équation (6.3) devient :

$$\rho gb \left(\frac{h_1^2}{2} - \frac{h_2^2}{2} \right) = \rho Q^2 \left(\frac{1}{bh_1} - \frac{1}{bh_2} \right) + C\rho gLj \left(\frac{Q^2}{2gb^2h_1^2} \right) P \quad (6.4)$$

En faisant $\frac{\rho Q^2}{h_1^2}$ en facteur, l'équation (6.4) devient :

$$gbh_1^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{Y^2}{2} \right) = \frac{Q^2}{bh_1} \left[\left(1 - \frac{1}{Y} \right) + \left(CLj \frac{1}{2bh_1} P \right) \right] \quad (6.5)$$

$$\left(\frac{1}{2} - \frac{Y^2}{2} \right) = \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} \left[\left(1 - \frac{1}{Y} \right) + \left(CLj \frac{1}{2bh_1} P \right) \right] \quad (6.6)$$

$$\left(\frac{1}{2} - \frac{Y^2}{2} \right) = IF_1^2 \left[\left(1 - \frac{1}{Y} \right) + \left(CLj \frac{1}{2bh_1} P \right) \right] \quad (6.7)$$

$$IF_1^2 = \frac{Q^2}{gB^2h_1^3}$$

$$\left(\frac{1}{2} - \frac{Y^2}{2} \right) = IF_1^2 \left[\left(1 - \frac{1}{Y} \right) + \left(CLj \left(\frac{1}{2h_1} \right) (2h_1 + b) \right) \right] \quad (6.8)$$

$$\frac{1}{2}(1 - Y^2) = IF_1^2 \left[\left(1 - \frac{1}{Y} \right) + \left(CLj \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{2h_1} \right) \right) \right] \quad (6.9)$$

Soit : $K = CLj \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{2h_1} \right)$

l'expression (6.9) devient :

$$\frac{1}{2}(1 - Y^2) = IF_1^2 \left[\left(1 - \frac{1}{Y} \right) + K \right] \quad (6.10)$$

En faisant le developement suivant :

$$\frac{1}{2}(Y^2 - 1) = \frac{1}{2}[(Y - 1)(Y + 1)] \quad (6.11)$$

Et en remplaçant (6.11) dans (6.10) on obtient l'expression (6.12):

$$\frac{1}{2}[(Y - 1)(Y + 1)] = F_1^2 \left[\left(\frac{Y-1}{Y} \right) + K \right] \quad (6.12)$$

le developement de (6.10) permet d'ecrire :

$$\frac{1}{2(Y-1)} [(Y - 1)(Y + 1)] = \frac{F_1^2}{Y-1} \left[\left(\frac{Y-1}{Y} \right) + K \right] \quad (6.13)$$

$$\frac{1}{2}(Y + 1)Y = F_1^2 \left[1 + \frac{YK}{Y-1} \right] \quad (6.14)$$

On pose :

$$Cr = \frac{YK}{Y-1} \quad (6.15)$$

$$\frac{1}{2}(Y^2 + Y) = F_1^2 [1 + Cr]$$

$$(Y^2 + Y) = 2F_1^2 [1 + Cr]$$

$$(4Y^2 + 4Y) = 8F_1^2 [1 + Cr]$$

$$(4Y^2 + 4Y + 1) = 8F_1^2 [1 + Cr] + 1$$

$$(2Y + 1)^2 = 8F_1^2 [1 + Cr] + 1$$

le developement de (14) permet d'ecrire :

$$(2Y + 1) = \sqrt{8F_1^2 [1 + Cr] + 1} \quad (6.16)$$

La relation (6.16) provient de l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre les deux sections amont et avale d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire horizontal.

On peut exprimer le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de nombre de Froude :

$$Y = \frac{1}{2} (\sqrt{8(F_1^2 - Cr) + 1} - 1) . \quad (6.17)$$

De la relation 21, 14 et 15 nous concluons un relation generale entre les trois coefficients des résistances Cr : $Cr = \frac{CLjp}{2A} \times B$

Le cas trapezoidale :
$$B = \frac{Y(b+mh_1Y)}{Y(b+mh_1Y)-(b+mh_1)}$$

Le cas traingulaire :
$$B = \frac{Y^2}{Y^2-1}$$

Le cas rectangulaire :
$$B = \frac{Y}{(Y-1)}$$

VI. 3. Conclusion

A travers une analyse théorique nous avons pu obtenir une relation semi-théorique de la forme $f(Y, F_1, C_r)$, permettant de trouver le rapport des hauteur conjuguées connaissant le coefficient de résistance et le nombre de Froude incident. Seulement, le coefficient étant une inconnue dans l'équation (6.17), il est nécessaire de procéder à une analyse expérimentale de cette expression afin d'évaluer la relation qui lie le coefficient C_r de résistance à la rugosité absolue ε .

Conclusion de la deuxième partie

La deuxième partie de ce présent mémoire a été consacré à l'étude théorique du ressaut hydraulique contrôlé par seuil, dans les canaux prismatique (rectangulaire, triangulaire et trapezoidale) a fond rugueuses.

L'étude a abordé, le développement d'une relation semi-théorique de la forme $f(Y, F1, Cr)$, permettant de trouver le rapport des hauteurs conjuguées connaissant le coefficient de résistance et le nombre de Froude incident.



Conclusion

Générale

DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALE

Notre étude s'est intéressée à l'analyse du ressaut contrôlé par seuil par voie théorique dans les canaux prismatique (rectangulaire ; triangulaire et trapézoïdale) à fond et parois rugueuses. Deux parties ont été nécessaires : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine, une deuxième partie qui nous a permis de trouver une relation semi-théorique de la forme $f(Y, F_1, C_r)$.

La première partie a été divisée en trois chapitres :

Le premier chapitre a eu pour but d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Le ressaut hydraulique classique, où nous avons mis l'accent sur les travaux de Hager (1990), relatif aux caractéristiques du ressaut classique. Nous avons montré que l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre ses sections initiale et finale, en négligeant les pertes de charge autres que celles dues au ressaut, mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement

Le second chapitre de cette partie bibliographique, a permis de mettre l'accent sur la démarche expérimentale assez particulière de HAGER et WANOSCHEK (1987) qui extrapolent les résultats issus d'un profil semi-triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° .

L'étude montre que les rapports Y expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs à ceux calculés par l'équation de la quantité de mouvement. Cette différence est attribuée à l'effet des frottements sur les parois du canal et l'équation de la quantité de mouvement est alors modifiée en tenant compte de ceux-ci. L'effet des frottements est traduit par le paramètre adimensionnel $\Lambda = [\nu m h_1 / (2Q)]^{1/4}$, où ν est la viscosité cinématique du liquide, m la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontale, h_1 la hauteur initiale du ressaut et Q le débit volume. Lorsque $\Lambda = 0$, aucun effet des frottements n'est observé et l'équation de la quantité de mouvement sous sa forme classique est applicable.

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

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

Le troisième et le dernier chapitre Le troisième et dernier chapitre a abordé, la classification du ressaut classique proposé par Bradley et Pterka (1957), dans un second temps, il a été cité les travaux de Hager et Wanoschek (1989), relatifs au ressaut hydraulique classique dans un canal trapézoïdal à angle d'ouverture de 45° . L'étude a concerné les caractéristiques du ressaut notamment ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau de 57 fond. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale.

La deuxième partie de ce présent mémoire a été consacré à l'étude théorique du ressaut hydraulique contrôlé par seuil, dans les canaux prismatique (rectangulaire, triangulaire et trapézoïdale) a fond et parois rugueuses.

L'étude a abordé, le développement d'une relation semi-théorique de la forme $f(Y, F_1, Cr)$, permettant de trouver le rapport des hauteurs conjuguées connaissant le coefficient de résistance et le nombre de Froude incident.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] : Achour, B. (1989). Jump flowmeter in a channel of triangular cross-section without weir, *Journal of Hydraulic Research* 27(2), 205-214.
- [2] : Achour, B., (1997) Dissipation d'énergie par ressaut, thèse d'état, Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil.
- [3] : Achour, B., Debabeche, M. (2003). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire. *Journal of Hydraulic Research* 41(3), 319-325.
- [4]: 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.
- [5]: 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 tailwater required (Basin VI), paper 1406, *Proceedings, American Society of Civil Engineers, J. Hydraulics division*, vo1.83, No. HY5.
- [6] : Bretz, N., V., (1988) Ressaut Hydraulique Forcé par seuil, *Laboratoire de constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, Communication No.2.*
- [7] : Debabeche, M., Achour, B., (1996) Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, 1er Séminaire Maghrébin sur l'eau, Université de Tizi ousou.
- [8] : Debabeche, M., (1996) Contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, *Thèse de Magistère, Université de Biskra.*
- [9] : Debabeche, M., Achour, B., (2002) L'influence du seuil sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire, *Colloque International "l'eau dans le bassin méditerranéen, watmed 2002"*, Monastir, Tunisie.
- [10] : Debabache, M., Achour, B., (2006). Effet du seuil sur le ressaut hydraulique dans canal triangulaire. *Journal of Hydraulic Research* (article accepté pour publication).
- [11] : Debabeche, M., (2003), Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- [12] : Forster ,J. W. and Skrinde, R. A., (1950), Control of Hydraulic jump by sills, *Trans. ASCE*, 115,973-1022.
- [13] : Hachemi Rachedi, L., (2006), Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, *Mémoire de magistère en sciences hydrauliques, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie.*
- [14]: Hager, W., Bremen R., H., (1989), Classical Hydraulic jump; sequent depth, *J. Hydraulic Research* 27(5),565-585.

- [15]: Hager, W., Bremen R., H., et Kawogoshi N. (1990), Classical Hydraulic jump; length of roller, J. Hydraulic Research 28(5),591-608.
- [16]: Hager, W. H., Li, D., (1992) Sill-controlled Energy Dissipator, J. Hydraulic Research, vol.30.
- [17]: Hager, W. H., Wanoschek, R., (1987) Hydraulic jump in triangular channel, J. Hydraulic Research, Vol. 25, No 5, pp-549-564.
- [18]Hager, W.H., Wanoschek, R (1989), Hydraulic jump in trapezoidal channel, J. hydraulic research, Vol. 27,1989, N.3.
- [19] : Kateb, S., (2006), Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de magistère d'état, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- [20]: Rajaratnam ,N., (1968) Hydraulic jumps on rough beds, Transaction of the engineering institute of Canada, Vol. 11, N° A-2.
- [21]: Safranez, K., (1933) Länge des Wechselsprunges, Wasserkraft, und Wasserwirtschaft, Munich, Vol.28, No24, 99.27-282.

Résumé

L'étude proposée a pour but d'analyser théoriquement et expérimentalement le ressaut hydraulique contrôlé en canal rectangulaire à fond rugueuses.

Trois grandes parties ont été nécessaires : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine. une seconde partie à travers laquelle nous avons tenté de développer une équation théorique, en introduisant la force de résistance dans l'équation de quantité de mouvement.

Abstract

The proposed study has for objective to analyze theoretically and experimentally the hydraulic jump evolving in rectangular shaped channel with rough background.

Three big parts were necessary : a first bibliographical part through which we reviewed current works held in this domain. A second part with through which we tried to develop a theoretical equation, by introducing the force of resistance into the momentum equation.

ملخص

تهدف هذه الدراسة المقترحة إلى إجراء التحليل النظري و التجريبي للقفزة المائية المراقبة بالعتبة داخل قناة يختص القسم الأول بالأبحاث المتعلقة بالأعمال المنجزة في هذا .مفتوحة مستطيلة الشكل ذات قاع خشن. المجال، أما القسم الثاني فمنا بمحاولة لإيجاد علاقة نظرية المتضمنة للقوة المقاومة داخل العلاقة الخاصة بكمية الحركة