



République Algérienne Démocratique & Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur & de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar – El Oued

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention de diplôme de Master en Hydraulique

Option : Ouvrage Hydraulique

THEME

**Contribution à l'étude de ressaut hydraulique
évoluant dans un canal rectangulaire de forme
composée à largeur variable**

Réalisé par :

Touhami Hamdi

Supervisé par :

Mr. ZAID Zaid

Co-encadreur:

Dr. GOMRI Ali

Présenté et soutenu publiquement

Devant le jury composé de

Année Universitaire : 2025-2026

Résumé :

Cette étude expérimentale a pour objectif d'analyser le comportement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à section variable, en présence d'un seuil.

Cette étude comporte deux volets complémentaires. Une première partie bibliographique a permis de dresser un état de l'art sur les recherches menées dans le domaine du ressaut hydraulique. Dans un second temps, une campagne expérimentale a été menée pour étudier l'influence d'un seuil sur les caractéristiques du ressaut dans un canal à section variable. Les résultats obtenus ont conduit à l'élaboration de relations empiriques adimensionnelles, généralisables à d'autres configurations.

Mots clés : ressaut hydraulique, canal rectangulaire de forme composée, seuil mince.

Abstract:

This experimental study aims to analyze the behavior of a hydraulic jump in a rectangular channel with a variable cross-section, in the presence of a weir.

The study consists of two complementary parts. A first part, a literature review, provided a state of the art on research conducted in the field of hydraulic jumps. In a second part, an experimental campaign was conducted to study the influence of a weir on the characteristics of the jump in a channel with a variable cross-section. The results obtained led to the development of dimensionless empirical relationships, generalizable to other configurations.

Keywords: hydraulic jump, rectangular channel of composite shape, sharp-crested weir.

ملخص:

تهدف هذه الدراسة التجريبية إلى تحليل سلوك القفزة المائية في قناة مستطيلة ذات مقطع متغير، وذلك في وجود عائق (سد).

تتكون الدراسة من جزئين رئيسيين الجزء الأول هو استعراض شامل للأبحاث والاعمال المنجزة في هذا المجال أما الجزء الثاني، فقد تضمن إجراء تجارب عملية لدراسة تأثير السد على خصائص الانقطاع في قناة ذات مقطع متغير. وقد أدت النتائج التي تم الحصول عليها إلى تطوير علاقات تجريبية لا تعتمد على وحدات القياس، ويمكن تطبيقها على حالات أخرى مشابهة.

الكلمات المفتاحية: القفزة المائية، قناة مستطيلة مركبة الشكل، عتبة حادة.

Liste des abréviations

A1	L'aire de la section mouillée initiale	[m ²]
A2	L'aire de la section mouillée finale	[m ²]
B et b	Largeur de lit majeur et de lit mineur du canal	[m]
F1	Nombre de Froude à l'amont du ressaut	[—]
f1 ; f2	Force hydrostatique au pied et à la fin du ressaut	[N]
F1	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	[N]
F2	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	[N]
g	Accélération de la pesanteur	[m/s ²]
h	Hauteur de plein bord du lit mineur	[m]
h ₁	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h ₂	Hauteur finale du ressaut	[m]
h _{c0}	La hauteur du lit mineur du canal rectangulaire composée	[m]
h _{c1}	La hauteur du lit majeur du canal rectangulaire composée	[m]
$\bar{h}$	Profondeur du centre de gravité de la section mouillée	[m]
H ₁ et H ₂	Charges totales au pied et à la fin du ressaut	[m]
ΔH	Pertes de charge dues au ressaut	[m]
H _{dev}	Hauteur de la lame déversant	[m]
K	Facteur de position	[—]
L _j	Longueur du ressaut	[m]
L _r	Longueur du rouleau	[m]
L _j *	Longueur relative du ressaut classique	[m]
L _r *	Longueur relative du rouleau classique	[m]
ΔP	La variation dans la quantité de mouvement	[kg.m.s ⁻¹]
P	Pression	[N/m ²]
P ₁	Pression hydrostatique appliquée à la section amont du ressaut	[Pa]
P ₂	Pression hydrostatique appliquée à la section aval du ressaut	[Pa]
Q	Débit volume	[m ³ /s]
Q	Débit unitaire	[m ² /s]
Re	Nombre de Reynolds	[—]
R _h	Rayon hydraulique	[m]
V	Le volume du liquide	[m ³]
V ₁ et V ₂	Vitesses moyennes au pied et à la fin de ressaut	[m/s]

Liste des abréviations

W	Rapport d'aspect $W = h_1/b$	[-]
X	Coordonnée longitudinale	[m]
X	Position d'un seuil	[m]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées	[-]
Y*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
β	Rapport de l'élargissement	[-]
T	Rapport des hauteurs	[-]
λB	Longueur relative du bassin	[m]
λS	Position relative du seuil	[m]
λr^*	La variation de la longueur relative du rouleau	[m]
η	Rendement du ressaut	[-]
η^*	Rendement du ressaut classique	[-]

Liste des matières

Remercîments	Error! Bookmark not defined.
Résumé :	I
Liste des abréviations	II
Liste des matières	IV
Liste des Figures	VI
Liste des Photos	IX
Introduction générale	1

Chapitre I : Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

I.1. Introduction	2
I.2. Définition	3
I.3. Ressaut hydraulique classique.....	4
I.3.1 Classification du ressaut classique	4
I.3.2 Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut	5
I.3.3 Caractéristiques géométriques du ressaut	8
I.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire	12
I.4.1 Approche de Forster et Skrinde (1950)	12
I.5. Ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire.....	17
I.5.1 Approche de Rand.....	17
I.5.2 Approche de Bretz.....	19
I.6. Conclusion.....	25

Chapitre II : Ressaut Hydraulique Dans Un Canal Trapezoïdal

II. 1. Introduction :	27
II. 2. Généralité :	27
II.3. Ressaut hydraulique classique dans un canal trapézoïdal.....	28
II.3.1. Les travaux de Hager et Wanoschek (1987-1989).....	28
II.4. Ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal contrôlé par marche positive ...	39
II.4.1. Travaux de Kateb, Debabache et Benmalek (2013)	39
II.5. Conclusion	43

Chapitre III : Description du modèle expérimentale

III.1. Introduction	44
III.2. Description du canal	44
III.3. Limnimètre :	49
III.4. Les seuils minces	51
III.5. Modèle expérimental	53
III.6. Conclusion	53

Chapitre IV: Étude expérimentale

IV.1.Introduction	54
IV.2. Effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire de forme composée	54
IV.2.1. Position du problème.....	54
IV.2.2. Mesure du débit volume Q	55
IV.2.3. Procédure expérimentale	55
IV.3. Analyse des résultats expérimentaux	58
IV.3.1. Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y en fonction du nombre de Froude Fr_1	58
IV.4. Conclusion.....	62
Conclusion.....	63
Références bibliographiques	65

Liste des Figures

Figure I.1: Ressaut Hydraulique	3
Figure I.2 a : Ressaut ondulé	4
Figure 1.2.c: Le ressaut de transition.....	5
Figure 1.2.d: Le ressaut stable	5
Figure 1.2.e: Le ressaut clapoteux	5
Figure I.3: Représentation des forces agissantes sur le ressaut	6
Figure I.4: Représentation graphique de l'équation de Bélanger (1828)	8
Figure I.5: Hauteur du ressaut Longueur du rouleau.....	8
Figure I.6: Aspect du ressaut classique a) Rouleau développé b) Rouleau non développé	9
Figure I.7: (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique	11
Figure I.8: Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 , (—) Courbe tracée selon la relation (1.25), (-----) courbe tracée Selon la relation (1.26).....	12
Figure I.9: Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.	13
Figure I.10: Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince quelques valeurs de x/h_2 , selon Forster et Skrinde (1950).....	14
Figure I.11: Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions	15
Figure I.12: Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation (1.30)	16
Figure I.13: Ressaut forcé par marche positive de hauteur s'' , les parties hachures correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions	16
Figure I.14: Variation du nombre de Froude F_1 , en fonction de h_3/h_1 et de la hauteur relative s/h_1 de la marche positive, selon Forster et Skrinde (1950)	17
Figure I.15: Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes selon Rand (1957): 0) Ressaut classique avec hauteurs conjuguées h_1 et h_2 ; 1) class 1, longueur L_s , min.; 2) class 2, longueur intermédiaire L_s ; 3) class 3, longueur $L_{s,max}$; s : hauteur du seuil, s_c : hauteur critiques du seuil et s_{max} : hauteur maximale du seuil.....	18
Figure I.16 Hauteurs conjuguées $h_2/h_1 = f(S, K)$ pour $F_1 = 9$. Valeurs et courbes expérimentales : (---) limite d'influence de l'aval sur l'amont.	19
Figure I.17: Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $F_1 = 5,23$ et $S = 1,42$. 1) Ressaut type A; 2) Ressaut type B; 3) Ressaut type Bmin; 4) Ressaut type C et 5) onde. (Bretz, 1987).....	20

Figure I.18: ressaut forcé par seuil selon Bretz (1965): définition des termes. H_1 charge amont, H_2 charge aval, ΔH perte de charge, h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x_0 position du pied du ressaut, x_s position du seuil, x_{rf} position de la fin du rouleau de fond à l'aval, L_r longueur du rouleau de surface, L_s position du seuil par rapport au pied du ressaut, L_{RF} longueur du rouleau de fond aval, L_B distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval. ...	21
Figure I.19: Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_A = f(F_1, S)$ avec $0,5 \leq S \leq 6$. $S = s/h_1$ (—) courbe selon l'équation de Bélanger. (----) courbe du ressaut classique selon l'équation (1.32)	22
Figure I.20: Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_B = f(F_1, S)$. Même notation que la (Figure 1.19)	23
Figure I.21: Ressaut forcé type B-min. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_{B-min} = f(F_1, S)$ Même notation que la (Figure 1.19)	23
Figure I.23: Longueur relative $\lambda S = f(F_1)$ pour le ressaut forcé: a) type A, b) type B etc) type B - min. (—) courbe selon l'équation: a) (1.36), c) (1.37) et (1.38) respectivement.	24
Figure I.22: Longueur relative $\lambda B = f(F_1)$ pour le ressaut forcé: a) type A, b) type B et c) type B-min. (—) courbe selon l'équation: a) (1.39), b) (1.40) et c) (1.41) respectivement. (----) courbe limite.	24
Figure. II.1 : Vue schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut en canal trapézoïdal. (→) courants de surface, (--->) courants de fond.	30
Figure.II.2 : Hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M=mh_1/b$	31
Figure .II.3 : Hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M=mh_1/b$, (—) : équation 2.4 ; (...) $M=0$; (▼) $M=0.1$; (■) $M=0.2$; (▲) $M=0.3$; (●) $M=0.4$; (■—■) $M = \infty$	32
Figure. II.4 : Croquis de définition	33
Figure .II.5 : Caractéristiques principales du rouleau de fond : a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximale adimensionnelle h_b / h_2 en fonction de F , et de M . (▼) $M=0.1$; (■) $M=0.2$; (▲) $M=0.3$; (●) $M=0.4$	33
Figure. II.6 : Longueur relative λ_s de courant de retour latérale. (▼) $M=0.1$; (■) $M=0.2$; (▲) $M=0.3$; (●) $M=0.4$	35
Figure. II.7 : Longueur relative λ_j de ressaut en fonction de F_1 et de M . (▼) $M=0.1$; (■) $M=0.2$; (▲) $M=0.3$; (●) $M=0.4$. (...) pour un ressaut en canal rectangulaire.....	35
Figure. II.8 : Schéma de définition du ressaut hydraulique	37
Figure. II.9 : Dissipation relative d'énergie : $\eta = \Delta H H_1$, fonction de F_1 et de M	38

Figure. II.10 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 ; (O) ressaut contrôlé par seuil mince ; ($\square$) ressaut contrôlé par marche positive ; (Δ) ressaut forcé de type A par marche positive ; (-----) courbe tracé selon la relation théorique.....	40
Figure. II.11 : Variation du rapport S de la marche en fonction du nombre de Froude F_1 . ($\blacktriangle$) Ressaut contrôlé par marche positive ; ($\square$) ressaut contrôlé par seuil mince ; (ж) ressaut forcé de type A par marche positive.....	41
Figure. II.12 : Variation de la position de la marche X en fonction du nombre de Froude F_1 . ($\blacktriangle$) Ressaut contrôlé par marche ; ($\square$) ressaut contrôlé par seuil mince ; (ж) Ressaut forcé de type A par marche positive.....	41
Figure .II.13 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . ($\blacktriangle$) Ressaut contrôlé par marche ; ($\square$) ressaut contrôlé par seuil mince ; (ж) ressaut forcé de type A par marche positive.....	42
Figure III.1: Schéma simplifié du canal de mesure de section droite rectangulaire de forme composée, ayant servi à l'expérimentation.....	44
Figure III.2 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.....	49
Figure IV.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil en canal composé droit.....	55
Figure IV.2 : Différentes configurations du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince, obtenues à débit croissant pour une position de seuil $x = 233$ cm, une hauteur initiale $h_1 = 2$ cm et $\Delta x \approx 5$ cm.	58
Figure IV.3 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre.	59
Figure IV.4 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre.	60
Figure IV.5 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre.	62

Liste des Photos

Photo III.1 : Pompe centrifuge axiale (pompe principale).	45
Photo III.2 : Deuxième pompe (pompe de renforcement).....	45
Photo III.3 : Photographie du model expérimentale du cana (vu latérale)	46
Photo III.4 : Photographie du model expérimentale du canal (vue plan).	46
Photo III.5 : Photographies de la convergent (la hauteur de l'ouverture =2cm).	47
Photo III.6 : Photographie d'un vérin manuel et vanne de manipulation.	47
Photo III.7 : Raccordement des pompes.	48
Photo III.8 : Photographie d'une boîte en charge.	48
Photo III.9 : Photographies des limnimètres qui sont utiliser dans le model.	50
Photo III.10 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit.	51
Photo III.11 : Photographie des seuils minces testés.	52
Photo III.12 : Support du seuil.....	52

Introduction générale

Introduction générale :

Dans le domaine des infrastructures hydrauliques, les ouvrages de dissipation d'énergie jouent un rôle fondamental dans la protection des lits fluviaux contre l'érosion aval induite par les restitutions de débits. Parmi les dispositifs d'atténuation les plus répandus, le bassin d'amortissement (ou bassin de dissipation) constitue une solution technologique éprouvée. Son principe de fonctionnement repose sur la transition hydrodynamique d'un régime torrentiel à un régime fluvial à travers le phénomène du ressaut hydraulique, permettant ainsi de dissiper une fraction substantielle de l'énergie cinétique de l'écoulement.

Au cours des dernières décennies, le ressaut hydraulique a suscité de nombreuses recherches, tant fondamentales qu'appliquées. La littérature scientifique met en évidence que la configuration spatiale et les caractéristiques du ressaut dépendent intrinsèquement des conditions aux limites amont (débit, hauteurs d'eau, nombre de Froude) et aval (pente du canal, rugosité du fond, ainsi que la géométrie, la hauteur et le positionnement d'éventuels obstacles).

L'analyse des paramètres macroscopiques du ressaut — notamment le rapport des hauteurs conjuguées, l'efficacité de la dissipation énergétique et la longueur de la zone de transition — a fait l'objet d'investigations approfondies dans diverses configurations géométriques. Pour les canaux rectangulaires horizontaux, les travaux de référence incluent ceux de Rand (1957, 1965), Rajaratnam (1964, 1965, 1967, 2002), Rajaratnam et Subramania (1967), Rajaratnam et Murahari (1971), ainsi que Hager et Bretz (1987) et Hager et Sinniger (1990). Plus récemment, l'intérêt scientifique s'est élargi aux géométries complexes, à l'instar des études menées par Khatti et Ashour (2012), puis par Riguet, Debabeche et Ghomri (2019) sur le ressaut au sein de canaux de section rectangulaire composée.

L'ensemble de ces contributions vise à optimiser le dimensionnement des bassins d'amortissement en déterminant la géométrie optimale et la disposition des macro-rugosités ou des obstacles nécessaires pour maximiser la dissipation de l'énergie cinétique. Compte tenu de la complexité tridimensionnelle et turbulente de ces écoulements à surface libre, le choix et la validation de ces configurations reposent encore essentiellement sur des campagnes expérimentales rigoureuses menées en laboratoire.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette dynamique de recherche et porte sur l'étude d'un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince, évoluant au sein d'un canal de section rectangulaire composée à largeur variable. L'objectif principal est de formaliser, sous forme de relations fonctionnelles adimensionnelles, l'influence directe de ce seuil sur les caractéristiques hydrodynamiques et morphologiques du ressaut. Les lois d'échelle ainsi proposées permettront de quantifier l'impact combiné des singularités géométriques du canal et du dispositif de contrôle sur l'efficacité globale du processus de dissipation.

Chapitre I :
Ressaut hydraulique en canal
rectangulaire

I.1. Introduction

D'un point de vue historique, les premières investigations sur le phénomène du ressaut hydraulique reposaient essentiellement sur des configurations en canal rectangulaire. Par conséquent, le ressaut hydraulique classique constitue le fondement des développements théoriques et expérimentaux en hydraulique des canaux. Ce phénomène assure la transition abrupte d'un régime torrentiel vers un régime fluvial, générant une dissipation massive d'énergie hydraulique au sein d'un écoulement brusquement varié.

Le nombre de Froude amont, noté F_1 , représente le paramètre adimensionnel clé permettant de caractériser l'état de l'écoulement en amont de cette transition. Dans le cas d'un canal à section transversale rectangulaire, il est défini par la relation $F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \times y_1}}$ ou V_1 est la vitesse moyenne de l'écoulement, g l'accélération de la pesanteur et y_1 la hauteur d'eau initiale. La variation de ce paramètre autour de l'unité détermine la nature du régime hydrodynamique : si $F_1 \leq 1$, l'écoulement est qualifié de fluvial ou critique, tandis qu'au-delà de cette valeur critique ($F_1 > 1$), le régime devient torrentiel, ce qui donne naissance à différentes configurations de ressauts hydrauliques présentées dans ce chapitre selon la classification de Bradley et Peterka (1957).

Il est formellement admis que le mécanisme du ressaut est régi par l'équation de la quantité de mouvement, dont l'application vise à déterminer la relation fonctionnelle liant le rapport des hauteurs conjuguées Y^* au nombre de Froude F_1 . Pour une section droite rectangulaire, l'équation historique de Bélanger (1828) illustre parfaitement l'application du théorème d'Euler au ressaut classique. En complément, ce travail expose également la formulation simplifiée du rapport Y^* proposée ultérieurement par Hager et Sinniger (1985).

Par ailleurs, le ressaut est caractérisé par des propriétés géométriques spécifiques, notamment la longueur de son rouleau L_r^* ainsi que sa longueur totale de développement L_j^* . En raison de la complexité de la turbulence interne, l'évaluation de ces grandeurs n'a pu être effectuée que par voie empirique et expérimentale. Les contributions de Hager et de ses collaborateurs (1990) constituent ici la base bibliographique pour quantifier l'évolution de ces caractéristiques géométriques du ressaut classique.

La capacité du ressaut à dissiper une telle quantité d'énergie est quantifiée par son rendement macroscopique η , défini comme le rapport entre la perte de charge totale ΔH_{1-2} et la charge totale initiale en amont H_1 . Afin d'évaluer ce paramètre, ce chapitre passe en revue les modèles analytiques développés par Hager et Sinniger (1986), notamment leur relation permettant un calcul explicite du rendement η .

Enfin, ce chapitre aborde l'étude du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par un seuil au sein d'un canal rectangulaire. Les fondements théoriques et expérimentaux dans ce domaine s'appuient sur les travaux de Forster et Skrinde (1950), ainsi que sur ceux de Rand (1957) et de Bretz (1988). L'analyse permet de présenter la relation reliant le rapport des hauteurs conjuguées Y , le nombre de Froude F_1 et la hauteur relative du seuil S , tout en évoquant les approches théoriques relatives aux écoulements franchissant soit un seuil continu à paroi mince, soit un seuil à paroi épaisse.

I.2. Definition

Le ressaut hydraulique est une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement permanent, qui se produit lors du passage du régime torrentiel au régime fluvial. Il est accompagné d'une agitation marquée et de grandes pertes d'énergie (figure I.1)

L'écoulement en amont du ressaut est caractérisé par un nombre adimensionnel, c'est le nombre de Froude F_1 (pour un canal de section droite rectangulaire), qui est donné par :

$$F_1 = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

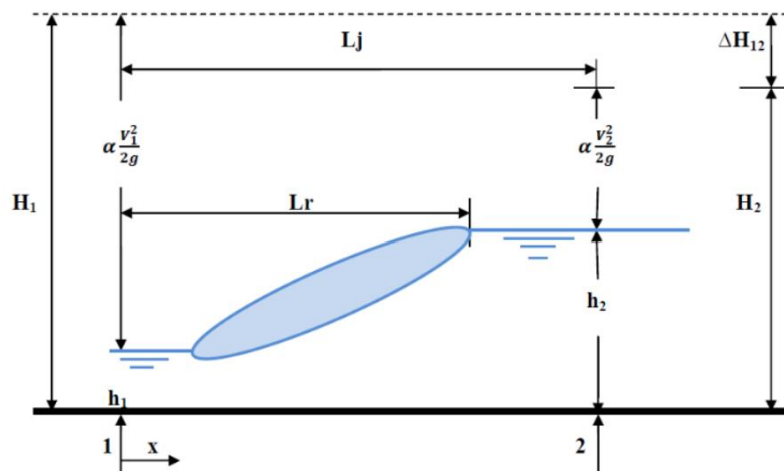


Figure I.1: Ressaut Hydraulique

Les hauteurs h_1 et h_2 sont appelées profondeurs conjuguées du ressaut. La distance L_j entre la section 1 et 2 est appelée longueur du ressaut et la distance L_r est appelée longueur du rouleau de surface. La perte de charge est représentée par ΔH_{1-2} . La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ces sections initiales et finales à la charge totale dans sa section initiale. L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un coefficient cinétique (ou nombre de Froude $F_1 > 1$) et

représente la relation entre la Vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation des petites perturbations.

I.3. Ressaut hydraulique classique

Les études préliminaires dans ce domaine sont effectuées sur le modèle du ressaut classique, ce type du ressaut hydraulique se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible.

I.3.1 Classification du ressaut classique

La classification du ressaut classique est basée sur la variation du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut.

Pour les valeurs de $F_1 \leq 1$, le régime est lent, ou critique, il n'y a pas de ressaut. Pour des valeurs de nombre de Froude comprises entre 1 et 1,7 et cela d'après Andersen (1978), la différence des profondeurs conjuguées en amont et en aval est très faible, et le ressaut est caractérisé par de légères rides à la surface libre, aspect qui diffère peu de celui que l'on observe dans le régime critique, c'est le ressaut ondulé (figure 1.2.a)

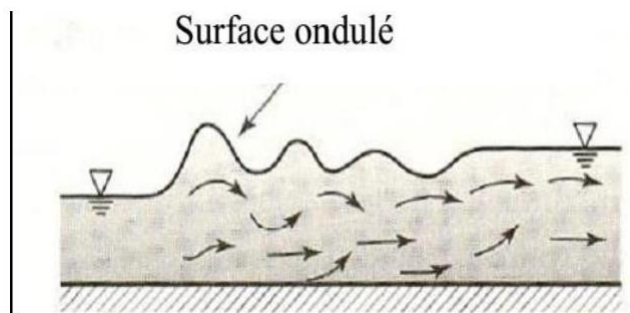


Figure I.2 a : Ressaut ondulé

Selon la classification de Bradly et Peterka (1957) on distingue quatre formes de ressaut classique.

1. Pour des valeurs de $1,7 < F_1 < 2,5$, on constate le même phénomène, mais plus accentué, dans ce cas se produisent déjà de petits tourbillons superficiels. Jusqu'à ces valeurs de F_1 , la surface libre est raisonnablement plane et la distribution des vitesses est régulière mais le rendement obtenu est très faible : c'est le pré-ressaut (figure 1.2.b)

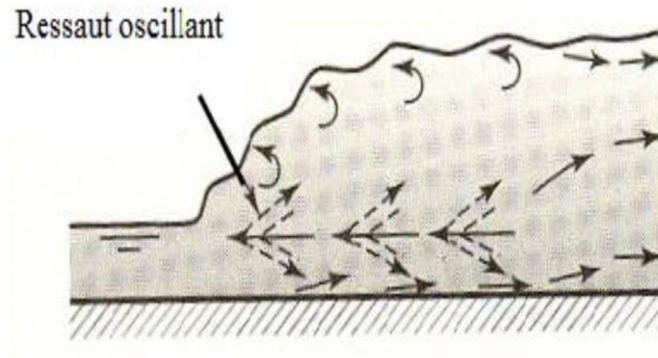


Figure 1.2.c: Le ressaut de transition

3. Pour des valeurs de $4,5 < F_1 < 9$, le ressaut est bien caractérisé et localisé. Ce type du ressaut est souvent adopté pour les bassins de dissipation d'énergie pour son bon rendement (45% et 70%): c'est le ressaut stable (figure 1.2.d).

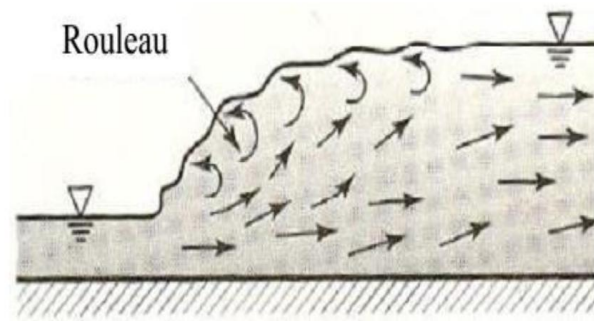


Figure 1.2.d: Le ressaut stable

4. Pour des valeurs de $F_1 > 9$, on constate des masses d'eau qui roulent par-dessous, au début du ressaut, et tombent sur le circuit rapide d'amont, d'une manière intermittente, provoquant des nouvelles ondulations en aval et la surface libre du ressaut est irrégulière : c'est le ressaut agité ou clapoteux (figure 1.2.e).

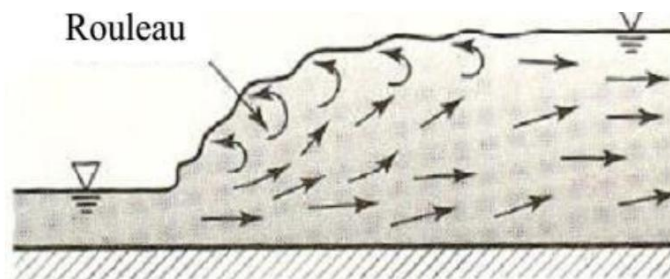


Figure 1.2.e: Le ressaut clapoteux

I.3.2 Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut

On ne peut pas appliquer le théorème de Bernoulli entre les sections 1 et 2 pour déterminer les profondeurs conjuguées du ressaut, étant donné que le terme $\rho \cdot Q \cdot V$ n'est pas connu et que les formules du régime uniforme d'Euler qui permet de résoudre ce problème. Considérons un ressaut classique évoluant entre la section initiale et finale respectivement 1 et 2 (figure 1.3).

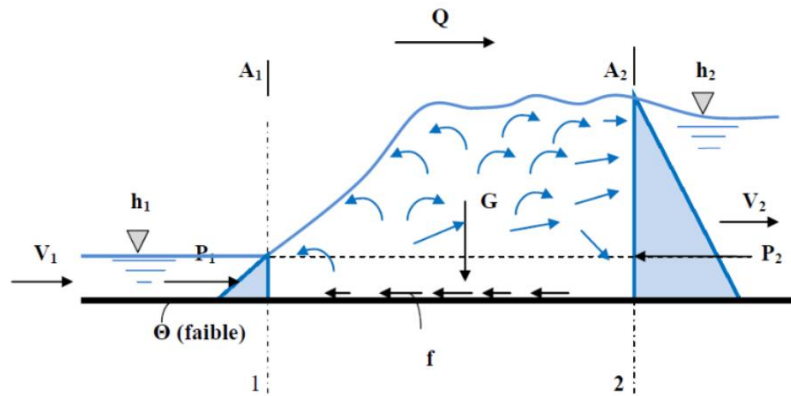


Figure I.3: Représentation des forces agissantes sur le ressaut

L'équation de continuité permet d'écrire :

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

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

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

D'après le résultat classique dû à Bélanger (1828) qui s'obtenait en appliquant le théorème d'Euler qui ne fait intervenir que les forces extérieures et qui ne met pas en cause les pertes de charges dues à la turbulence et aux remous intérieurs. Donc l'auteur a appliqué ce théorème à la masse liquide contenue entre les sections (A1) et (A2) et a supposé :

- La répartition des pressions dans les sections (A1) et (A2) est hydrostatique.
- Les frottements sur les parois et le fond du canal le long de la faible distance séparant (A1) et (A2) sont négligeables par rapport à la perte de charge due à la turbulence créée par le ressaut.
- Les vitesses des différents filets liquides dans chacune des sections (A1) et (A2), sont parallèles à la vitesse moyenne V , considérées uniformes.
- La résistance de l'aire est négligeable.

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

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

Où:

β : facteur de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité
Puisque la répartition des vitesses est supposée uniforme.

ρ : la masse volumique du liquide en mouvement.

Q : débit volume.

V : vitesse d'écoulement.

g : accélération de la pesanteur.

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

P_1 et P_2 : forces des pressions hydrostatiques.

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

f : force de frottement (considérée comme négligeable).

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

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

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

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

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

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

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

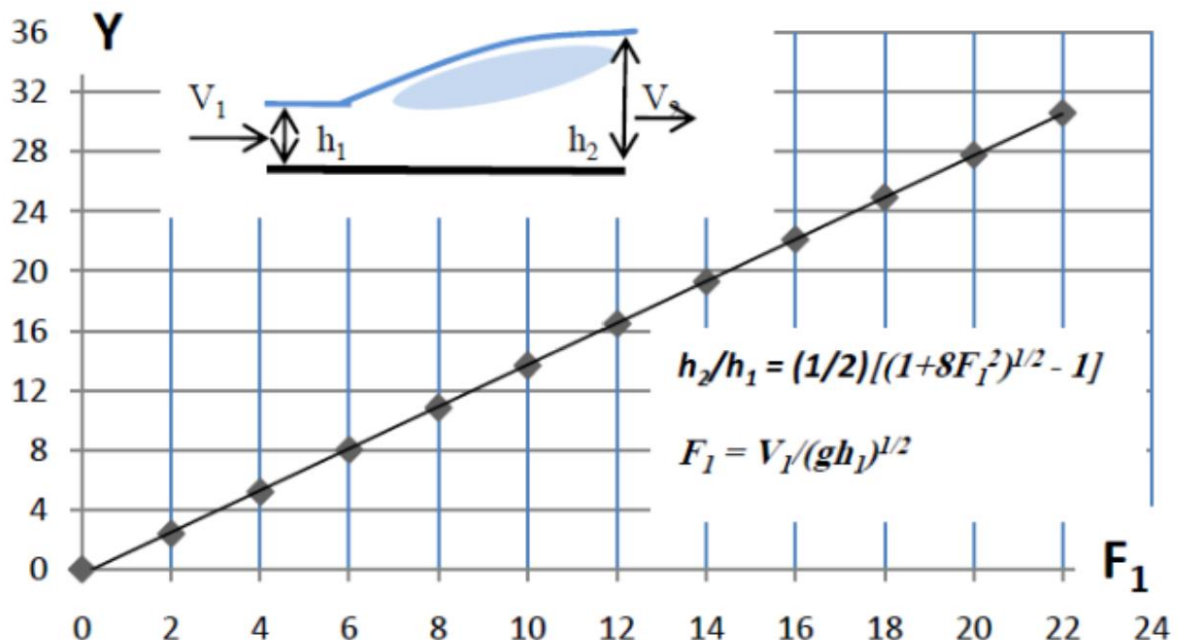


Figure I.4: Représentation graphique de l'équation de Bélanger (1828)

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

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

I.3.3 Caractéristiques géométriques du ressaut

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

I.3.3.1 Hauteur du ressaut

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

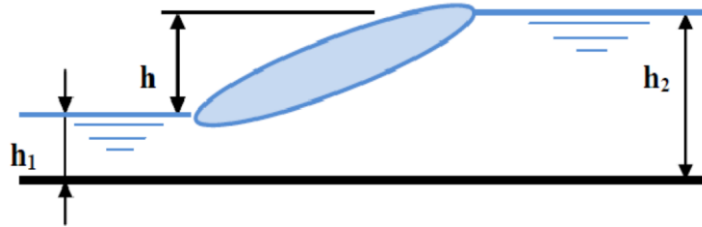


Figure I.5: Hauteur du ressaut Longueur du rouleau

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

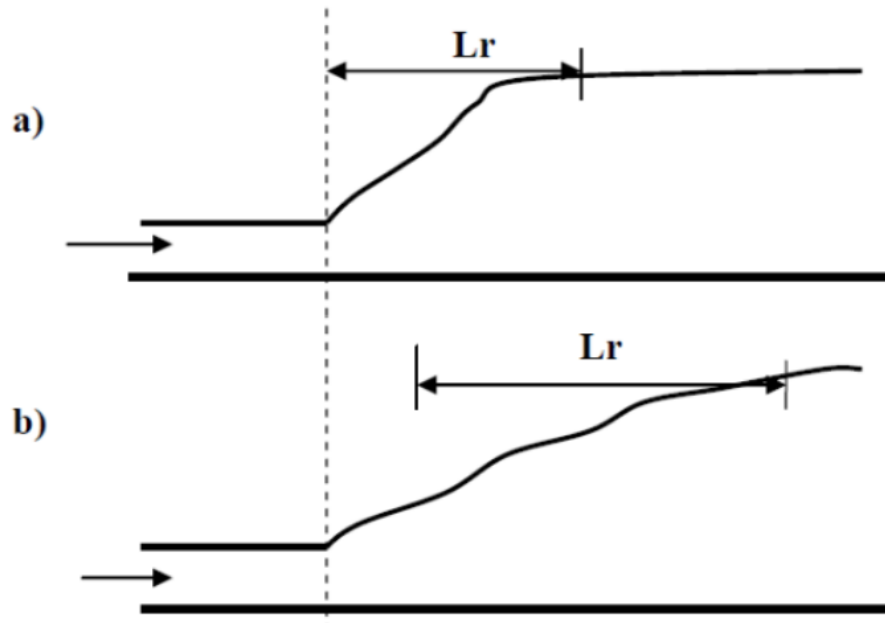


Figure I.6: Aspect du ressaut classique a) Rouleau développé b) Rouleau non développé

La forme générale du rouleau développé est presque uniforme (figure 1.6.a). Par contre le rouleau non développé est présenté par une surface libre perturbée sous l'effet des vagues qui se forment à l'aval (figure 1.6.b).

Les résultats expérimentaux de Hager et al. (1990) ont permis de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur relative du rouleau de surface du ressaut, peut s'écrire :

$$\lambda_r = -12 + 160.Tgh\left(\frac{F_1}{20}\right) \text{ Pour } w = \left(\frac{h_1}{b_1}\right) < 0.1 \quad (1.8)$$

$$\lambda_r = -12 + 100.Tgh\left(\frac{F_1}{12.5}\right) \text{ Pour } 0.1 < W < 0.7 \quad (1.9)$$

Où

$$W = \frac{h_1}{b} \text{ et } \lambda_r = \frac{L_r}{h_1}$$

Le rapport λ_r est lié au nombre de Froude F_1 et au rapport d'aspect.

Tgh: indique la tangente hyperbolique.

Il faut noter ici que pour une gamme des valeurs de nombre de Froude $2,5 < F_1 < 8$ les auteurs ont proposé la relation suivante :

$$\lambda_r = \frac{L_r}{h_1} = 8.(F_1 - 1.5); 2.5 < F_1 < 8 \quad (1.10)$$

I.3.3.2 Longueur du ressaut

Les longueurs caractéristiques du ressaut définies ci-dessus L_r et L_j sont très difficiles à déterminer. Dans ce cas les auteurs ont employé la voie expérimentale pour évaluer ces grandeurs. Hager et al. (1990) ont proposé une relation permettant d'évaluer la longueur L_j du ressaut, peut s'écrire comme suite :

$$\frac{L_j}{h_1} = 220 \cdot \tanh \left[\frac{(F_1 - 1)}{22} \right] \quad (1.11)$$

D'après Hager et al. (1990), la variation de la longueur relative L_j/h_2 en fonction du nombre de Froude F_1 montre que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à 6 pour une gamme pratique $4 < F_1 < 12$ on peut écrire :

$$\frac{L_j}{h_2} = 6 \quad (1.12)$$

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

- Formule de Smetana (1933) $L_j = 6(h_2 - h_1)$ (1.13)

Pour un nombre de Froude au-delà de $F_1 = 3$ selon Sinniger et Hager (1985), on peut également appliquer la formule empirique suivante :

$$\frac{L_j}{h_2} = \frac{35\sqrt{F_1}}{(8 + F_1)} \quad (1.14)$$

Et qui conduit aux mêmes résultats.

I.3.3.3 Rendement du ressaut

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

Par l'application du théorème de Bernoulli (1738) on peut déterminer la perte d'énergie, $\Delta H_{1-2} = H_1 - H_2$ produite par le ressaut en admettant que $Z_1 = Z_2$, (figure 1.7), on obtient :

$$\Delta E_{12} = \Delta H_{12} = \left(\alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \right) - \left(\alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \right) \quad (1.15)$$

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

$$H_1 = \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \quad (1.16)$$

Et la charge totale dans la section aval est :

$$H_2 = \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \quad (1.17)$$

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

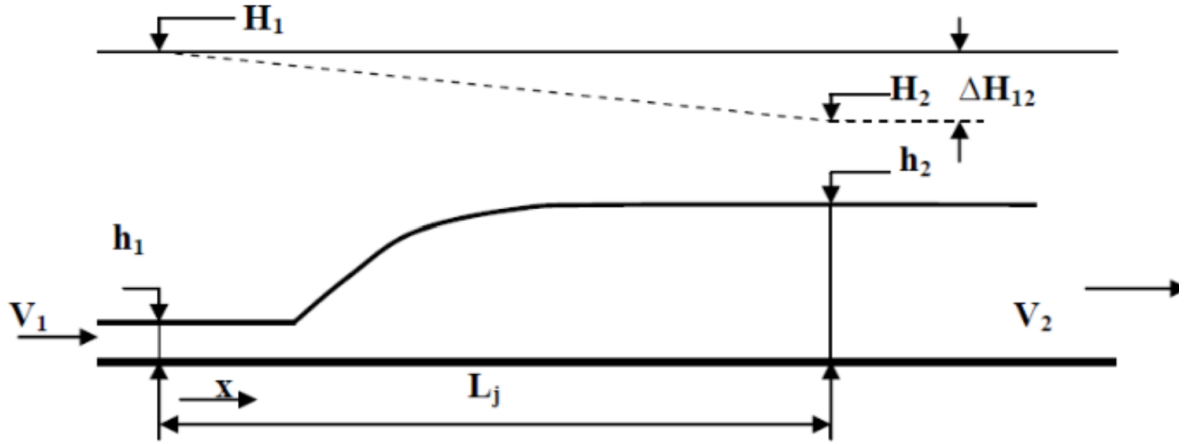


Figure I.7: (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

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

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (1.18)$$

Où: $A_1 = b \cdot h_1$

$$A_2 = b \cdot h_2$$

Donc en introduisant la relation (1.18) dans (1.15) on obtient une expression classique de la perte de charge due au ressaut en canal rectangulaire de pente faible ou nul est:

$$\Delta H_{12} = (h_1 - h_2) + \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) \cdot \left(\frac{q^2}{2g} \right) \quad (1.19)$$

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

$$\frac{q^2}{2g} = \frac{(h_1 \cdot h_2^2 + h_1^2 \cdot h_2)}{4} \quad (1.20)$$

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

$$\Delta H_{12} = \frac{(h_2 - h_1)^3}{(4h_2 h_1)} \quad (1.21)$$

Donc à partir de la relation (1.20) on peut conclure que la perte de charge due au ressaut classique ne dépend que des hauteurs conjuguées. La capacité de dissipation du ressaut est représentée par η :

$$\eta = \frac{\Delta H_{12}}{H_1} = \frac{(H_1 - H_2)}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (1.22)$$

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

$$H_1 = h_1 \cdot \left[1 + \frac{F_1^2}{2} \right] \quad (1.23)$$

$$H_2 = h_1 \cdot \left[Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right] \quad (1.24)$$

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

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

$$\eta = 1 - \left[\frac{\left(Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right)}{\left(1 + \frac{F_1^2}{2} \right)} \right] \quad (1.25)$$

Hager et Sinniger (1986) ont proposé une expression approchée qui nous permette calculer simplement le rendement du ressaut est cela pour un nombre de Froude $F_1 > 2$.

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2 \quad (1.26)$$

Les relations (1.25) et (1.26) sont représentées graphiquement sur un système des coordonnées cartésiennes, illustrés par la figure (1.8).

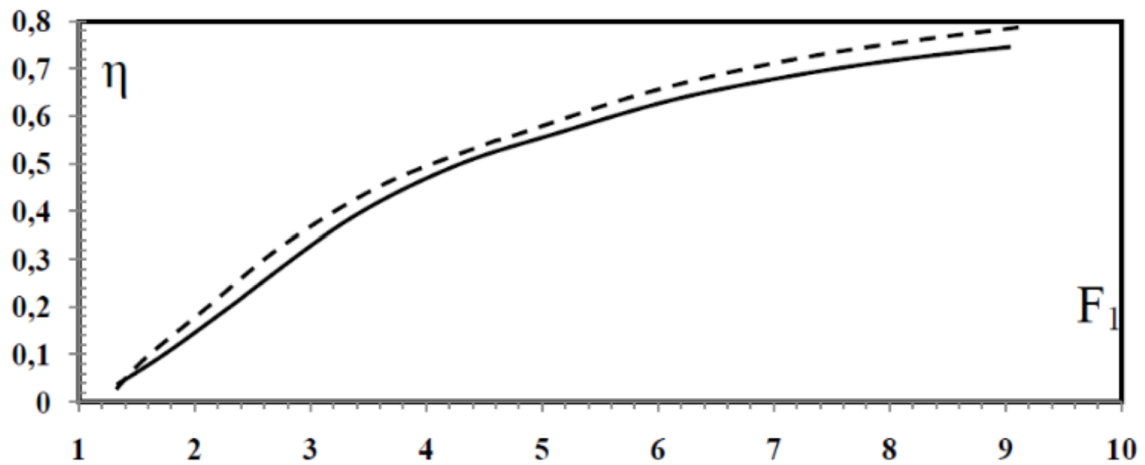


Figure I.8: Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 , (—) Courbe tracée selon la relation (1.25), (----) courbe tracée Selon la relation (1.26)

D'après l'analyse de la courbe $\eta = f(F_1)$ nous constatons que le rendement η du ressaut classique est supérieur à 50 % pour une valeur de nombre de Froude $F_1 \geq 5$ et que les rendements calculés par l'application de la relation (1.26) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.25) d'autre part; l'écart maximum observé peut atteindre les 2 %.

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

I.4.1 Approche de Forster et Skrinde (1950)

I.4.1.1 Seuil continu à paroi mince

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

- le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.
- la position relative du seuil x / h_2 .
- la hauteur relative du seuil s / h_1 .

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

Pour chaque essai effectué, le rapport x / h_2 est maintenu tout en assurant la formation complète du ressaut. La longueur du bassin amortisseur est à la limite égale à la position x du seuil comptée à partir du ressaut (figure 1.9).

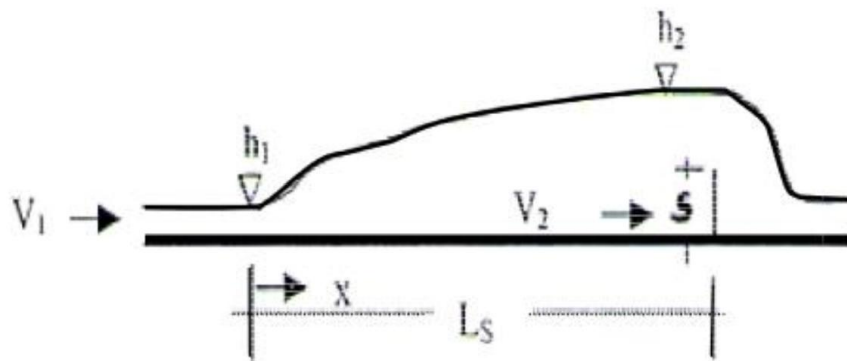


Figure I.9: Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

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

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

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

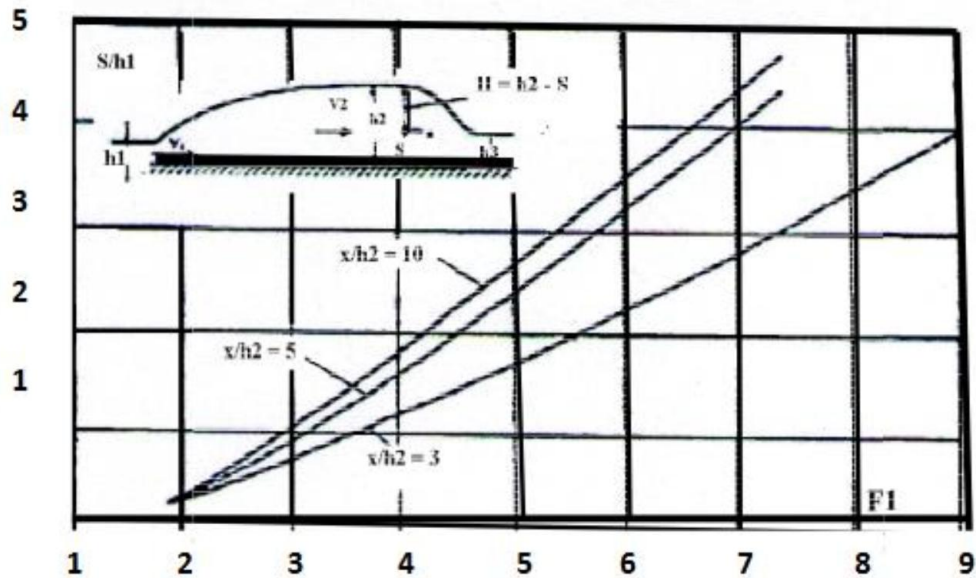


Figure I.10: Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince quelques valeurs de x/h_2 , selon Forster et Skrinde (1950)

Trois courbes sont alors déterminées pour des valeurs 3,5 et 10 de x/h_2 . On peut constater que pour l'ensemble des valeurs du nombre de Froude F_1 , les courbes expérimentales obtenues se rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que x/h_2 augmente et pour x/h_2 compris entre 5 et 10, la hauteur relative s/h_1 du seuil ne subit pas des grandes variations. Pratiquement, on considère que la position relative x/h_2 du seuil est approximativement égale à 6.

I.4.1.2 Seuil continu à paroi épaisse

Le seuil est considéré comme épais lorsque le profil liquide s'y écoulant est Presque parallèle au fond, pour peu que la longueur L du seuil soit suffisante (figure 1.11). La notion de seuil épais est également liée aux caractéristiques de l'écoulement et suivant la classification de Rao et Murlidhar (1963), le seuil est considéré comme étant épais lorsque :

$$0,1 \leq \frac{(h_2 - s)}{L} \leq 0,35 \quad (1.28)$$

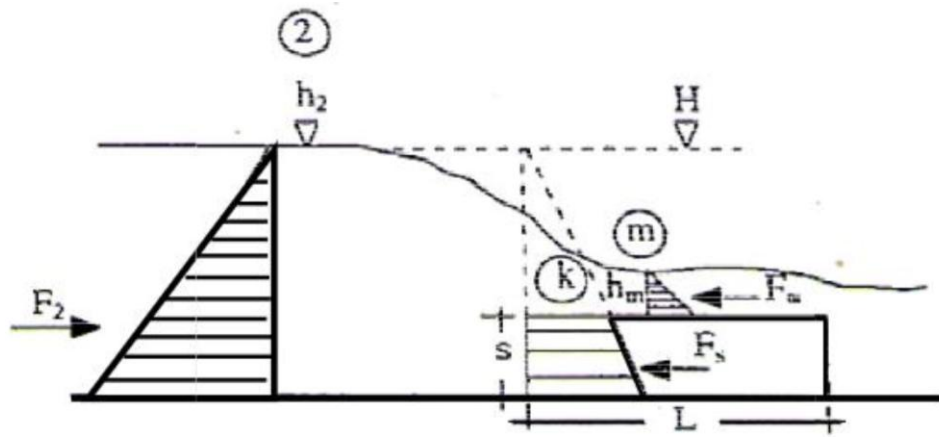


Figure I.11: Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions

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

L'étude théorique basée sur l'équation de la quantité de mouvement, appliquée entre la section initiale du ressaut et la section au droit du seuil, a abouti à une relation fortement implicite liant la hauteur relative s / h_1 du seuil et le nombre de Froude F_1 (1.29). Le paramètre x / h_2 n'a ainsi théoriquement aucune influence sur le contrôle du ressaut.

$$\frac{21,33.F_1^2}{\sqrt{1+8F_1^2}-1} = \frac{\left(\sqrt{1+8F_1^2}-1-2\frac{s}{h_1}\right)^3}{\sqrt{1+8F_1^2}-1+2\frac{s}{h_1}} \quad (1.29)$$

Contrairement au cas du seuil à paroi mince, une seule courbe est obtenue (figure 1.12) traduisant la variation de s / h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 . Cette courbe peut être utilisée à condition que:

$$h_3 < \frac{(2h_2+s)}{3} \quad (1.30)$$

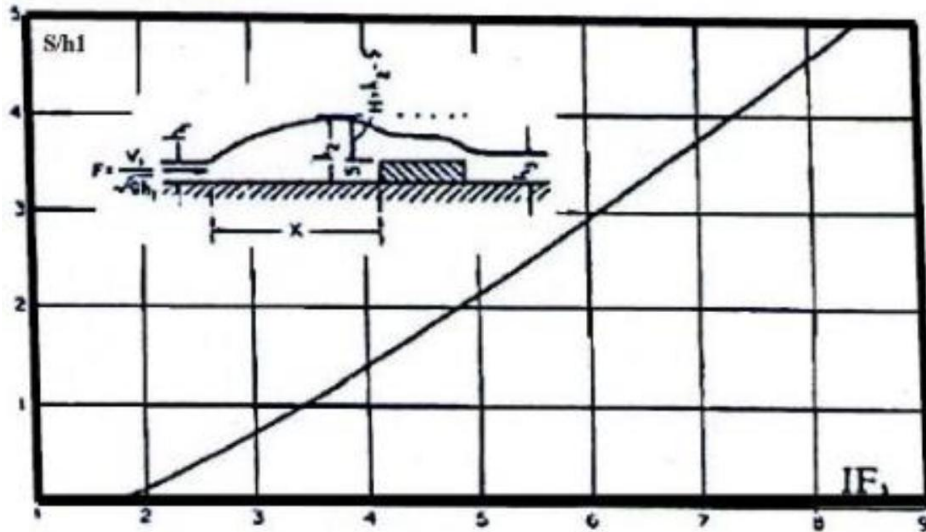


Figure I.12: Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation (1.30)

I.4.1.3 La marche positive

Soit la figure (1.13), qui représente un ressaut hydraulique forcé par marche positive de hauteur 's' franchi par un écoulement de profondeur h_3 .

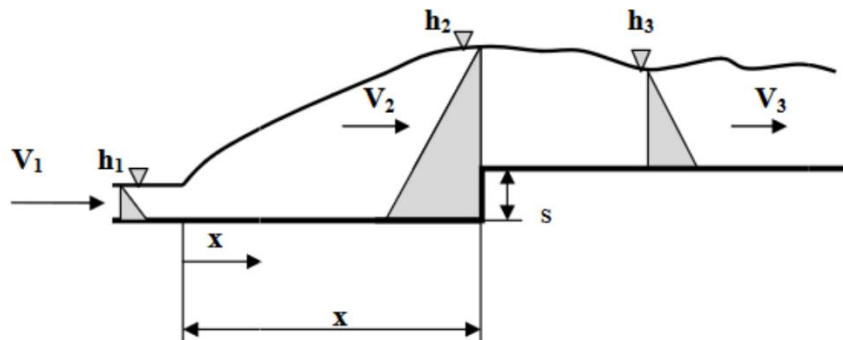


Figure I.13: Ressaut forcé par marche positive de hauteur 's', les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions

A la base des études expérimentales effectuées au laboratoire, Forster et Skrinde (1950), ont constaté qu'il y a une relation entre le nombre de Froude F_1 de l'écoulement en amont du ressaut, et la hauteur relative $\frac{h_3}{h_1}$, pour des différentes valeurs de la hauteur relative $\frac{s}{h_1}$ de la marche et pour $x = 5(s + h_3)$

A cet effet, les auteurs ont développé un diagramme (figure 1.14) qui peut être servi pour déterminer les paramètres caractéristiques du bassin d'amortissement tel que : la longueur et la

hauteur du bassin ainsi que la hauteur minimale de la marche positive nécessaire à la formation du ressaut.

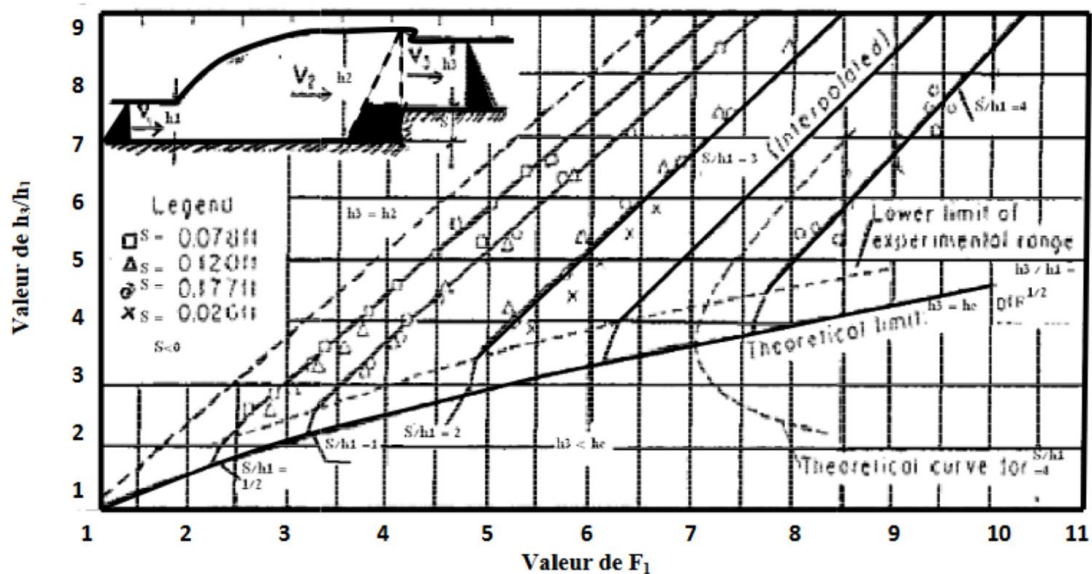


Figure I.14: Variation du nombre de Froude F_1 , en fonction de h_3/h_1 et de la hauteur relative s/h_1 de la marche positive, selon Forster et Skrinde (1950)

I.5. Ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire

I.5.1 Approche de Rand

En 1957, Rand a proposé d'établir une certaine classification pour le bassin avec seuil continu à son extrémité. Il était le premier qui a classifié le ressaut forcé par seuil en 10 cas typiques, se rapportant aux effets de la hauteur du seuil et de sa position, le ressaut Classique servant du cas de référence.

Ces cas peuvent être groupés en trois classes se distinguant par la position du seuil par rapport au pied du ressaut (figure 1.15):

1. Position minimale en amont L_s , min.
2. Position intermédiaire L_s .
3. Position maximale L_s max.

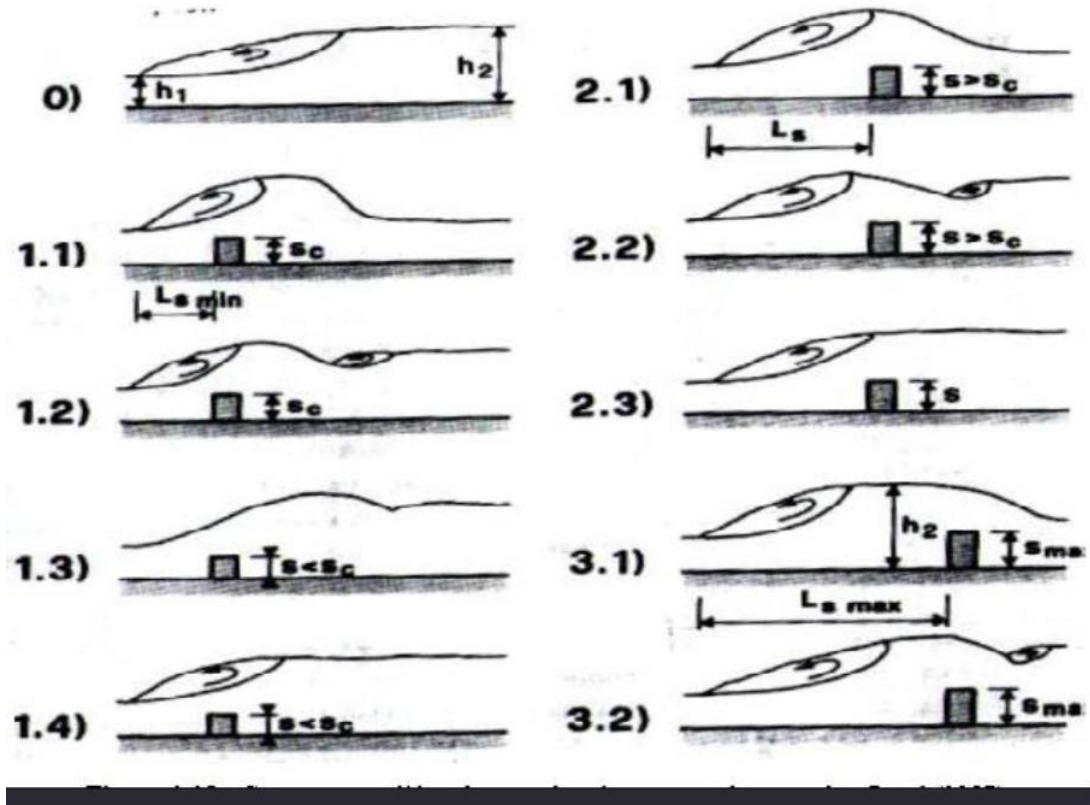


Figure I.15: Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes selon Rand (1957): 0) Ressaut classique avec hauteurs conjuguées h_1 et h_2 ; 1) class 1, longueur L_s , min.; 2) class 2, longueur intermédiaire L_s ; 3) class 3, longueur $L_{s,max}$; s : hauteur du seuil, s_c : hauteur critiques du seuil et s_{max} : hauteur maximale du seuil.

Afin de décrire tous les cas, Rand (1957) a défini un facteur de position:

$$K = \frac{\left(\frac{L_s}{h_1}\right) - \left(\frac{L_s}{h_1}\right)_{min}}{\left(\frac{L_s}{h_1}\right)_{max} - \left(\frac{L_s}{h_1}\right)_{min}} \quad (1.31)$$

Variant entre $K = 0$ pour le ressaut dans la position minimale et $K = 1$ pour la position maximale. Rand (1957) ainsi a établi des diagrammes exprimant le rapport des hauteurs conjuguées YF en fonction de F_1 pour différentes hauteurs relatives du seuil $S = s / h_1$ et ceci pour 5 valeurs de K . il a démontré que la diminution des hauteurs conjuguées est d'autant plus importante que S est élevé et que l'effet du seuil tend à disparaître lorsque F_1 augmente, ce qui pourrait signifier que pour F_1 très grand, le seuil est inutile! La hauteur du seuil nécessaire à la formation d'un ressaut peut être tirée de ces diagrammes.

Rand (1957) a proposé pour la première fois une classification des divers cas possibles du ressaut forcé par seuil et des diagrammes permettant le dimensionnement des bassins.

En 1965, Rand a repris ces diagrammes en les présentant sous une autre forme. L'installation expérimentale alors utilisée, est un canal avec vanne plane : la détermination de

h_1 est donc préconisée dans ce cas. Un diagramme pour une valeur de F_1 est dressé $YF = h_2/h_1$ en fonction de $S = s/h_1$ pour diverses valeurs de K , arrangement plus pratique à utiliser pour le dimensionnement (figure 1.16), mais avec l'inconvénient qu'il faut un diagramme pour chaque nombre de Froude.

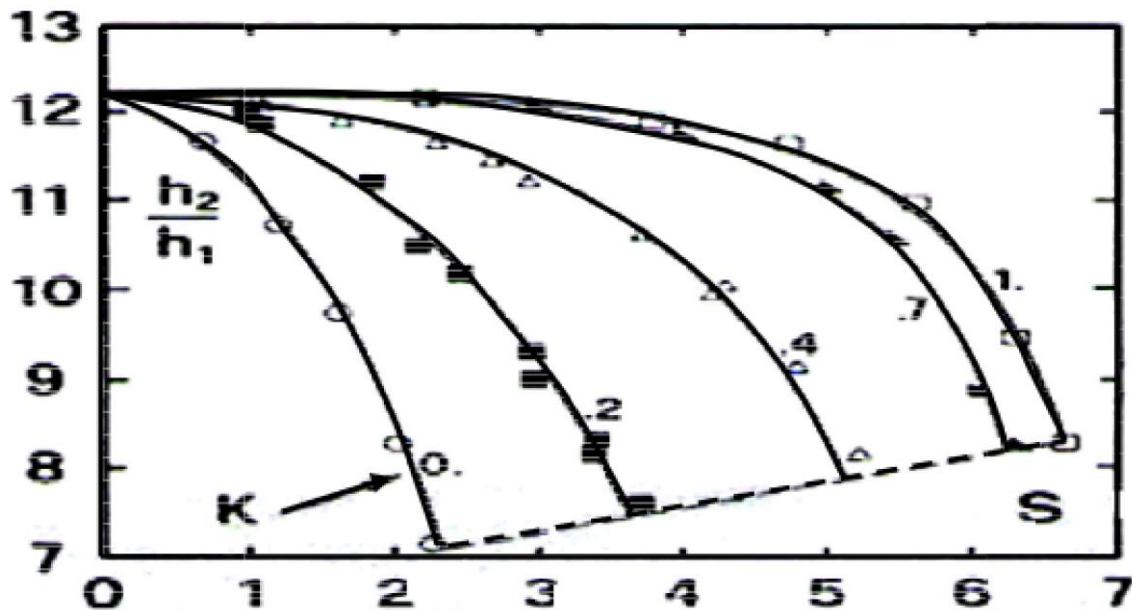


Figure I.16 Hauteurs conjuguées $h_2/h_1 = f(S, K)$ pour $F_1 = 9$. Valeurs et courbes expérimentales : (----) limite d'influence de l'aval sur l'amont.

I.5.2 Approche de Bretz

I.5.2.1 Généralités

A l'instar de Rand (1965), Bretz en 1988 a conduit une étude expérimentale sur l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique. Ses résultats ont été confirmés par Hager et Bretz (1988), Hager et Sinniger (1989), Hager et Li (1991).

Une description détaillée et une classification des différents types d'écoulements du ressaut forcé par seuil sont présentées (figure 1.17)

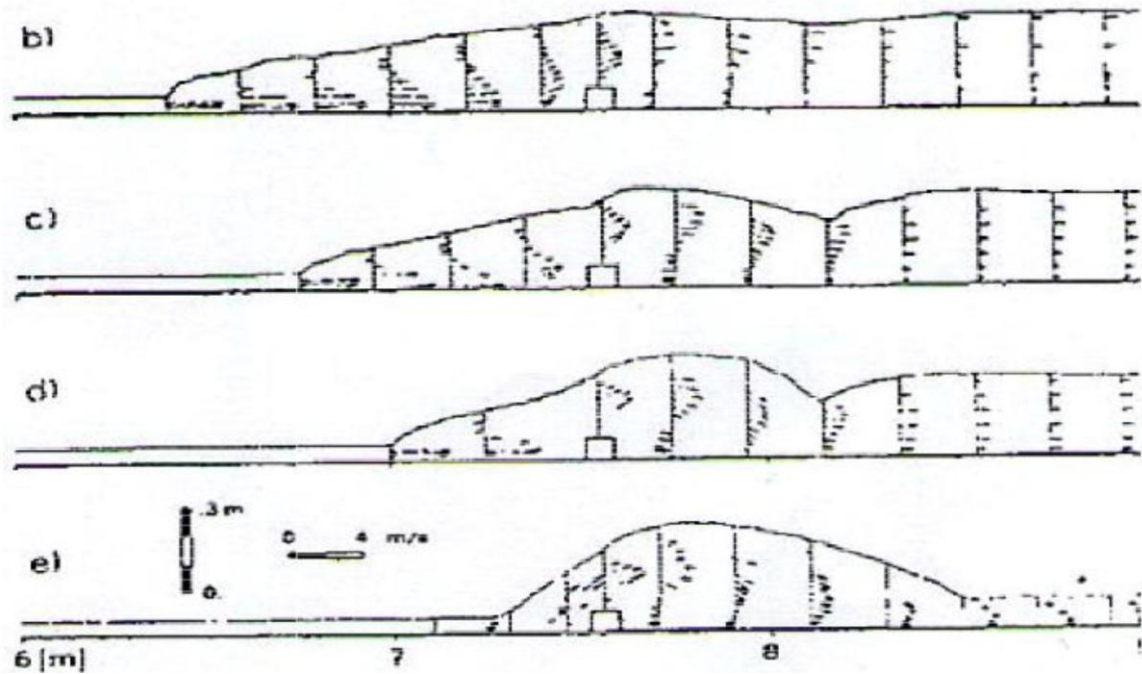


Figure I.17: Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $F_1 = 5,23$ et $S = 1,42$. 1) Ressaut type A; 2) Ressaut type B; 3) Ressaut type Bmin; 4) Ressaut type C et 5) onde. (Bretz, 1987).

En effet trois types de ressaut forcé par seuil sont retenus et analysés dans quatre sections longitudinales. Trois paramètres sont étudiés, d'abord indépendamment les uns des autres. Puis en combinaison : le nombre de Froude F_1 , le niveau aval h_2 est la hauteur relative S du seuil. L'attention est portée particulièrement sur les hauteurs conjuguées caractérisant le ressaut forcé par seuil et profils de surface.

I.5.2.2 Procédure expérimentale

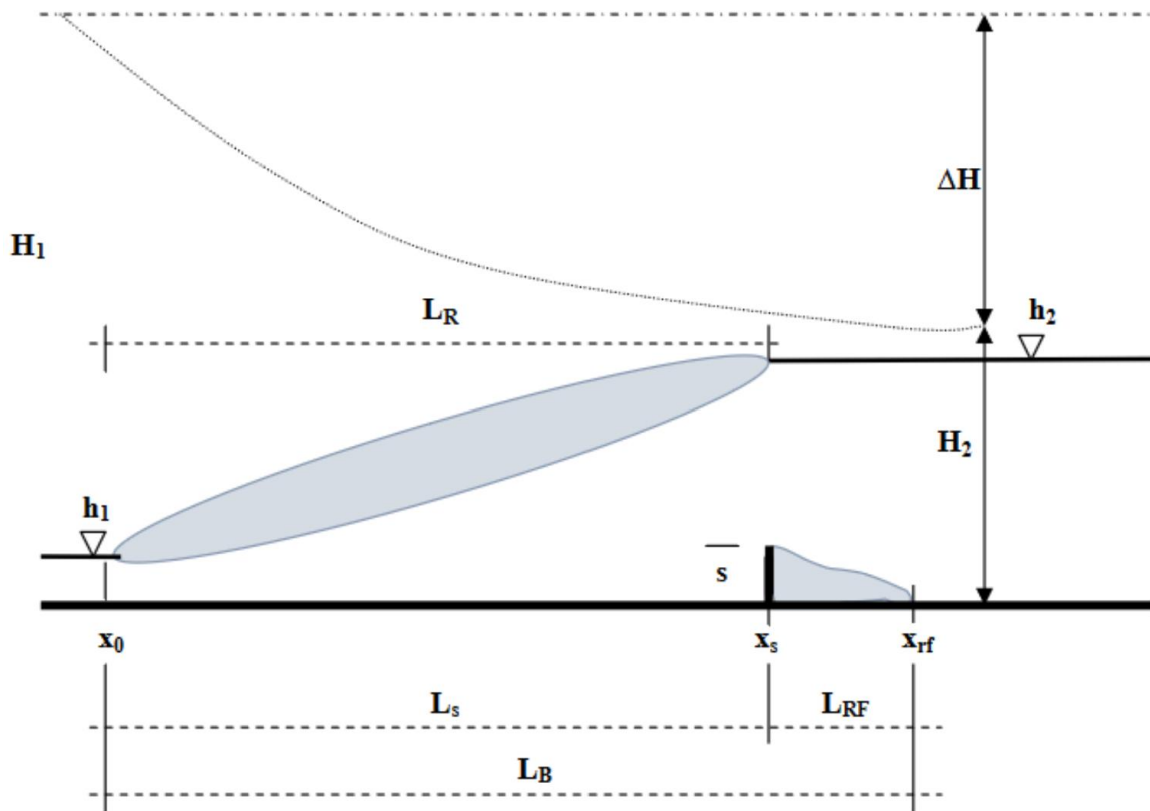


Figure I.18: ressaut forcé par seuil selon Bretz (1965): définition des termes. H_1 charge amont, H_2 charge aval, ΔH perte de charge, h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x_0 position du pied du ressaut, x_s position du seuil, x_{rf} position de la fin du rouleau de fond à l'aval, L_r longueur du rouleau de surface, L_s position du seuil par rapport au pied du ressaut, L_{RF} longueur du rouleau de fond aval, L_B distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval.

Dans le but d'augmenter le nombre de Froude F_1 et de pouvoir simultanément contrôler la hauteur d'eau amont h_1 , une vanne plane est installée dans la partie horizontale du canal. La procédure des essais est la même que celle décrite pour le ressaut classique. Les grandeurs suivantes sont relevées : charge à l'amont de la vanne H_0 , hauteur d'eau aval h_2 , position du pied du ressaut x_0 et position de la fin du rouleau de fond x_{rf} . Les essais sont répétés pour les hauteurs relatives du seuil $S = 1, 2, 3$ et 4 mm, dont l'emplacement est fixe. Le pied du ressaut a été placé le plus près possible de la vanne, pour éviter l'effet du frottement dans cette frange de l'écoulement.

Un débit est amorcé pour provoquer un ressaut forcé (type A, B ou B min). Alors 45 essais pour chaque type du ressaut ont été effectués.

I.5.2.3 Hauteurs conjuguées du ressaut

Pour le cas du ressaut forcé type A, la figure (1.19) montre que plus la hauteur relative S du seuil est grande, plus la courbe correspondante s'éloigne de la courbe $S = 0$ correspondante au ressaut classique (sans seuil).

Pour les diverses hauteurs relatives S , les courbes ont été approchées à l'aide de l'équation suivante:

$$Y_A = 1,307F_1 - 0,4S^{0,85} - 0,142 \quad (1.32)$$

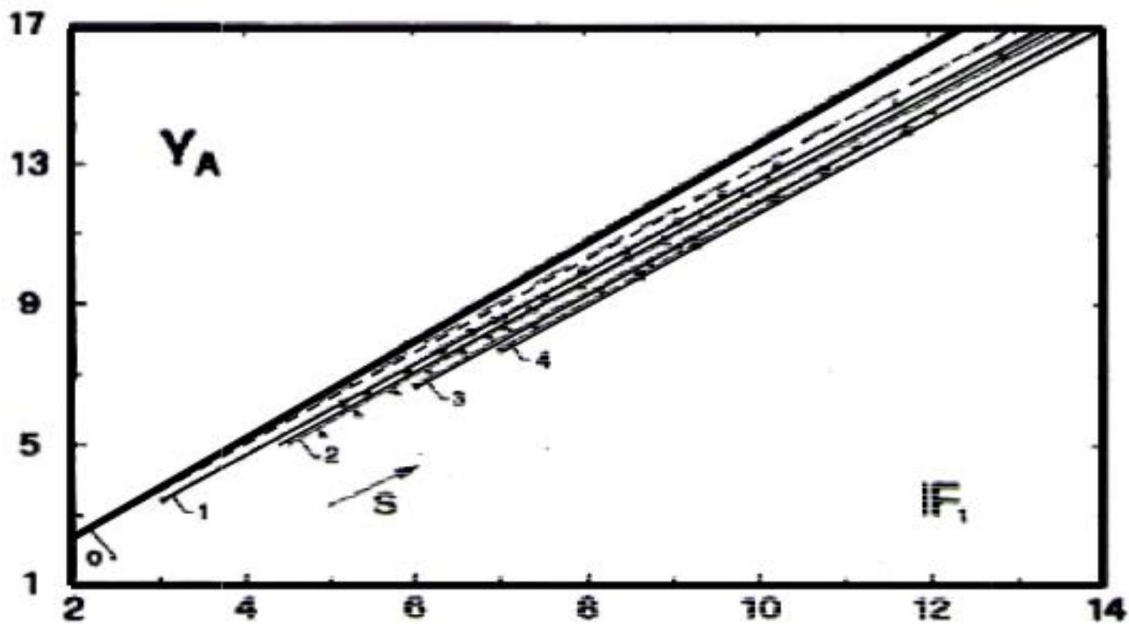


Figure I.19: Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_A = f(F_1, S)$ avec $0,5 \leq S \leq 6$. $S = s/h_1$ (—) courbe selon l'équation de Bélanger. (----) courbe du ressaut classique selon l'équation (1.32)

Pour le ressaut forcé type B des courbes analogues sont représentées sur la figure (1.20), avec un décalage plus important vers le bas. Elles sont exprimées par l'équation:

$$Y_B = 1,307F_1 - 0,6S^{0,75} - 0,142 \quad (1.33)$$

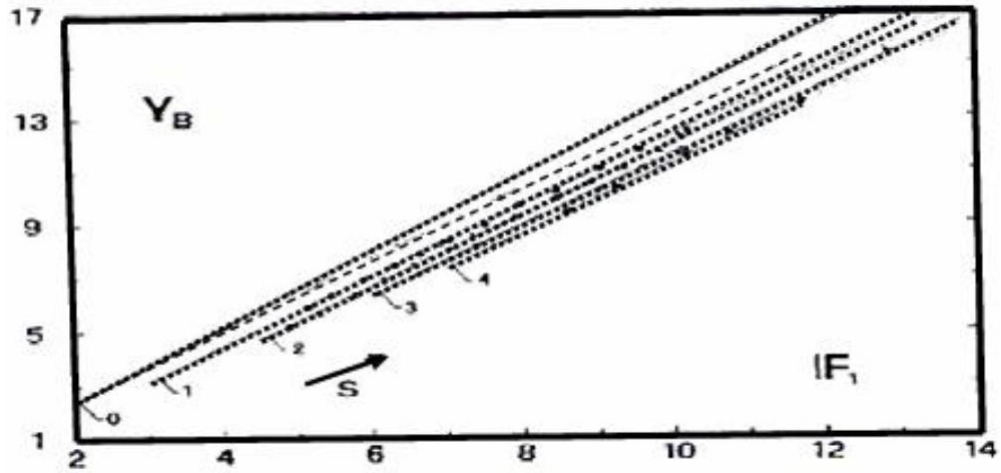


Figure I.20: Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_B = f(F_1, S)$. Même notation que la (Figure 1.19)

Finalement pour le cas du ressaut forcé type B-min (figure 1.21), le décalage vers le bas devient encore plus grand. L'équation devient:

$$Y_{B-min} = 1,307F_1 - 0,85S^{0,65} - 0,142 \quad (1.34)$$

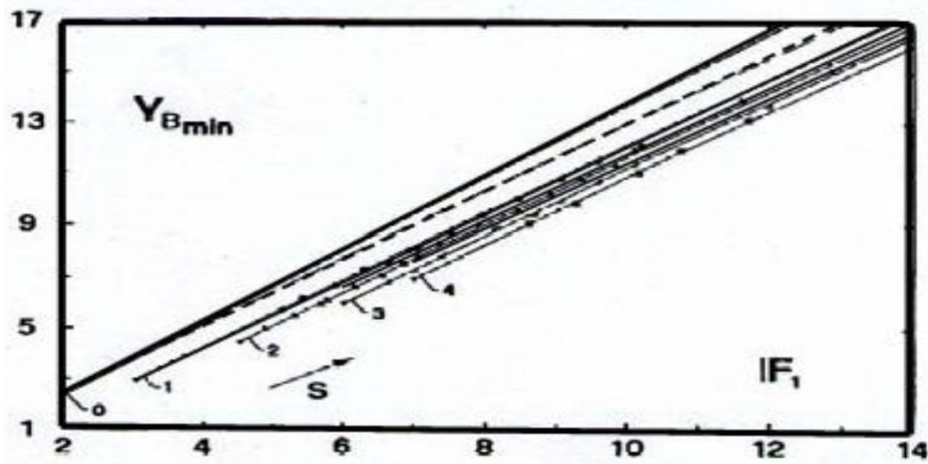


Figure I.21: Ressaut forcé type B-min. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_{B-min} = f(F_1, S)$ Même notation que la (Figure 1.19)

Autrement dit le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut forcé par seuil est représenté en fonction du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique par l'équation:

$$Y_F = Y_{RC} - Y_S \quad (1.35)$$

Y_F est données par les équations (1.32), (1.33) et (1.34), Y_{RC} par la même équation pour $S = 0$ et ΔY_S est l'effet du seuil défini par $\Delta Y_S = \alpha \cdot Y_S^\beta$. Les valeurs des coefficients α et β sont données ci-après:

	Type A	Type B	Type B-min
α	0,4	0,6	0,85
β	0,85	0,75	0,65

I.5.2.4 Longueur relative du bassin

La longueur relative du bassin $\lambda_B = L_B/h_1$ et la position relative du seuil $\lambda_S = L_S/h_1$, en fonction du nombre de Froude F_1 , sont représentées dans la figures (1.22) et la figure (1.23).

Pour les trois types du ressaut forcé, λ_S croît quasi linéairement avec F_1 , la pente de la courbe étant plus forte pour le type A et la moindre pour le type B-min. Quand à λ_B , les courbes présentent une pente plus forte que celle pour λ_S .

Les courbes pour les divers types du ressaut forcé sont situées au-dessous de celles du ressaut classique. Ce fait indique la réduction nette de la longueur du ressaut forcé par rapport au ressaut classique. Pour les trois types du ressaut forcé, les courbes sont données par leséquations suivantes, avec le domaine de validité $5 \leq F_1 \leq 13$:

- Ressaut forcé type A $\lambda = 6,27F_1 - 5,75$ (1.36), $\lambda = 8,68F_1 - 11,23$ (1.39)
- Ressaut forcé type B $\lambda = 5,29F_1 - 5,37$ (1.37), $\lambda = 8,44F_1 - 12,96$ (1.40)
- Ressaut forcé type B-min $\lambda = 4,64F_1 - 4,84$ (1.38), $\lambda = 6,93F_1 - 6,83$ (1.41)

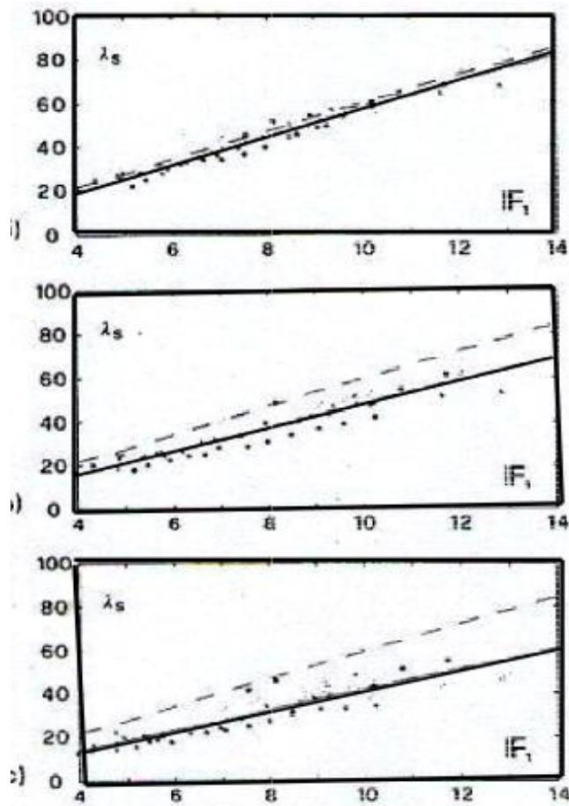


Figure I.23: Longueur relative $\lambda_S = f(F_1)$ pour le ressaut forcé: a) type A, b) type B etc) type B - min. (—) courbe selon l'équation: a) (1.36), c) (1.37) et (1.38) respectivement.

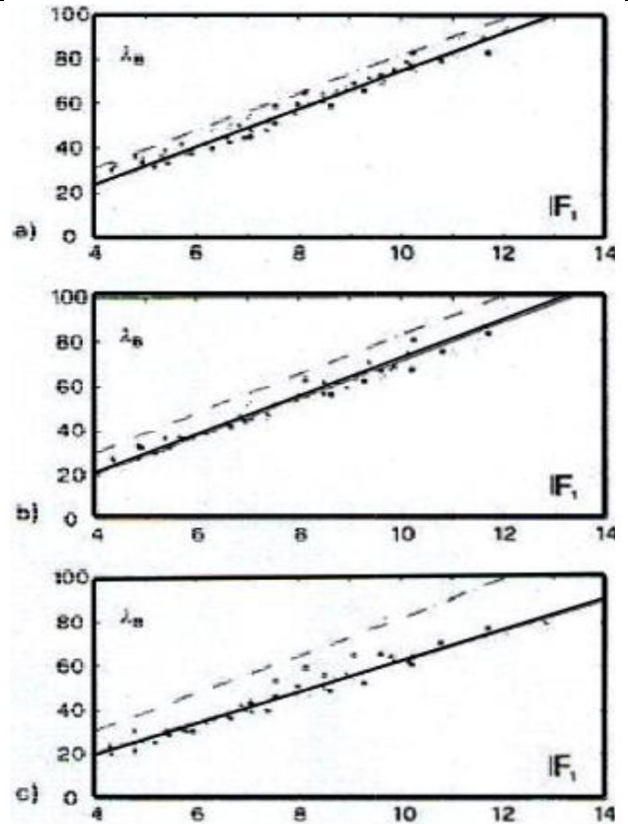


Figure I.22: Longueur relative $\lambda_B = f(F_1)$ pour le ressaut forcé: a) type A, b) type B et c) type B-min. (—) courbe selon l'équation: a) (1.39), b) (1.40) et c) (1.41) respectivement. (----) courbe limite.

I.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser une synthèse exhaustive des principales contributions scientifiques relatives au ressaut hydraulique classique se développant dans un canal à section rectangulaire. Les différentes configurations morphologiques du ressaut ont été exposées selon la classification textuelle de Bradley et Peterka (1957), laquelle repose sur la variabilité du nombre de Froude amont F_1 . L'état de l'art confirme que ce phénomène hydrodynamique est régi par le principe de conservation de la quantité de mouvement, formalisant ainsi la corrélation directe entre le rapport des hauteurs conjuguées Y^* et le nombre de Froude F_1 . Les travaux pionniers de Bélanger (1828) ont posé les jalons de cette approche analytique en appliquant le théorème d'Euler entre les sections amont et aval du ressaut, une relation illustrée graphiquement par la courbe $Y^* = f(F_1)$ de la figure 1.4.

Par ailleurs, l'examen des travaux de Hager et al. (1990) met en évidence la complexité de la détermination théorique des caractéristiques géométriques du ressaut. En raison du caractère fortement turbulent et tridimensionnel de l'écoulement, l'évaluation de la longueur du rouleau ou de la zone de transition requiert impérativement une approche expérimentale, ayant conduit à la formulation de diverses relations empiriques proposées par la communauté scientifique.

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par des structures aval, en mettant notamment l'accent sur les travaux de Forster et Skrinde (1950) relatifs aux seuils à paroi mince. Ces auteurs ont caractérisé, dans un premier temps, l'évolution de la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 pour des valeurs discrètes du rapport de position x/h_2 . Leurs investigations expérimentales ont permis de tracer trois courbes empiriques dont la convergence s'accroît à mesure que le ratio x/h_2 augmente. Par analogie, Forster et Skrinde (1950) ont analysé l'impact d'une marche positive sur le comportement du ressaut en canal rectangulaire, débouchant sur l'élaboration d'un abaque qui illustre la variation de F_1 en fonction du rapport des hauteurs d'eau h_3/h_1 pour différentes valeurs de la hauteur relative de la marche s/h_1 .

Concernant le ressaut hydraulique forcé, les contributions de Rand (1957, 1965) occupent une place fondamentale. En corrélant la hauteur du seuil à sa position spatiale, Rand (1957) a proposé une classification typologique du ressaut forcé déclinée en dix configurations distinctes. Ultérieurement, Rand (1965) a formalisé, à partir de données expérimentales, un diagramme reliant le rapport des hauteurs conjuguées à une fonctionnelle $f(S, K)$ pour un nombre de Froude fixé à $F_1 = 9$, où K représente le facteur de positionnement du seuil.

Dans cette même perspective, les travaux de Bretz (1988) ont approfondi l'interaction entre le seuil et le ressaut, aboutissant à la formulation de trois équations analytiques. Ces expressions relient le rapport des hauteurs conjuguées au nombre de Froude F_1 ainsi qu'à la hauteur relative du seuil S , distinguant ainsi trois régimes spécifiques, à savoir les ressauts de type A, de type B et de type B-min. Enfin, cet auteur a modélisé la longueur relative du bassin d'amortissement à travers trois lois empiriques distinctes, chacune étant spécifiquement ajustée aux trois types de ressauts répertoriés.

Chapitre II :
Ressaut Hydraulique Dans
Un Canal Trapezoïdal

II. 1. Introduction :

L'étude du ressaut hydraulique au sein de géométries non rectangulaires, et plus particulièrement dans les canaux trapézoïdaux, suscite un intérêt grandissant dans le domaine du génie hydraulique. L'analyse des performances de cette transition hydrodynamique revêt une importance pratique majeure. En effet, sur le plan techno-économique, l'adoption d'un profil trapézoïdal présente des avantages comparatifs substantiels par rapport aux structures rectangulaires à parois verticales, notamment lorsque l'inclinaison des berges permet d'optimiser la stabilité des parois et de réduire les coûts de réalisation des ouvrages de soutènement.

Afin de cerner les spécificités de cet écoulement à surface libre, le présent chapitre s'articule autour de deux axes complémentaires. Le premier volet est consacré à l'examen des travaux fondamentaux de Hager et Wanoschek (1987, 1989) portant sur la caractérisation hydrodynamique du ressaut au sein d'un canal trapézoïdal prismatique. Le second volet met en perspective la contribution expérimentale de Kateb, Debabeche et Benmalek (2013), visant à analyser et à quantifier l'influence d'une marche positive en tant que dispositif macro-rugueux de contrôle, de forçage et de stabilisation du ressaut hydraulique évoluant dans cette même configuration géométrique.

II. 2. Généralité :

Bien que la première contribution systématique dans l'étude du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal soit de Posey et Hsing (1938), qui ont trouvé que le rapport des hauteurs conjuguées observé est convenable avec celui trouvé théoriquement en appliquant l'équation de la quantité de mouvement. Cependant, les caractéristiques de l'écoulement sont un peu différentes de ce qui a été rencontré dans le cas d'un canal rectangulaire, au lieu d'une forme droite de pied du ressaut par rapport à l'axe de canal, ils ont remarqué la formation de deux ailes dans chaque côté du canal trapézoïdal.

La longueur du ressaut mesurée le long de l'axe du canal trapézoïdal a été trouvée moins définie que dans un canal rectangulaire.

Il faut noter que la formule générale de nombre de Froude s'écrit :

$$F^2 = \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial h}$$

Pour les canaux trapézoïdaux symétriques, la section mouillée est $A = bh + mh^2$, comme on a

$$\frac{\partial A}{\partial h} = b + 2mh, \text{ le nombre de Froude devient :}$$

Le canal est rectangulaire si $m = 0$, et triangulaire si $b = 0$.

$$F = \frac{Q}{bh + mh^2} \left[\frac{b + 2mh}{g(bh + mh^2)} \right]^{1/2}$$

Silvestre (1964) a conduit une étude dans laquelle l'expérimentation ne couvre que des valeurs du nombre de Froude amont $F_1 < 4$, toutefois, les résultats trouvés théoriquement n'ajuste pas bien avec l'observation, une seule série couvre des valeurs de nombre de Froude entre $4 < F_1 < 8$, puisque M est assez petite, la différence avec le profil rectangulaire est devenue négligeable.

Récemment, Hager et Wanoschek (1989) ont étudié d'une manière détaillée la structure interne et le comportement du ressaut, dans un canal trapézoïdal, d'angle d'inclinaison de 45° ($m = 1$) et pour des valeurs de $M \leq 0,4$. Ils ont montré, à travers les observations tridimensionnelles l'existence d'un rouleau du fond, jusqu'alors jamais détecté, et dont les caractéristiques géométriques, telles que la longueur à la base, la hauteur ainsi que la position sont définies.

Les auteurs ont montré que le ressaut dans le canal trapézoïdal testé devrait être plus long et asymétrique au-delà d'une valeur limite du nombre de Froude F_1 , tout dépendant du rapport de forme M .

Le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal est trouvé plus efficace que son homologue en canal rectangulaire

Plus récemment, Kateb, Debabache et Benmalek (2013) ont étudié expérimentalement l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal.

Une étude comparative entre les caractéristiques du ressaut contrôlé et le ressaut forcé type A par marche positive a conclu que pour le même nombre de Froude F_1 , la profondeur conjuguée aval et la position de la marche sont plus réduites dans le ressaut forcé type A que pour son homologue contrôlé par marche. Le rendement est trouvé quasi identique pour les deux configurations.

II.3. Ressaut hydraulique classique dans un canal trapézoïdal

II.3.1. Les travaux de Hager et Wanoschek (1987-1989)

Les travaux conduits par Hager et Wanoschek (1987) traitent d'ailleurs le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire, néanmoins, les chercheurs ont présenté la relation qui régit le ressaut dans le canal trapézoïdal en appliquant l'équation de la quantité de mouvement.

En 1989, les chercheurs ont étudié le ressaut hydraulique dans le canal trapézoïdal. Leur contribution cette fois porte principalement sur la structure interne de l'écoulement, ils ont montré à partir de l'observation tridimensionnelle que les phénomènes sont notablement différents de ceux rencontrés dans le ressaut classique en canal rectangulaire.

II.3.1.1. Descriptions des essais (1989)

L'expérimentation est conduite dans un canal trapézoïdal symétrique et prismatique, la largeur de base $b = 0.2\text{m}$ et l'angle d'inclinaison des parois est de 45° ($m=1$), la profondeur du canal atteint 0.7m ce qui donne une largeur superficielle $B=1.6\text{m}$, la longueur totale du canal de mesure $L = 8\text{m}$.

Les valeurs de la hauteur initiale à la sortie de couvercle $h_0 = 20 ; 40 ; 60$ et 80mm sont considérées, pour lesquelles le rapport de forme M soit : $0,1 ; 0,2 ; 0,3$ et $0,4$. Le débit généré est entre $7,5$ et 98 l/s , par conséquent, les valeurs limites supérieures de nombre de Froude amont F_1 sont : $15 ; 13 ; 9$ et $5,45$.

La hauteur conjuguée amont h_1 est obtenue par un calcul standard basé sur le débit Q , la hauteur initiale h_0 et la perte par frottement. La différence entre h_0 et h_1 est normalement assez petite, mais elle engendre une diminution en F_1 de 3% .

II.3.1.2. Caractéristique de l'écoulement (1989)

La figure (2.1) indique les caractéristiques principales du ressaut hydraulique évoluant dans le canal trapézoïdal, les chercheurs ont divisé la région du ressaut en sept parties élémentaires. L'écoulement amont à grande vitesse « 1 » est soulevé dans l'air et forme une zone d'éclaboussement « 2 » à cause de la présence d'une zone de séparation de l'écoulement au fond du canal « 3 » dite rouleau de fond.

Le courant principal ainsi s'écoule près de la surface et diverge lentement vers les parois latérales. Cela est dû à la concentration de l'écoulement amont torrentiel « 1 » dans la partie centrale de la section transversale, et la dépression résultante le long des parois latérales.

La première partie de l'écoulement latéral se retourne en amont et forme la zone de retour latérale « 4 » dans les deux côtés du canal, elle donne une forme spécifique au pied du ressaut. La deuxième partie reste à la surface et continue à écouler vers l'aval « 5 ». La troisième partie plonge le long des parois latérales inclinées et alimente le rouleau du fond « 6 ». Plus en aval, ce courant n'entraîne plus le rouleau du fond mais il va continuer directement vers l'aval « 7 ».

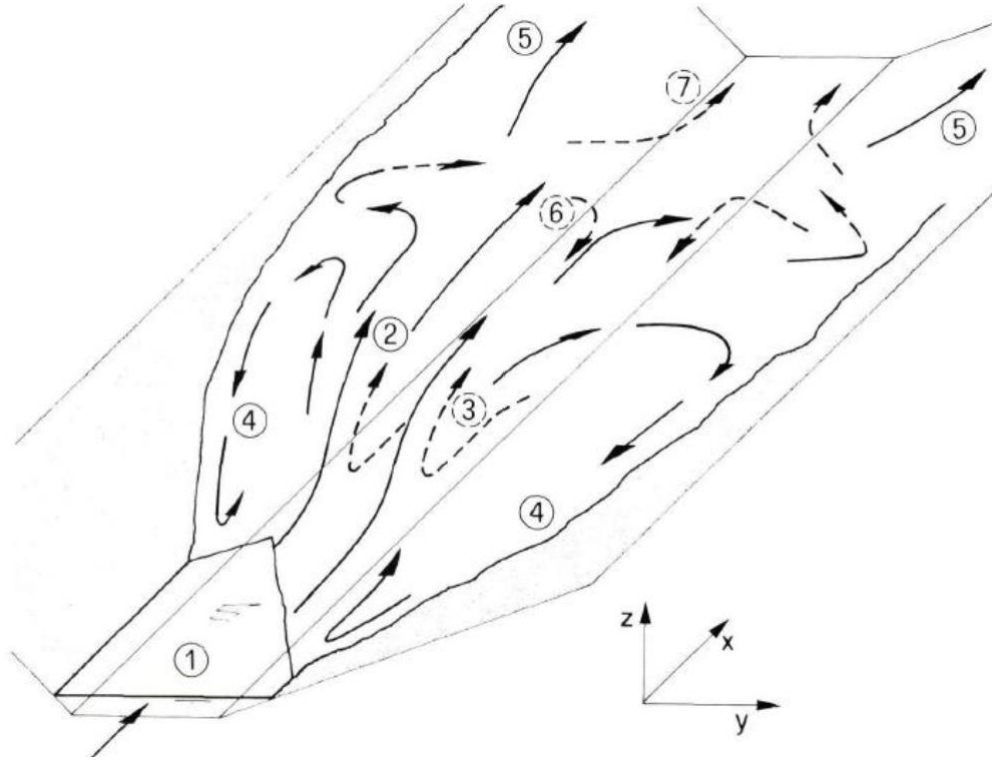


Figure. II.1 : Vue schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut en canal trapézoïdal. (→) courants de surface, (--->) courants de fond.

Le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal est ainsi caractérisé par un écoulement fortement spatial, la présence du rouleau de fond implique plusieurs différences par rapport au ressaut classique, notamment :

- La vitesse le long du fond du canal est diminuée significativement.
- Le courant principal est soulevé à la surface mais diverge vers les deux côtes latérales du canal.
- La vitesse maximale se produit le long des parois latérales du canal près de la surface libre.

II.3.1.3. Rapport des hauteurs conjuguées

L'équation de la quantité de mouvement appliquée aux sections initiales et finales d'un ressaut se produisant dans un canal horizontal de section droite trapézoïdale, pour lequel :

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

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

Les centres de gravité des sections initiales et finales sont :

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

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

Les forces de pressions des sections initiales et finales sont :

$$P_1 = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_1 \cdot A_1$$

$$P_2 = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_2 \cdot A_2$$

L'application de cette équation donne :

$$\frac{bh_1^2}{2} + \frac{mh_1^2}{3} + \frac{Q^2}{gA_1} = \frac{bh_2^2}{2} + \frac{mh_2^2}{3} + \frac{Q^2}{gA_2} \quad (2.2)$$

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

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

En introduisant le paramètre Y , définissant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, l'équation devient : (Hager et Wanoschek 1987)

$$F_1^2 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (2.4)$$

Tels que :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} \quad \text{et} \quad M = \frac{mh_1}{b}$$

Hager et Wanoschek (1987) ont étudié la relation (2.4), la figure (2.2) représente la variation de rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de nombre de Froude amont F_1 et de rapport de forme M .

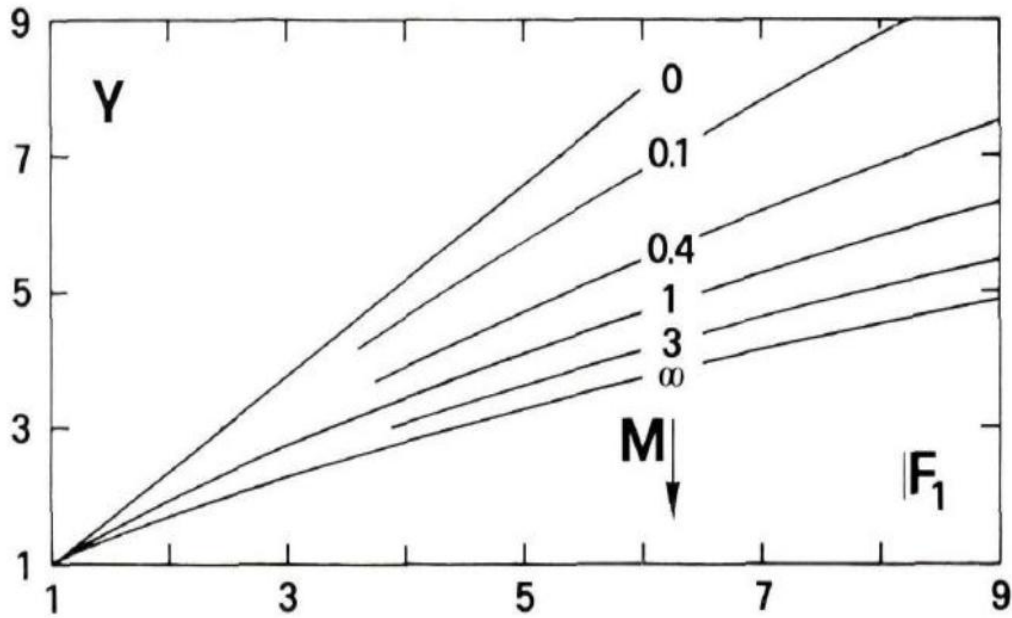


Figure.II.2 : Hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M=mh_1/b$

Pour F_1 fixe, Y diminue avec l'augmentation de M . Il est à noter que, pour le même débit, la même charge et la même quantité de mouvement dans deux canaux de forme différentes, F_1 n'est pas égal.

Les deux courbes limites respectives sont données par $M=0$ (canal rectangulaire) et $M\infty$ (canal triangulaire), pour lesquelles :

$$\left. \begin{aligned} Y = \frac{h_2}{h_1} &= \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] & M = 0 \\ F_1^2 &= \frac{2Y^2(Y^2 + Y + 1)}{3(Y + 1)} & 1/M = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Des solutions approximatives pour $Y(F_1)$ ont été présentées :

$$Y = \sqrt{2} F_1 - \frac{1}{2}, \quad M = 0$$

$$Y = \left(\frac{3}{5} F_1^2 - 1 \right)^{1/3}, \quad 1/M = 0$$

Noter que $Y \sim F_1$ pour le canal rectangulaire, mais $Y \sim F_1^{2/3}$ pour le canal triangulaire. Les chercheurs ont réétudié le ressaut en canal trapézoïdal en 1989, cette fois ils ont conduit l'expérimentation aussi dans le profil trapézoïdal, toutefois, la figure (2.3) représente la comparaison des valeurs du rapport des hauteurs conjuguées en fonction de F_1 et de M issues de la relation (2.4) et les données expérimentales. Une concordance générale est notée, les valeurs expérimentales de Y sont toujours en dessous de celles issues de la relation théorique.

Cela est attribué à la négligence des forces de frottements avec les parois et il est clairement reflété par l'augmentation de la déviation avec l'accroissement de F_1 .

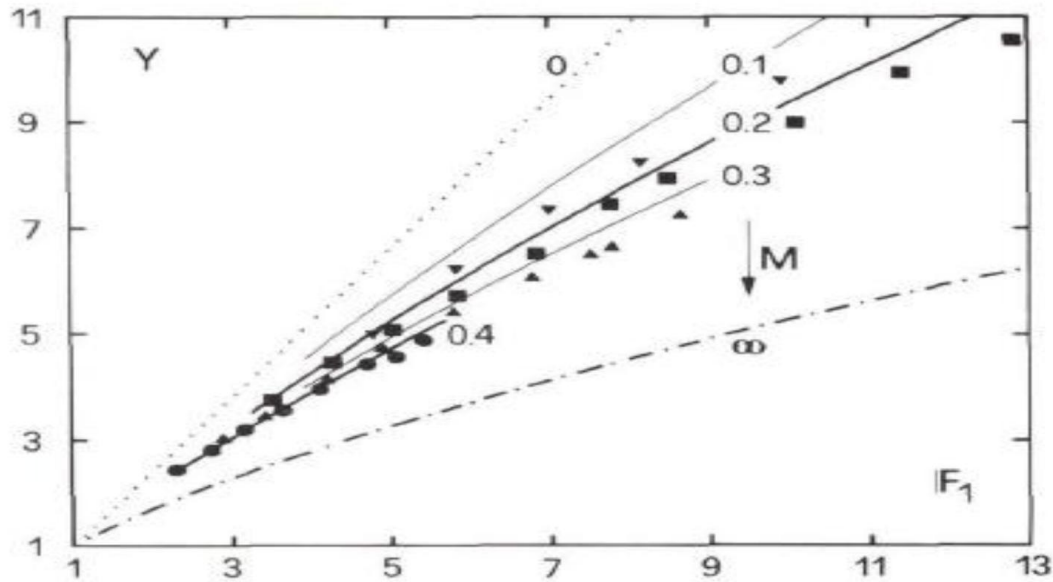


Figure. II.3 : Hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$, fonction de F_1 et $M=mh_1/b$, (—) : équation 2.4 ; (...) $M=0$; (∇) $M=0.1$; ($\blacksquare$) $M=0.2$; ($\blacktriangle$) $M=0.3$; ($\bullet$) $M=0.4$; ($-\bullet-$) $M = \infty$

II.3.1.4. Les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique

II.3.1.4.1. Longueur du rouleau du fond

La caractéristique particulière du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal est l'apparition d'un rouleau de fond pour le nombre de Froude $F_1 > 4$ (figure 2.4). Les dimensions de ce type du rouleau pourront être données par les grandeurs suivantes :

- L_u : distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau du fond.
- L_b : longueur du rouleau du fond.
- h_b : hauteur maximale du rouleau du fond

La figure (2.5, a, b et c) indique la variation de $\lambda_u = \frac{L_u}{h_2}$, $\lambda_b = \frac{L_b}{h_2}$ et de $\frac{h_b}{h_2}$ en fonction de F_1 pour différentes valeurs de M.

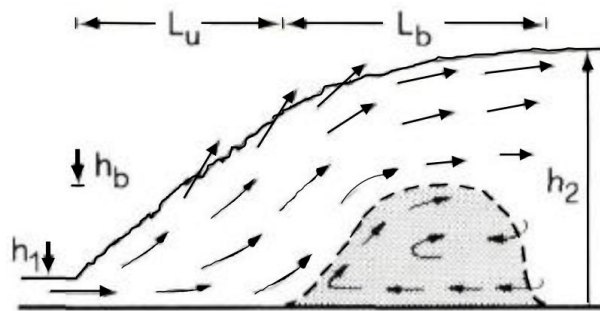


Figure. II.4 : Croquis de définition

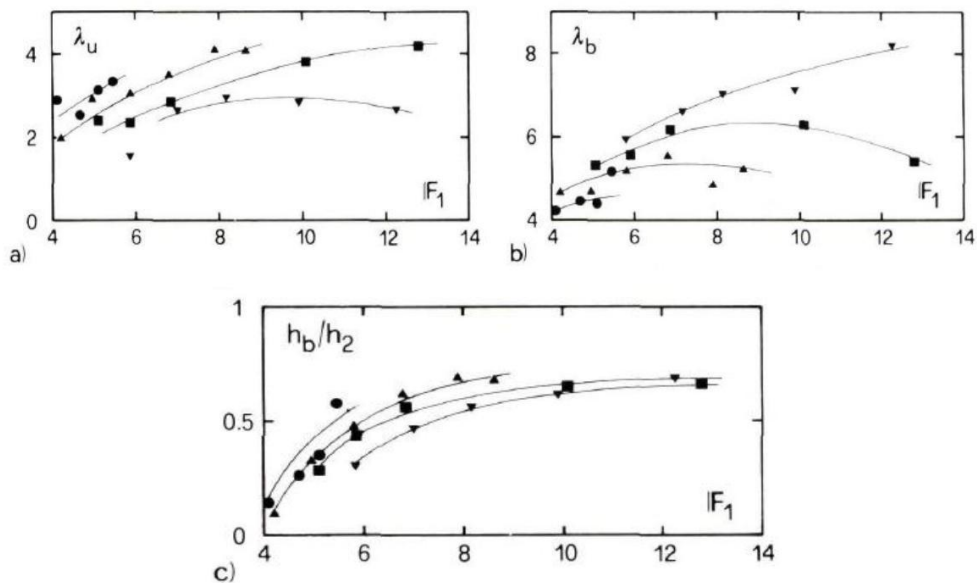


Figure .II.5 : Caractéristiques principales du rouleau de fond : a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximale adimensionnelle h_b / h_2 en fonction de F_1 et de M.

(▼) M=0.1 ; (■) M=0.2 ; (▲) M=0.3 ; (●) M=0.4.

Les graphes ont montré que :

- λ_u est confiné entre 2 et 4, rigoureusement elle est approximativement près du pied du ressaut.
- Pour F_1 donné, λ_u augmente avec l'accroissement de M .
- La valeur de λ_b est beaucoup plus grande que λ_u et elle peut atteindre la valeur de 8.
- λ_b diminue avec l'augmentation de M , contrairement à λ_u .
- La fin du rouleau du fond ($\lambda_u + \lambda_b$) est approximativement indépendante de M , et elle augmente avec l'augmentation de F_1 jusqu'à un maximum de 10.5.

La hauteur maximale $\frac{h_b}{h_2}$ du rouleau du fond augmente avec F_1 jusqu'à une valeur limite de 0.6 à 0.7. Pour F_1 donné, $\frac{h_b}{h_2}$ augmente avec l'accroissement de M .

Ce qui étonnant, c'est que la présence du rouleau du fond n'a jamais été détectée comme une composante typique du ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal.

La Figure 2.5.c montre que la hauteur maximale du rouleau du fond peut atteindre 50% de h_2 pour $F_1 > 6$.

II.3.1.4.2. La longueur de l'écoulement latérale en retour L_s

Le rouleau de surface n'existe plus dans les ressauts générant en canal trapézoïdal, au lieu de cela, un écoulement inverse se produit dans la zone de retour latérale, pour des petites valeurs de nombre de Froude F_1 , l'écoulement en retour est concentré dans le côté opposé au courant principal, pour des grandes valeurs de F_1 , l'écoulement en retour se produit le long des deux côtés latéraux.

Si on suppose que L_s est la longueur de l'écoulement en retour, la figure (2.6) indique la variation de $\lambda_s = \frac{L_s}{h_2}$ en fonction de F_1 pour différentes valeurs de M . Le ressaut qui a des caractéristiques de surface ondulée est tracé avec des signes ouverts.

La transition entre le ressaut ondulé et ordinaire est continuée. Cependant, il existe une valeur limite du nombre de Froude F_{1L} avec laquelle les deux types de ressauts peuvent être séparés :

$$F_{1L} (M = 0.1) = 6 ; F_{1L} (M = 0.2) = 5 ; F_{1L} (M = 0.3) = 4.2 ; F_{1L} (M = 0.4) = 3.5.$$

Donc, F_{1L} diminue avec l'augmentation de M .

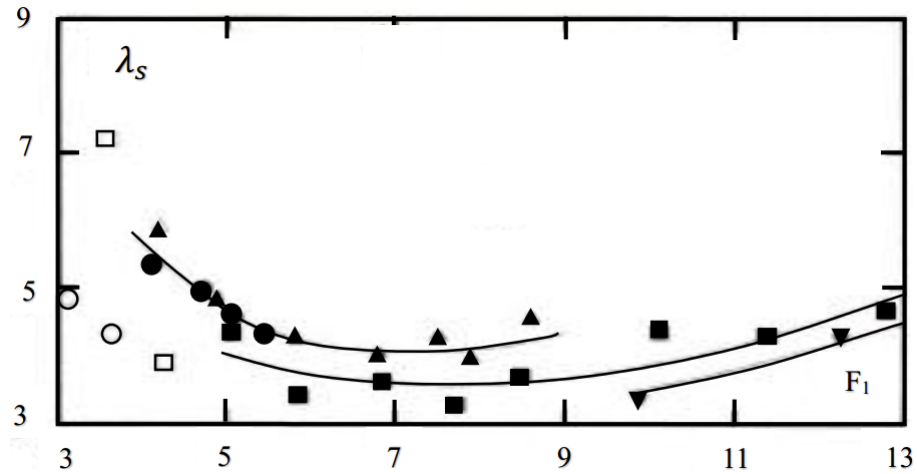


Figure. II.6 : Longueur relative λ_s de courant de retour latérale. (∇) $M=0.1$; ($\blacksquare$) $M=0.2$; ($\blacktriangle$) $M=0.3$; ($\bullet$) $M=0.4$

II.3.1.4.3. La longueur de ressaut L_j

Bien que plusieurs définitions de cette longueur aient été présentées, les chercheurs ont pris la fin de ressaut la position dans laquelle les bulles d'air ont disparu, la fin du ressaut est visualisée par les yeux. La figure 2.7 indique la variation de $\lambda_j = \frac{L_j}{h_2}$ en fonction de F_1 et de M .

Il est clair que λ_j augmente avec l'augmentation de F_1 et de M . Pour des petites valeurs de F_1 , aucune mesure fiable ne serait prise, selon la Figure 2.7, λ_j est varié entre les valeurs de 5 et 7. Toutefois, pour la comparaison, la longueur du ressaut en canal rectangulaire est tracée dans la même figure.

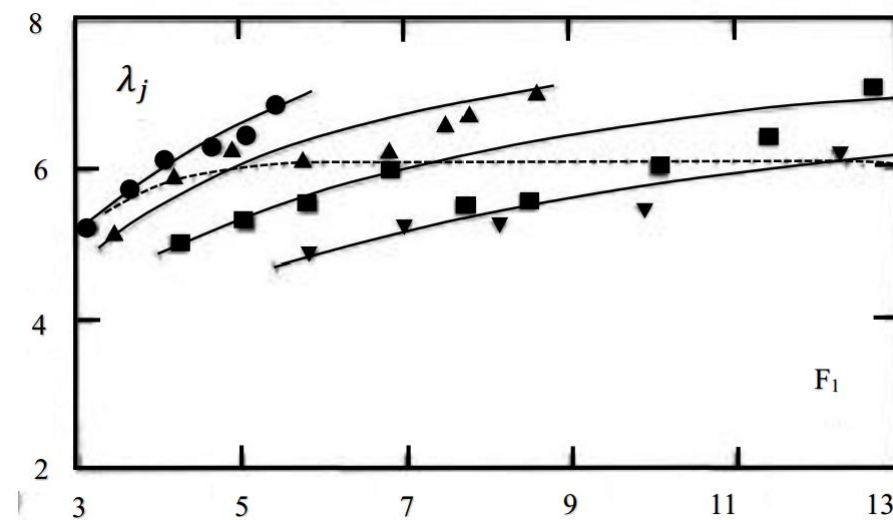


Figure. II.7 : Longueur relative λ_j de ressaut en fonction de F_1 et de M . (∇) $M=0.1$; ($\blacksquare$) $M=0.2$; ($\blacktriangle$) $M=0.3$; ($\bullet$) $M=0.4$. (...) pour un ressaut en canal rectangulaire

Les figures (2.6 ; 2.7) indiquent que $\lambda_j > \lambda_s$. Toutefois, λ_j est toujours plus petite que $(\lambda_u + \lambda_b)$, la fin du rouleau du fond est toujours plus en aval que la fin du ressaut.

La longueur du ressaut hydraulique dans les canaux trapézoïdaux mesurée le long de l'axe du canal est trouvée moins détachée que celle en canal rectangulaire.

Posey et Hsing (1938) ont exprimé la longueur relative $\lambda_j = \frac{L_j}{h_2}$ par la relation :

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_2} = 5 \left[1 + 4 \left(\frac{w_2 - w_1}{w_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.6)$$

Où : $W = b + 2mh$ avec W : largeur superficielle d'eau.

Une autre formule de la longueur du ressaut a été analysée par Silvester (1964). L_j est mis en relativité avec $(h_2 - h_1)$ pour différentes valeurs de $M < 0.25$, les résultats expérimentaux peuvent assez bien être exprimés :

$$\frac{L_j}{(h_2 - h_1)} = 7(1 + 10M) \quad (2.7)$$

Avec : $M = \frac{m \cdot h_1}{b}$ où m est la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal, b la base du trapèze et h_1, h_2 sont respectivement la hauteur initiale et finale du ressaut ; Le paramètre adimensionnel M représente en fait, le rapport de forme du ressaut.

La longueur relative $L_j / (h_2 - h_1)$ augmente avec M , encore, pour des valeurs données de nombre de Froude F_1 , $(h_2 - h_1)$ diminué avec l'augmentation de M .

Ohtsu (1976) a corrélié la longueur du ressaut, comme suit :

$$\log_{10} \left(\frac{L_j}{\Delta H} \right) = 1,71\xi + 0,315m + 1,58 \quad (2.8)$$

Où : $\xi = \frac{\Delta H}{H_i}$ est la perte d'énergie relative à travers le ressaut, ΔH : la perte d'énergie du ressaut, H_i : la charge totale d'eau.

II.3.1.5. Perte de charge relative du ressaut hydraulique

La perte de charge ΔH du ressaut est par définition la différence des charges initiale et finale : $\Delta H = H_1 - H_2$ (figure. 2.8).

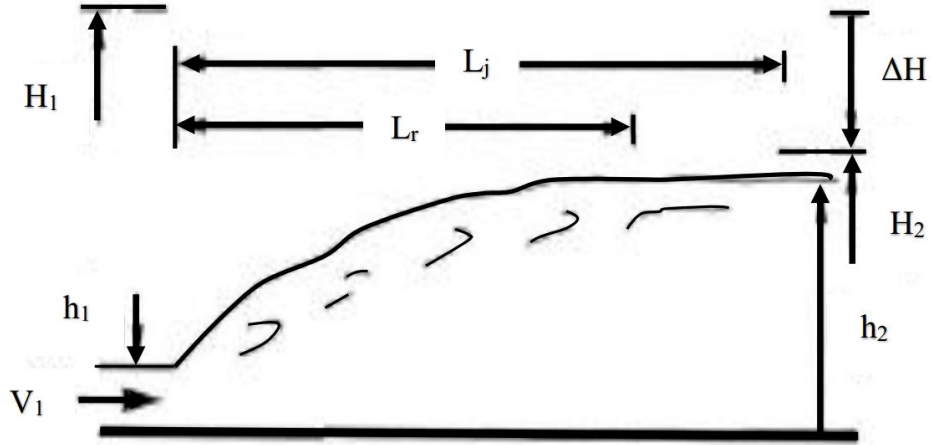


Figure. II.8 : Schéma de définition du ressaut hydraulique

La perte de charge relative est par définition comme étant le rapport de ΔH à la charge initiale H_1 :

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{\Delta H}{H_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \\ H_1 &= h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \\ H_2 &= h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

En tenant compte des relations donnant le rapport des hauteurs conjuguées, le rapport de forme et de nombre de Froude amont F_1 .

$$Y = \frac{h_2}{h_1}, M = \frac{mh_1}{b} \text{ et } F_1 \text{ tel que :}$$

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

On obtiendra :

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

✓ Cas particulier du canal rectangulaire

Pour le canal rectangulaire on a : $M = 0$, donc :

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

Hager et Sinniger (1985) ont proposé une bonne approximation de cette équation :

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right]^2 ; F_1 > 2,5 \quad (2.11)$$

✓ *Cas du canal triangulaire*

Pour le cas du canal triangulaire on a : $\frac{1}{M} = 0$; ($M \rightarrow \infty$). L'expression de la perte de charge relative sera :

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

Pour $F_1 > 3$, Hager et Sinniger (1985) proposent la relation approchée suivante :

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

La représentation graphique (figure. 2.9) de la relation générale (2.9), montre que pour le même nombre de Froude F_1 , le rendement du ressaut en canal triangulaire est plus élevé que celui en canal rectangulaire ou du trapézoïdal. Comparé au rendement du ressaut rectangulaire, le rendement du ressaut trapézoïdal est environ 10 % plus important.

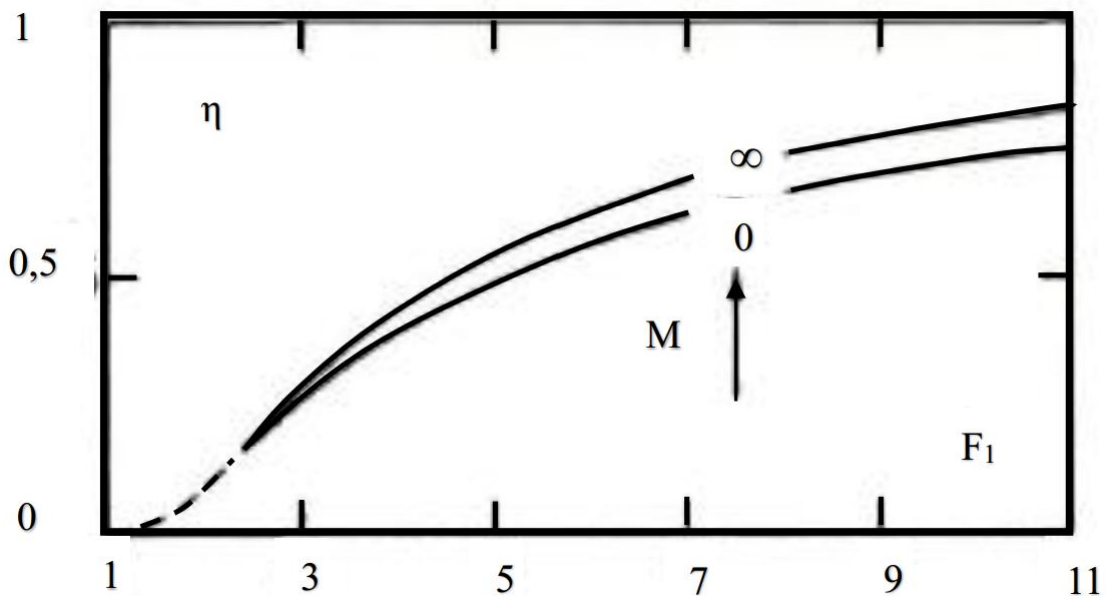


Figure. II.9 : Dissipation relative d'énergie : $\eta = \frac{\Delta H}{H_1}$, fonction de F_1 et de M

II.4. Ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal contrôlé par marche positive

II.4.1. Travaux de Kateb, Debabache et Benmalek (2013)

Les chercheurs ont conduit une étude expérimentale reflétant l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal. Une étude comparative entre les caractéristiques du ressaut contrôlé et le ressaut forcé type A par marche positive est proposée. L'expérimentation a été menée sur cinq hauteurs initiales de l'écoulement incident : h_1 (mm) = 20 ; 30 ; 40 ; 50 et 60, une gamme de nombre de Froude F_1 entre 2 et 14, le rapport de forme M est varié entre $0.031 < M < 0.094$.

12 marches positives de hauteur s (cm) différente ont été mises en place avec une longueur de 1 m.

Cependant, la distinction entre les types du ressaut hydraulique dépend du rapport L_j/x ; lorsque ce rapport est inférieur ou égal à l'unité, le ressaut est dit contrôlé ; lorsque est supérieur à l'unité, le ressaut est dit forcé, le ressaut forcé type A est établi quand la position x de la marche coïncide avec la longueur du rouleau L_r .

II.4.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de nombre de Froude F_1 , $Y = f(F_1)$ est examiné pour le ressaut contrôlé et forcé de type A par marche positive et le ressaut contrôlé par seuil mince. Dans le but de révéler l'intérêt de la présence d'un obstacle, les chercheurs ont aussi implanté une courbe issue de la relation théorique (2.4).

Les résultats ont montré que pour une même valeur de F_1 , le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut forcé est inférieur à celui de son homologue contrôlé, et pour le même type du ressaut, la marche positive a un effet réducteur sur la hauteur conjuguée meilleur que celui du seuil mince. (Figure ure 2.10)

Les travaux expérimentaux ont permis aux chercheurs de monter que la fonction $Y=f(F_1)$ est une droite d'équation :

$$\checkmark Y = 1.21F_1$$

Pour le ressaut contrôlé par seuil mince

$$\checkmark Y = 1.13F_1$$

Pour le ressaut contrôlé par marche positive.

$$\checkmark Y = 1.01F_1$$

Pour le ressaut forcé par marche positive.

Avec $0.031 \leq M \leq 0.094$ et $2 < F_1 < 8$

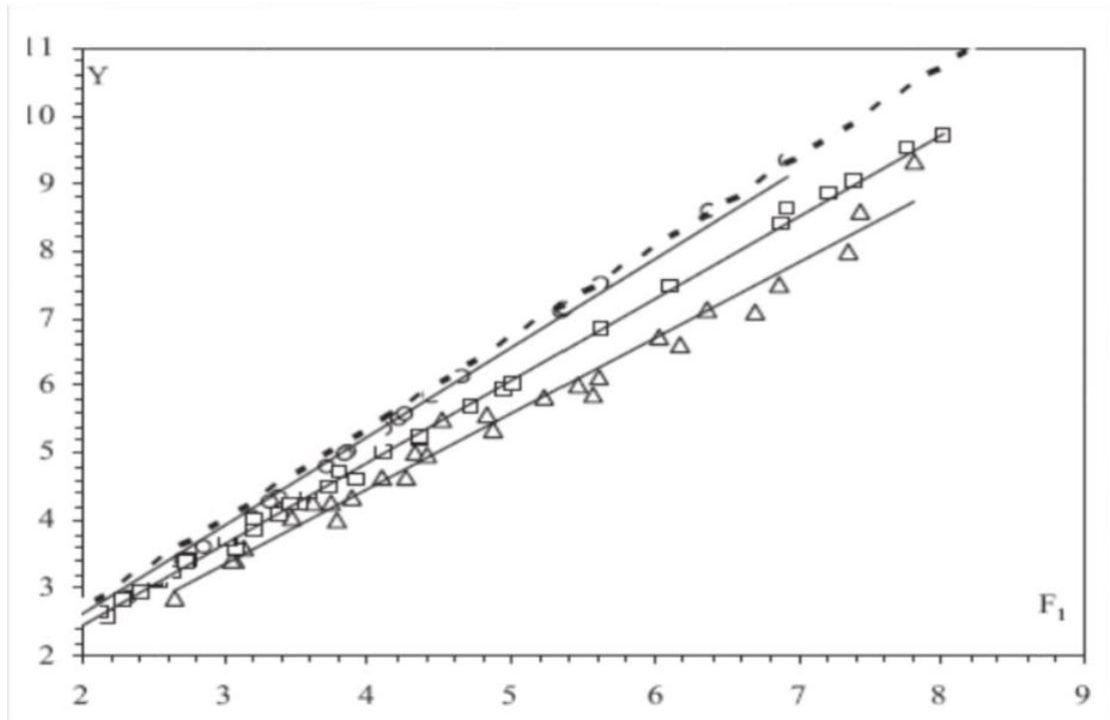


Figure. II.10 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 ; (O) ressaut contrôlé par seuil mince ; (□) ressaut contrôlé par marche positive ; (Δ) ressaut forcé de type A par marche positive ; (-----) courbe tracé selon la relation théorique

II.4.1.2. Hauteur relative du seuil et de la marche positive

La variation de la hauteur relative du seuil et de la marche positive est étudiée en fonction du nombre de Froude F_1 , la figure (2.11) montre que pour le même nombre de Froude F_1 , la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive du ressaut forcé est inférieure à celle du ressaut contrôlé.

Les résultats expérimentaux ont montré aussi que la variation de la hauteur relative S en fonction du nombre de Froude F_1 suit une loi de type puissance, les chercheurs ont pu écrire :

$$\checkmark \quad s/h_1 = S = 0.15F_1^{1.65}$$

Pour le ressaut forcé par marche positive.

$$\checkmark \quad s/h_1 = S = 0.24F_1^{1.57}$$

Pour le ressaut contrôlé par marche positive.

$$\checkmark \quad s/h_1 = S = 0.42F_1^{1.36}$$

Pour le ressaut contrôlé par seuil mince.

Avec $0.031 \leq M \leq 0.094$ et $1.5 < F_1 < 8$

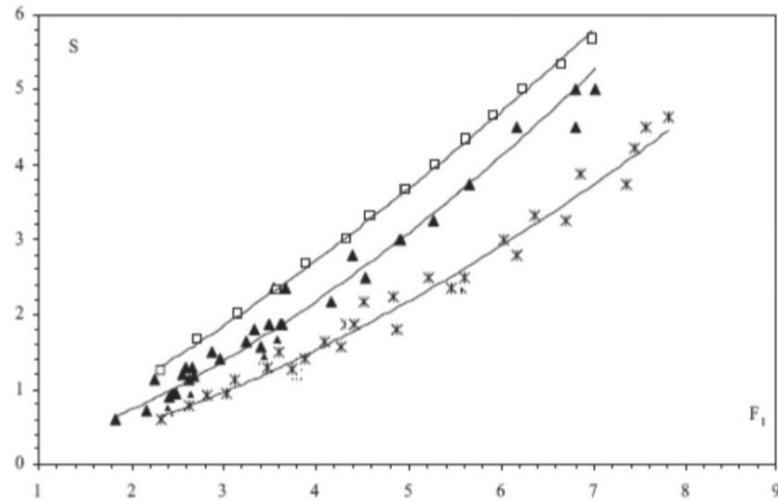


Figure. II.11 : Variation du rapport S de la marche en fonction du nombre de Froude F_1 .
 (▲) Ressaut contrôlé par marche positive ; (□) ressaut contrôlé par seuil mince ; (✕) ressaut forcé de type A par marche positive

II.4.1.3. Position relative de la marche positive

La figure 2.12 montre que la position relative X de la marche positive du ressaut forcé est inférieure à celle contrôlée pour le même nombre du Froude F_1 , l'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés non linéaire a permis de déduire des relations empiriques de type droite :

- ✓ $X = 12.86F_1 - 6.84$ Pour le ressaut contrôlé par marche positive.
- ✓ $X = 10.54F_1 - 5.06$ Pour le ressaut forcé par marche positive.
- ✓ $X = 12.91F_1 - 2.52$ Pour le ressaut contrôlé par seuil mince.

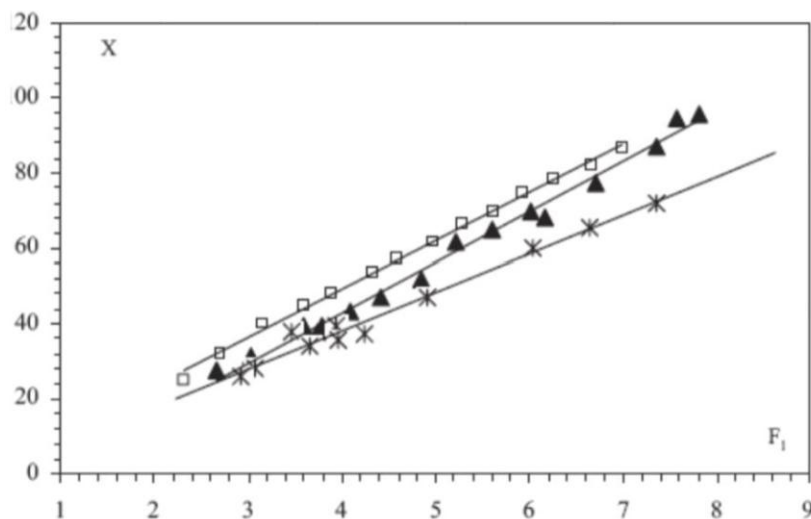


Figure. II.12 : Variation de la position de la marche X en fonction du nombre de Froude F_1 .
 (▲) Ressaut contrôlé par marche ; (□) ressaut contrôlé par seuil mince ; (✕) Ressaut forcé de type A par marche positive.

II.4.1.4. Le rendement du ressaut hydraulique

Les chercheurs ont démontré que le rendement du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal est calculé en utilisant la relation (2.9).

La figure (2.13) montre que la dissipation d'énergie du ressaut hydraulique forcé par marche positive est supérieure à celle de son homologue contrôlé pour des valeurs du nombre de Froude F_1 entre 2 et 8. Cependant, pour les nombres de Froude $F_1 > 8$ toutes les trois courbes tendent à se rejoindre.

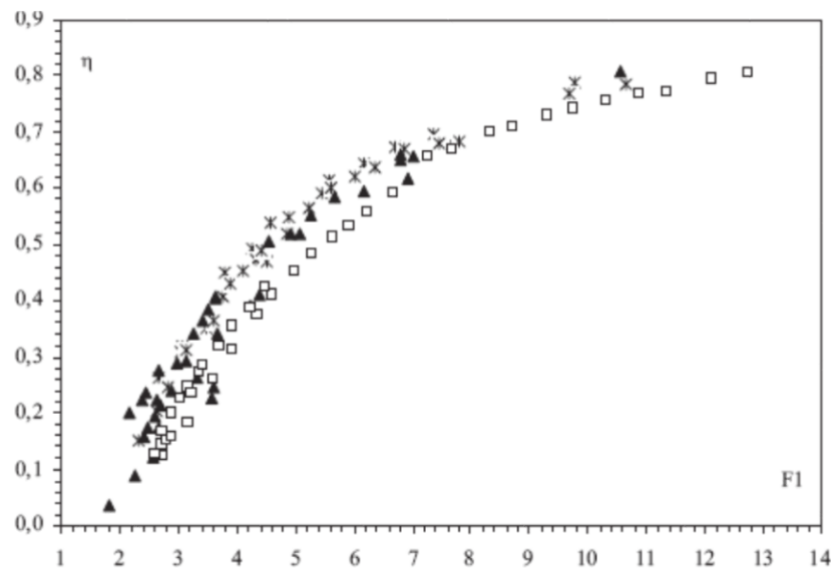


Figure .II.13 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . ($\blacktriangle$) Ressaut contrôlé par marche ; ($\square$) ressaut contrôlé par seuil mince ; ($\times$) ressaut forcé de type A par marche positive.

II.5. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter, en premier lieu, les contributions de Hager et Wanoschek (1987, 1989), en précisant que les investigations publiées en 1987 étaient spécifiquement dédiées au ressaut hydraulique au sein de canaux triangulaires. Les auteurs y ont développé une approche théorique formalisée pour le canal trapézoïdal, en appréhendant les profils triangulaires et rectangulaires comme des cas limites de cette géométrie. Leurs résultats indiquent que les caractéristiques hydrodynamiques du ressaut — notamment le rapport des hauteurs conjuguées, les longueurs respectives du saut et de son rouleau, ainsi que le rendement global — s'avèrent plus favorables dans un canal triangulaire que dans un canal rectangulaire. Par la suite, leurs travaux de 1989 ont fourni une description exhaustive du ressaut en canal trapézoïdal, mettant en évidence pour la première fois la formation d'un rouleau de fond pour un nombre de Froude amont supérieur à quatre ($F_1 > 4$), tout en constatant expérimentalement l'absence de rouleau de surface.

En ce qui concerne la quantification de la perte de charge relative, les formulations de Hager et Wanoschek (1987) adaptées au profil trapézoïdal ont été mises en perspective avec la relation approchée proposée par Hager et Sinniger (1985). L'analyse graphique du rendement énergétique en fonction du nombre de Froude F_1 démontre que, parmi les configurations étudiées, le profil triangulaire présente l'intérêt le plus marqué sur le plan de l'efficacité de la dissipation.

En second lieu, ce chapitre a exposé les investigations expérimentales menées par Kateb, Debabeche et Benmalek (2013), portant sur l'influence d'une singularité de fond (marche positive ou seuil mince) sur le comportement macroscopique du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. Cette étude a révélé que, pour un nombre de Froude incident F_1 donné, la hauteur conjuguée aval, la position spatiale de la marche et la hauteur requise du seuil s'avèrent plus faibles dans le cas d'un ressaut forcé par une marche de type A que pour les configurations contrôlées par une marche positive classique ou par un seuil. Bien que le taux de dissipation de l'énergie cinétique demeure statistiquement équivalent pour les trois dispositifs, des lois empiriques spécifiques ont été formulées pour chacun de ces cas afin de servir d'outils prédictifs pour le dimensionnement optimal de ces structures.

Chapitre III :
Description du modèle
expérimentale

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous fournirons une description détaillée du modèle expérimental avant de procéder à l'étude expérimentale et d'expliquer les différents tests effectués sur les appareils de mesure utilisés.

III.2. Description du canal

Les expériences ont été conduites dans un canal à surface libre représenté sur la (Figure III.1) et (Photo III.1), Il s'agit d'un canal de 12 m de longueur, ayant une hauteur de 0,6m, une distance suffisante pour la formation du ressaut, les parois latérales sont en verre. Il est constitué d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure par une conduite circulaire en PVC d'un diamètre de 115 mm L'ensemble fonctionne en circuit fermé. L'écoulement est entretenu par deux pompes centrifuges (en disposées parallèles). (Photo III.5) qui alimente un convergent en charge (Son rôle est de générer un écoulement à grande vitesse) (Photo III.6) (Photo III.7) débouchant dans le canal de mesure. On dispose ici d'un canal horizontal de section rectangulaire composée, d'une longueur est de 3 m et dont les hauteurs respectivement lit mineur $h_{c0}=20$ cm et lit majeur $h_{c1}=32.5$ cm et les largeurs des trois lits du canal sont respectivement lit majeur $b=20$ cm, lit moyenne $b_m=39$ cm, li majeur $B=60$ cm. Il est relié en sa partie aval à un second canal de section droite rectangulaire dont le fond présente une pente nulle. Un déversoir rectangulaire est inséré sans hauteur de pelle avec contraction latérale (Photo III.10), permettant la mesure du débit.

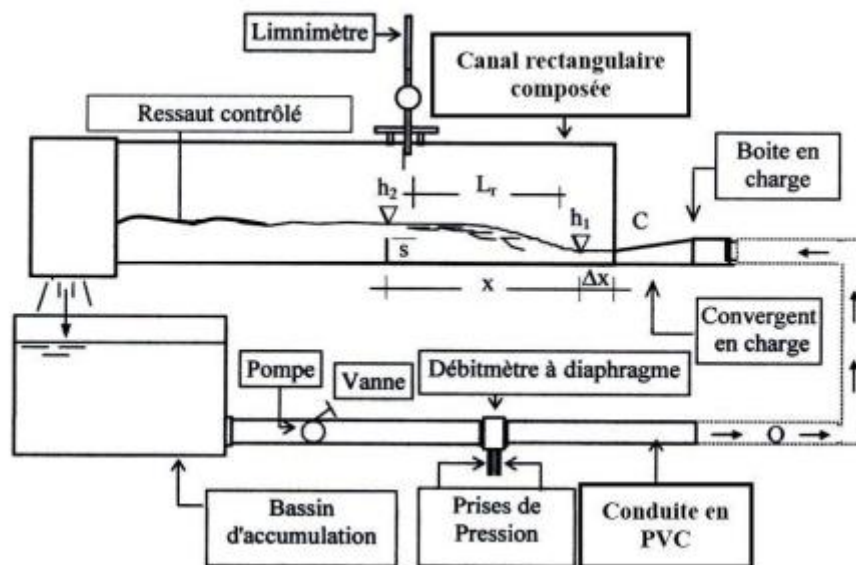


Figure III.1: Schéma simplifié du canal de mesure de section droite rectangulaire de forme composée, ayant servi à l'expérimentation.



Photo III.1 : Pompe centrifuge axiale (pompe principale).



Photo III.2 : Deuxième pompe (pompe de renforcement).



Photo III.3 : Photographie du model expérimentale du cana (vu latérale)



Photo III.4 : Photographie du model expérimentale du canal (vue plan).



Photo III.5 : Photographies de la convergent (la hauteur de l'ouverture = 2cm).



Photo III.6 : Photographie d'un vérin manuel et vanne de manipulation.



Photo III.7 : Raccordement des pompes.

Le canal rectangulaire de forme composée est relié, dans sa partie amont, à une boîte en charge (Photo III.6). Le rôle de ce convergent est de générer un écoulement incident à grande vitesse. La section de sortie du convergent est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale h_1 du ressaut.



Photo III.8 : Photographie d'une boîte en charge.

III.3. Limnimètre :

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à l'ouverture due à la section de sortie du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été évaluées par un limnimètre. (Figure III.2).

L'instrument est formé d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnimétrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau (Photo III.9).

La lecture sur le limnimètre s'effectue en deux étapes : on procède d'abord à la lecture de la graduation sur la règle, située immédiatement en haut de zéro du vernier, puis on effectue la lecture du nombre de cinquantième en face de la division qui coïncide ou qui est la plus rapprochée d'une division de la règle.

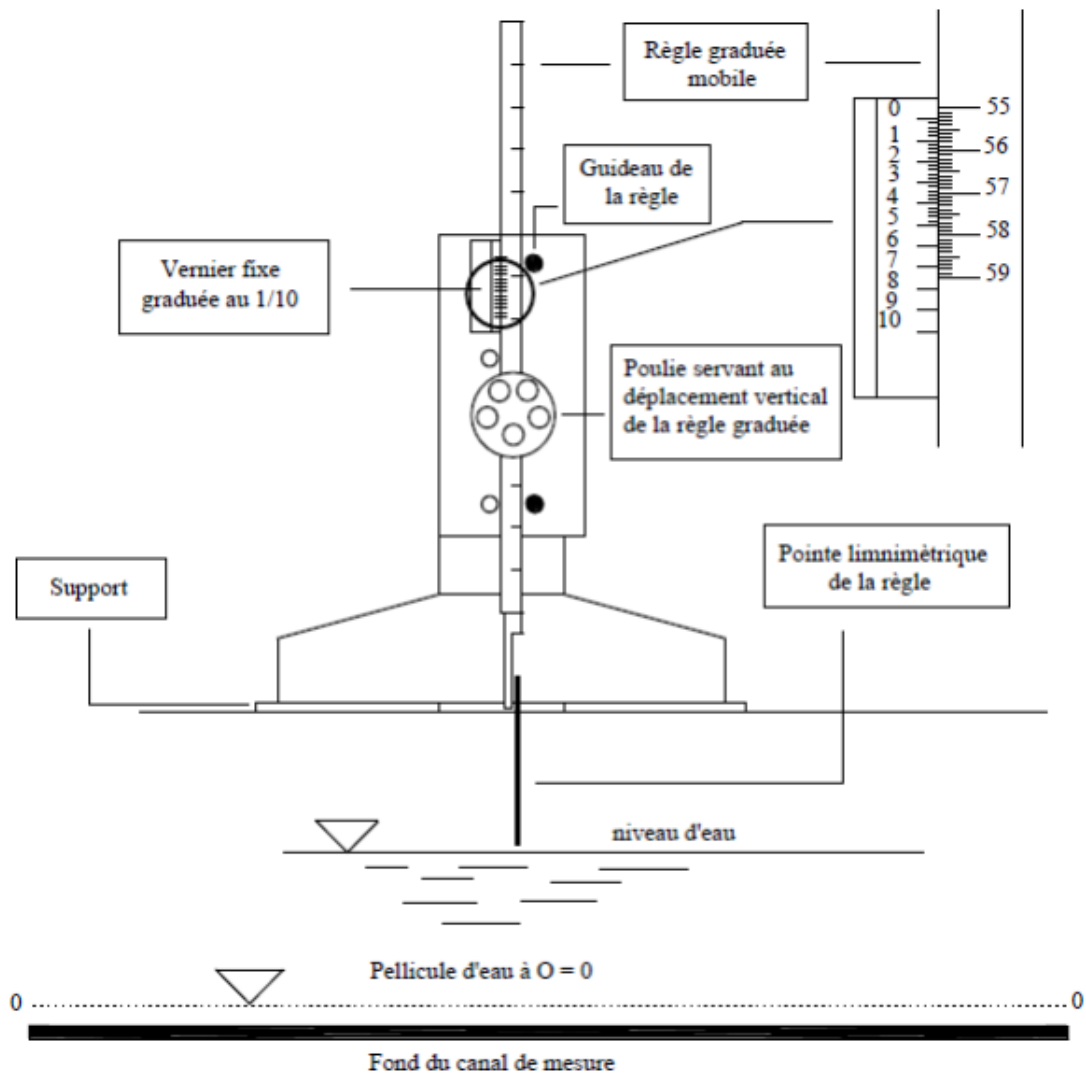


Figure III.2 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.



Photo III.9 : Photographies des limnimètres qui sont utiliser dans le model.

En ce qui concerne les mesures des débits Q , nous avons utilisé le débitmètre à déversoirrectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de Hachemi Rachedi (2006).



Photo III.10 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit.

III.4. Les seuils minces

Les seuils utilisés dans notre dispositif expérimental, sont façonnées de fer en forme rectangulaire de forme composée.

Dans le but d'obtenir un nombre n'important de points de mesures, nous avons préparé 25 seuils minces de différentes hauteurs (Photo III.11) :

$s = (4 \text{ cm}; 5 \text{ cm}; 6 \text{ cm}; 7 \text{ cm}; 8 \text{ cm}; 9 \text{ cm}; 10 \text{ cm}; 11 \text{ cm}; 12 \text{ cm}; 13 \text{ cm}; 14 \text{ cm}; 15 \text{ cm}; 16 \text{ cm}; 17 \text{ cm}; 18 \text{ cm}; 19 \text{ cm}; 20 \text{ cm}; 23 \text{ cm}; 25 \text{ cm}; 26 \text{ cm}; 27 \text{ cm}; 28 \text{ cm}; 29 \text{ cm}; 30 \text{ cm}; 31 \text{ cm}).$



Photo III.11 : Photographie des seuils minces testés.

La fixation des seuils minces sur le fond du canal rectangulaire, est assurée par le support duseuil (Photo III.12).



Photo III.12 : Support du seuil.

III.5. Modèle expérimental

Le positionnement longitudinal de l'obstacle n'est pas anodin. En effet, il est placé sur la paroi du fond du canal, après avoir positionné le pied du ressaut. Les distances horizontales ont été mesurées à l'aide d'un ruban gradué telle que la longueur du ressaut L_j et de son rouleau L_r .

Afin d'atteindre un plus grand nombre de points de fonctionnement dans le plan des paramètres voulus, on a pris un pas $\Delta x = 5$ cm cette distance n'a pu être réduite davantage en raison de l'instabilité horizontale du ressaut, notamment pour les débits forts. Pour chaque Δx ont utilisé 25 seuils de tailles différentes.

III.6. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'analyse expérimentale détaillée du ressaut hydraulique se développant au sein d'un canal rectangulaire à section composée instrumenté d'un seuil mince. Le manuscrit décrit le modèle physique exploité, le dispositif expérimental mis en œuvre, les protocoles métrologiques ainsi que les résultats empiriques obtenus. Les différentes phases de cette campagne d'essais sont étayées par des schémas synoptiques et des illustrations photographiques.

Pour la quantification du débit volumique, le choix s'est porté sur un déversoir de mesure rectangulaire en mince paroi, sans pelle et à contraction latérale, selon le modèle développé par Rachedi (2006). En dépit des incertitudes inhérentes à la détermination de la hauteur d'eau aval h_2 accentuées par les fluctuations de la surface libre et l'instabilité hydrodynamique du régime d'écoulement, ce dispositif a démontré une fiabilité et une précision adaptées aux exigences de l'étude.

Enfin, l'étanchéité rigoureuse des différentes jonctions structurales, assurée par l'application d'un matériau malléable étanche, a garanti la stabilité de la configuration géométrique et l'absence de fuites tout au long des campagnes de mesures.

Chapitre IV:
Étude expérimentale

IV.1. Introduction

Cette étude présente une analyse expérimentale du comportement du ressaut hydraulique au sein d'un canal rectangulaire horizontal (pente nulle) à lit composé, muni d'un seuil mince. Les essais ont été réalisés à une hauteur d'eau initiale constante ($h_1 = 2\text{cm}$), en faisant varier de manière systématique le nombre de Froude incident de 4,19 à 15,65. Cette plage de valeurs a permis de couvrir une large gamme de régimes d'écoulement.

Pour stabiliser et contrôler le ressaut hydraulique, l'insertion d'un obstacle tel qu'un seuil dans le lit du canal s'avère indispensable. Dans le but d'évaluer l'impact de la géométrie de cet aménagement sur les caractéristiques hydrodynamiques du phénomène, plusieurs hauteurs de seuil ont été testées au cours de nos essais.

Pour mener à bien cette investigation, le présent chapitre est structuré en deux sections complémentaires. La première est dédiée à la description détaillée du dispositif expérimental, des protocoles de mesure ainsi que des conditions d'essai. La seconde section est consacrée à l'analyse approfondie et à l'interprétation des données recueillies, afin de mettre en évidence l'influence de nombre de Froude sur le comportement du ressaut hydraulique représentée par le rapport des hauteurs conjuguées Y .

IV.2. Effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire de forme composée

IV.2.1. Position du problème

L'objectif de notre travail est d'analyser les caractéristiques d'un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil au sein d'un canal rectangulaire à géométrie variable. Les investigations reposent sur la quantification de plusieurs paramètres clés : le débit (Q) évalué via le système convergent, la hauteur d'eau en aval (h_2) relevée au moyen d'un limnimètre, ainsi que les longueurs caractéristiques du rouleau (L_r) et du ressaut (L_j).

Pour une analyse dimensionnelle complète, les résultats expérimentaux sont exprimés en termes de nombres adimensionnels suivants : le nombre de Froude incident (Fr_1), le rapport des hauteurs d'eau conjuguées (Y), les hauteurs relatives du seuil (S) et des différentes longueurs caractéristiques du ressaut (λ_j et λ_r), ainsi que le rendement énergétique (η).

La reproductibilité des résultats a été assurée en maintenant une hauteur d'eau initiale unique de 2 cm tout au long des expériences. La figure IV.1 offre une vue d'ensemble du dispositif expérimental, mettant en évidence la configuration caractéristique du ressaut hydraulique étudié.

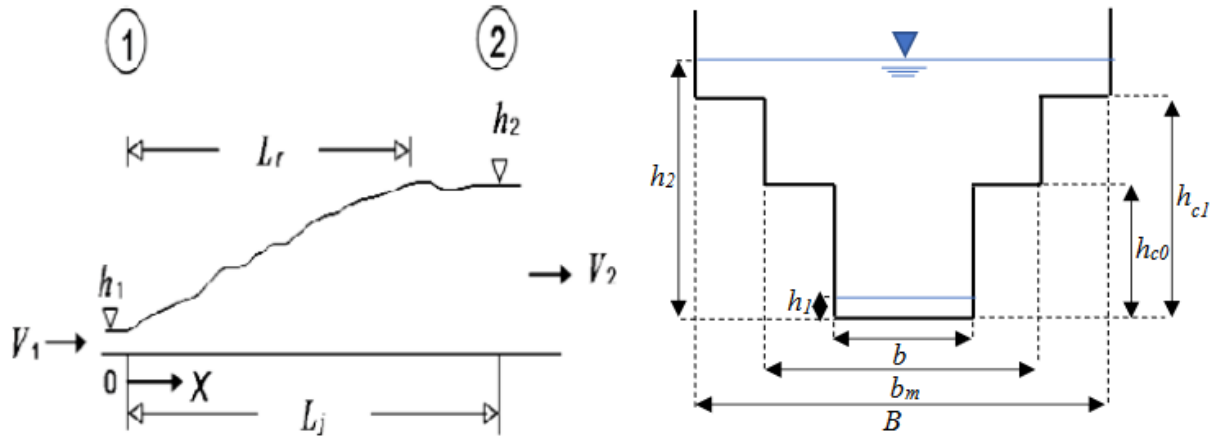


Figure 01 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil en canal composé droit.

IV.2.2. Mesure du débit volume Q

Pour déterminer le débit volumique Q, le canal de mesure est relié à un second canal équipé d'un déversoir rectangulaire sans contraction latérale. Ce déversoir, mis au point par Hachemi Rachedi (2006), est utilisé pour mesurer la hauteur d'eau déversante ($h_{\text{dév}}$). En connaissant cette hauteur, il est possible de calculer le débit correspondant à l'aide de relations empiriques établies pour ce type de déversoir.

Dans la formule (4.1) en assurant la condition d'application de celle-ci qui est :

$$Q = 0,3794B\sqrt{2g}\beta(1 + 0.16496\beta^{2,0716})^{3/2}h_{\text{dév}}^{3/2} \quad (4.1)$$

Avec :

$\beta = b_{\text{dév}}/B$.

Q : le débit en (m^3/s).

B : la largeur du canal en (m).

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

β : rapport de forme.

$b_{\text{dév}}$: Largeur de l'échancrure en (m).

$h_{\text{dév}}$: La hauteur de la lame déversant en (m).

La condition d'application de cette relation est satisfaite car : $\beta = b_{\text{dév}}/B = 0,24/0,60 = 0,4$ ($0,4 < 0,45$).

IV.2.3. Procédure expérimentale

Notre étude expérimentale vise à caractériser les propriétés du ressaut hydraulique se formant dans un canal à section composée, constitué d'un canal rectangulaire principal.

Comme il a été signalé précédemment, la mesure de la hauteur initiale h_1 s'effectue sur l'axe central de l'écoulement. Un convergent a été testé de hauteur : $h_{\text{convergent}} = 20 \text{ mm}$.

La gamme des nombres de Froude obtenue par cette ouverture est : $4,19 \leq Fr_1 \leq 15,65$. Les résultats obtenus par cette large gamme de nombre de Froude Fr_1 , nous a fournis des échantillons de mesures assez significatifs pour le type du ressaut étudié.

La formation complète du ressaut est conditionnée par la mise en place de seuil au travers de l'écoulement, pour cela 25 seuils ont été préparées et testées, de hauteur géométrique varie de 4cm à 31cm.

Dès l'obtention de la forme complète du ressaut, nous effectuerons pour chaque hauteur s et position x de pied du ressaut les étapes suivantes :

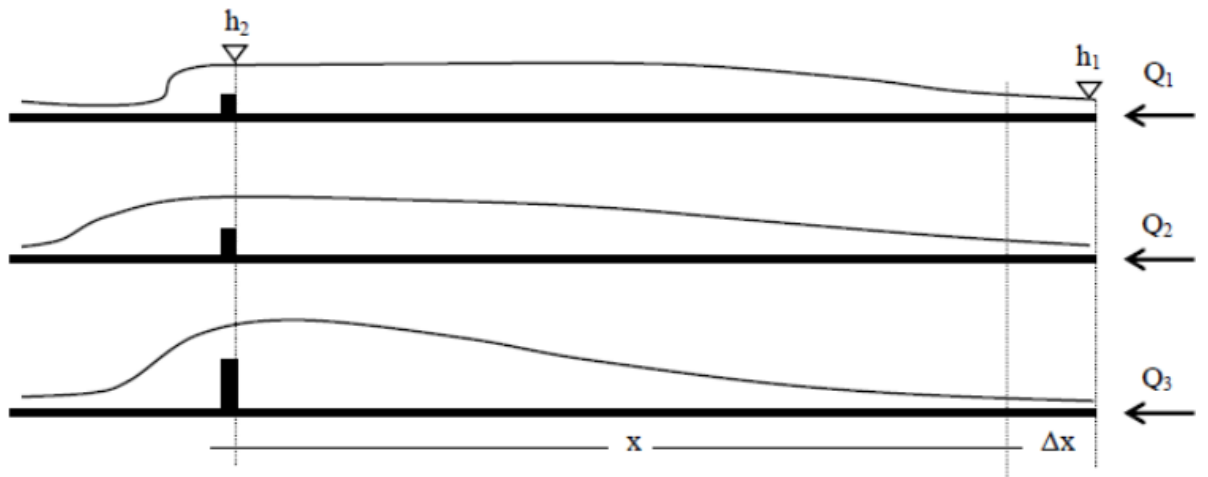
- ✚ Mesure de la hauteur déversant $hdév$.
- ✚ Calcule du débit volume Q par l'application de la relation (4.1).
- ✚ Calcule du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, par l'application de la relation :

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} \quad (4.2)$$

- ✚ Mesure de la longueur L_r du rouleau.
- ✚ Mesure de la longueur L_j du ressaut.
- ✚ Mesure de la hauteur conjuguée aval h_2 du ressaut.

Pendant l'expérimentation on a remarqué que l'accroissement du nombre de Froude Fr_1 entraîne un déplacement du ressaut vers l'aval ce qui provoque une augmentation de la longueur de son rouleau L_r . Par ailleurs la longueur L_j du ressaut.

La figure IV.2 représente trois configurations différentes du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite rectangulaire composé, obtenues à débit croissant pour une position x de seuil et une convergente fixées.



$Fr_1 = 5,13$, $s = 6$ cm, $h_2 = 13,2$ cm



$Fr_1 = 10,19$, $s = 18$ cm, $h_2 = 26$ cm



$Fr_1 = 13,58$, $s = 28$ cm, $h_2 = 36$ cm

Figure IV.2 : Différentes configurations du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince, obtenues à débit croissant pour une position de seuil $x = 233$ cm, une hauteur initiale $h_1 = 2$ cm et $\Delta x \approx 5$ cm.

IV.3. Analyse des résultats expérimentaux

IV.3.1. Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y en fonction du nombre de Froude Fr_1

Pour chaque valeur du nombre de Froude incident (Fr_1), le rapport Y des hauteurs conjuguées (y_2/y_1) présente une tendance croissante. De plus, pour chaque configuration du ressaut, les points de mesure expérimentaux s'alignent de manière satisfaisante autour d'une droite de régression linéaire de la forme $Y = aFr_1 + b$.

➤ **Pour $h_2 \leq h_{c0}$**

La figure IV.3 représente les points de mesures expérimentales et leurs ajustements pour $h_2 \leq h_{c0}$

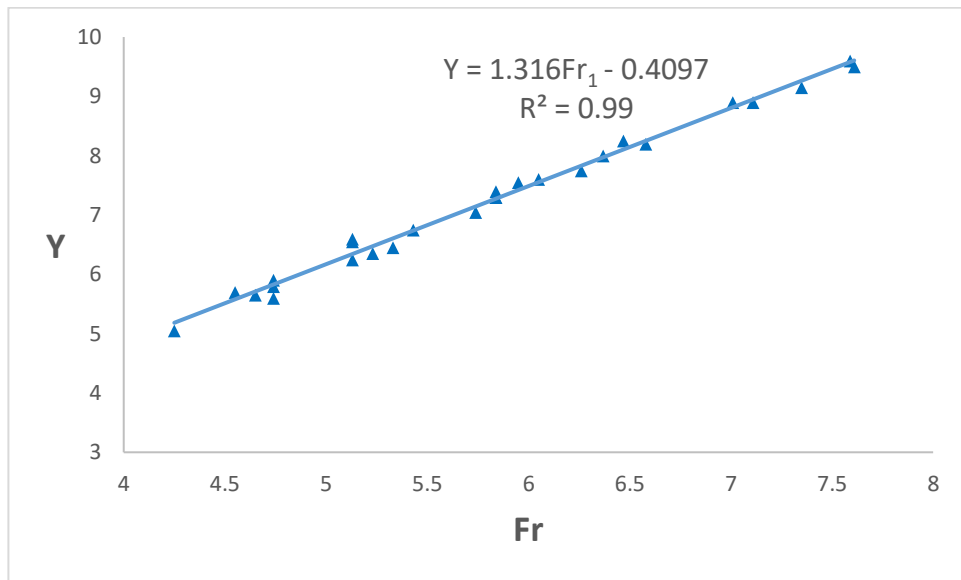


Figure IV.3 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude Fr_1 Pour $h_2 \leq h_{c0}$

Courbe de $Y = f(Fr_1)$ pour : $h_2 \leq h_{c0}$

$$Y = 1.316Fr_1 - 0.4097 \quad R^2 = 0.99$$

Les valeurs numériques correspondant aux points expérimentaux représentés sur la figure IV.3 sont consignées dans les tableaux IV.1, IV.2, IV.3

Tableau.1 : valeurs expérimentales de rapports Y du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident pour : $h_2 \leq h_{c0}$

Y	Fr_1	Y	Fr_1	Y	Fr_1
5,65	4,65	5,70	4,55	7,55	5,95
6,35	5,23	6,55	5,13	8,20	6,58
7,60	6,05	7,40	5,84	8,90	7,11
8,25	6,47	8,00	6,37	9,50	7,61
8,90	7,01	5,60	4,74	6,25	5,13
9,60	7,59	6,60	5,13	7,05	5,74
5,80	4,74	7,30	5,84	7,75	6,26
6,45	5,33	9,15	7,35		
7,30	5,84	5,90	4,74		
5,05	4,25	6,75	5,43		

➤ Pour : $h_{c0} < h_2 \leq h_{c1}$

La figure IV.4 représente les points de mesures expérimentales et leurs ajustements pour $h_{c0} < h_2 \leq h_{c1}$

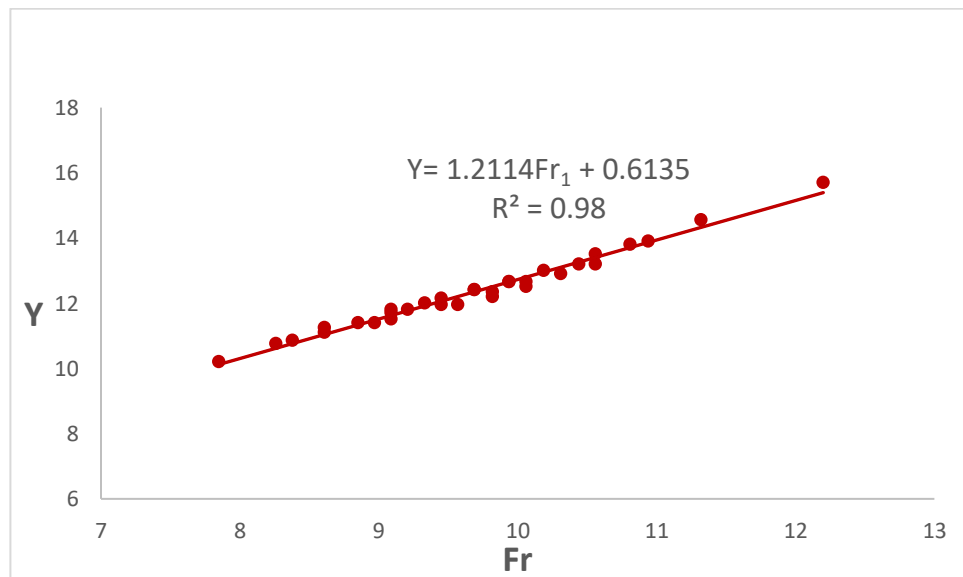


Figure IV.4 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude Fr_1 Pour $h_{c0} < h_2 \leq h_{c1}$

Courbe de $Y = f(Fr_1)$ pour : $h_{c0} < h_2 \leq h_{c1}$

$$Y = 1.2114Fr_1 + 0.6135 \quad R^2 = 0,98$$

Les valeurs numériques correspondant aux points expérimentaux représentés sur la figure IV.4 sont consignées dans les tableaux IV.2

Tableau.2 : valeurs expérimentales de rapports Y du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude Fr_1 pour : $h_{c0} < h_2 \leq h_{c1}$

Y	Fr₁	Y	Fr₁	Y	Fr₁
10,20	7,85	11,40	8,85	12,65	10,06
10,75	8,26	11,80	9,09	13,00	10,19
11,10	8,61	11,95	9,45	13,50	10,56
11,50	9,09	12,40	9,69	13,80	10,81
11,95	9,57	12,65	9,94	11,40	8,97
12,35	9,82	13,20	10,56	11,80	9,21
12,50	10,06	15,70	12,20	12,15	9,45
12,90	10,31	11,25	8,61	12,40	9,69
13,20	10,44	11,70	9,09	12,65	9,94
13,90	10,94	12,00	9,33	14,55	11,32
10,85	8,38	12,20	9,82		

➤ **Pour : $h_2 > h_{c1}$**

La figure IV.5 représente les points de mesures expérimentales et leurs ajustements pour $h_2 > h_{c1}$

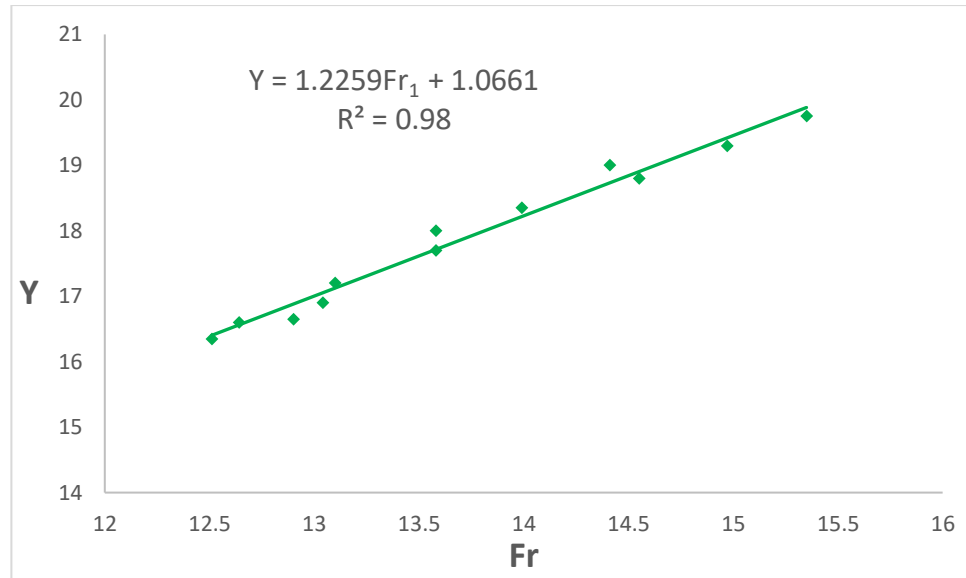


Figure IV.5 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude Fr_1 Pour $h_2 > h_{c1}$

Courbe de $Y = f(Fr_1)$ pour : $h_2 > h_{c1}$

$$Y = 1.2259Fr_1 + 1.0661 \quad R^2 = 0.98$$

Les valeurs numériques correspondant aux points expérimentaux représentés sur la figure IV.4 sont consignées dans les tableaux IV.3

Tableau.3 : valeurs expérimentales de rapports Y du ressaut pour des valeurs du nombre de Froude Fr_1 pour : $h_2 > h_{c1}$

Y	Fr_1	Y	Fr_1	Y	Fr_1
16,35	12,51	18,80	14,55	17,20	13,10
16,90	13,04	19,30	14,97	17,70	13,58
16,65	12,90	19,75	15,35	18,35	13,99
18,00	13,58	16,60	12,64	19,00	14,41

L'examen graphique du nuage de points met en évidence une forte similitude entre les données expérimentales issues des trois lits du canal. Cette homogénéité permet d'ajuster l'ensemble des points de mesure par un modèle unique.

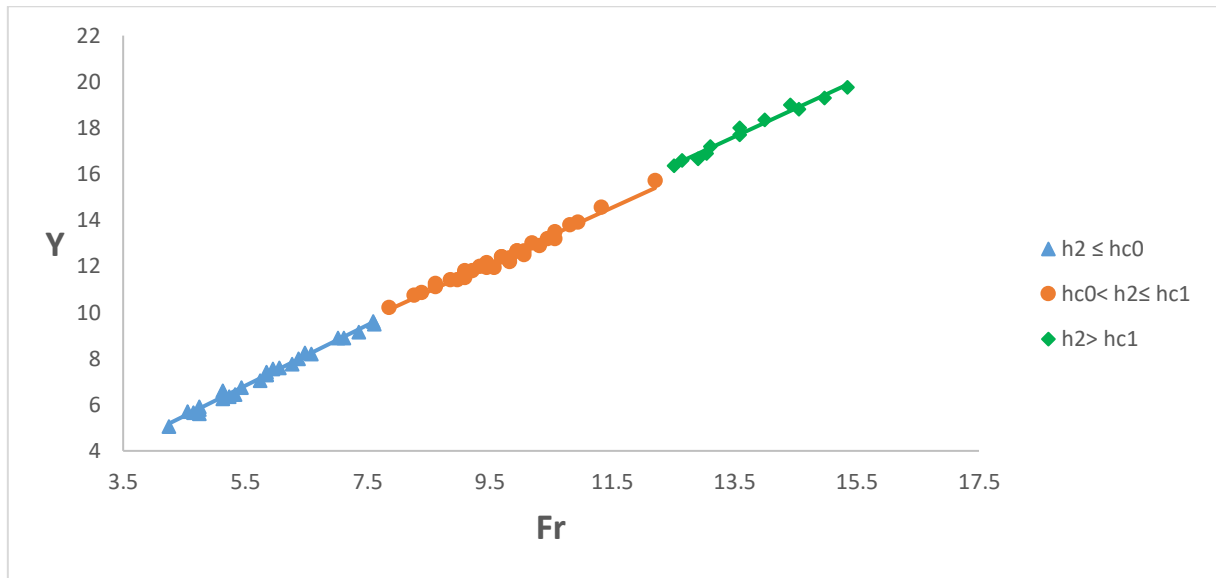


Figure IV.6 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude Fr_1

IV.4. Conclusion

Le nuage de points montre une tendance similaire pour les données expérimentales recueillies sur les trois lits du canal, traduisant un comportement hydrodynamique uniforme pour l'ensemble des configurations testées.

Ce chapitre est dédié à l'investigation expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince au sein d'un canal rectangulaire à lit composé et à section variable. Les propriétés fondamentales de cet écoulement ont été quantifiées par voie empirique, en mettant particulièrement l'accent sur l'évolution des hauteurs conjuguées en fonction du débit injecté.

Notre étude expérimentale visait également à analyser l'influence du nombre de Froude (Fr_1) sur les paramètres caractéristiques du ressaut, tels que les hauteurs conjuguées Y .

Conclusion générale

Cette étude est consacrée à l'analyse expérimentale de l'impact d'un seuil sur les différentes propriétés hydrodynamiques d'un ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire de forme composée à largeur variable. Les mesures recueillies visent à quantifier avec précision les modifications induites par cet aménagement sur les caractéristiques intrinsèques du phénomène. Pour ce faire, ce travail est structuré en quatre chapitres distincts :

Le premier chapitre de cette étude est dédié à l'examen critique des travaux antérieurs relatifs à l'hydrodynamique des ressauts hydrauliques en canaux rectangulaires. L'accent est mis initialement sur l'équation fondamentale établie par Bélanger (1828). Issue de l'application du théorème de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut classique, cette relation lie le rapport des profondeurs conjuguées au nombre de Froude incident (Fr_1). Par ailleurs, la détermination de ce paramètre adimensionnel en amont a permis à Bradley et Peterka (1957) de proposer une classification rigoureuse des différentes formes de ressauts. L'approche analytique permet de d'évaluer le rapport des hauteurs conjuguées ($H^* = h_2 / h_1$) via l'application du théorème de la quantité de mouvement et de la célèbre formule de Bélanger (1828). De plus, les formulations empiriques développées au fil des décennies par des chercheurs éminents tels que Bakhmeteff (1932) et Hager (1985) y sont exposées pour évaluer les caractéristiques géométriques du ressaut, notamment sa longueur totale (L_j), la longueur du rouleau de surface (L_r) et le taux de dissipation de l'énergie cinétique ($\Delta E / E_1$). Enfin, ce chapitre examine les investigations historiques relatives au contrôle du positionnement du ressaut et à la réduction des dimensions des bassins d'amortissement par l'insertion d'obstacles mécaniques (seuils minces ou épais, marches positives), mettant en relief les contributions de Forster et Skrinde (1950), Rand (1965) et Breetz (1971) quant à la classification et la stabilité des ressauts forcés.

Élargissant les horizons théoriques au-delà des géométries simples, le deuxième chapitre est dédié à l'étude du ressaut hydraulique dans les canaux de section trapézoïdale. Cette configuration revêt une importance majeure en ingénierie hydraulique et de génie civil en raison de ses avantages économiques et de la stabilité naturelle de ses berges. Ce chapitre démontre comment la modification de la géométrie de la section et de son fruit (m) engendre une altération profonde des caractéristiques hydrodynamiques et du comportement de l'écoulement. En effet, le rouleau de surface classique disparaît au profit de zones d'écoulement inversé sur les parois latérales, qualifiées de zones de retour latéral. De surcroît, l'apparition de rouleaux de fond pour des valeurs élevées du nombre de Froude ($F_1 > 4$) constitue un phénomène hydrodynamique singulier, documenté par les travaux de référence de Hager et Wanoschek (1983). Les études comparatives présentées révèlent également que les sections trapézoïdales

et triangulaires manifestent une capacité de dissipation d'énergie supérieure à celle de la section rectangulaire classique. Ce chapitre se clôt par l'analyse des solutions hydrauliques de contrôle au moyen de marches positives, confirmant l'efficacité des ressauts forcés de Type A sur la base des résultats contemporains de *Debabeche et al. (2013)* pour optimiser les dimensions des ouvrages annexes et réduire la hauteur aval requise pour la stabilisation du ressaut.

Afin de transcrire ce large corpus théorique en une réalité physique tangible, le troisième chapitre est entièrement consacré à la description hydraulique et technique du modèle expérimental et du dispositif de laboratoire exploités dans le cadre de cette étude. Ce chapitre fournit une caractérisation détaillée d'un canal vitré moderne permettant l'observation visuelle directe de l'écoulement. La zone d'étude se distingue par une section rectangulaire composée à niveaux multiples et à largeur variable, offrant une simulation avancée des cours d'eau naturels et des canaux artificiels complexes. Les composants du circuit hydraulique fermé sont rigoureusement décrits, notamment le système d'alimentation par pompes centrifuges couplées en parallèle, garantissant un débit volumique adéquat et stable. Cet écoulement transite par un convergent spécifiquement conçu pour générer l'écoulement supercritique nécessaire à l'amorçage du ressaut hydraulique sous un nombre de Froude (F_1) ciblé. Enfin, l'accent est mis sur l'instrumentation métrologique, comprenant des limnimètres à pointe pour la mesure précise des hauteurs d'eau, un déversoir de mesure rectangulaire à contraction latérale étalonné selon le modèle développé par *Rachedi (2006)* pour la quantification exacte du débit volumique (Q), ainsi que des dispositifs de fixation modulaires conçus pour tester l'influence des seuils minces selon diverses configurations géométriques et positions spatiales au sein du canal composé.

Le quatrième chapitre est dévolu à l'analyse détaillée et à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus. Sur la base des données recueillies, nous avons développé des corrélations empiriques rigoureuses décrivant le comportement du ressaut hydraulique au sein d'un canal rectangulaire à section composée. Ces relations fonctionnelles constituent des outils d'ingénierie essentiels pour le dimensionnement optimal des bassins d'amortissement.

Le résultat obtenu met en évidence la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude incident, $Y=f(Fr_1)$. Les résultats expérimentaux se traduisent par une représentation graphique linéaire $Y=aFr_1 + b$.

Comme perspectives à ce travail, il serait particulièrement intéressant d'élargir le champ d'investigation en explorant d'autres types d'obstacles, tels que les marches positives. De plus, les recherches futures pourraient se focaliser sur l'établissement de nouvelles corrélations empiriques liant d'autres paramètres hydrodynamiques, notamment le taux de dissipation d'énergie, le profil des vitesses au sein du ressaut contrôlé.

Références bibliographiques

- Achour, B., (1997) Dissipation d'énergie par ressaut, thèse d'état, Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil.
- Achour B, Khattaoui M. (2012) Ressaut hydraulique en lit composé. Revue scientifique et technique. LJEE 2012 ; 44-51.
- Ackers P. (1991) Hydraulic design of straight compound channels. SR281, HR Wallingford, Wallingford, UK, 1991.
- Andersen J, V. M., (1978). Undular hydraulic jump, Proc, ASCE, j, Hydraulics Division, Vol. 104, pp. 1185-1188.
- Arghyropoulos, P. A., (1962). General Solution of the Hydraulic Jump in Sloping Channels, Proc. ASCE, J; Hydraulics Division, Vol.88, pp.61-75.
- Belanger, J.B., (1828). Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes, Carilian-Goeury, Paris.
- Bradley, J. N., Peterka, A. J., (1957). The hydraulic design of stilling basins, Hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I), paper 1401; High dams, earth dams, and large canal structures (Basins II), paper 1402; short stilling basins for canal structures, small outlet works, and small spillways (Basin III), paper 1403; stilling basin and wave suppressors for canal structures, outlet works and diversion dams (Basin IV), paper 1404; stilling basin with sloping apron (Basin V), paper 1405; small basins for pipe or open channel outlets no tailwater required (Basin VI), paper 1406, Proceedings, American Society of Civil Engineers, J. hydraulics division, vol. 83, No.HY5.
- 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.
- Bousmar D, Rivière N, Proust S, Paquier A, Morel R, Zech Y. (2005) Upstream discharge distribution in compound-channel flumes. J H Eng 2005, ASCE ; 131(5) : 408-412.
- Bousmar D, Wilkin N, Jacquemart, J H Zech Y. (2004) Overbank flow in symmetrically narrowing flood plains. J H Eng 2004 ; 130(4) :305-312.
- Carrier, M., (1980). Hydraulique Générale et Appliquée 1er édition.
- Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Forster, J. W. and Skrinde, R. A., (1950). Control of Hydraulic jump by sills, Trans. ASCE, 115,973-1022.
- Hachemi Rachedi, L., (2006). Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, mémoire de magistère en science hydrauliques, Département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Riguet, F., Debabeche, M., Ghomri, A., (2019). Experimental study off he sequentdepthration of the hydraulic jump in a straight compond rectangular channel; Journal of Fundamental and Applied Sciences ISSN 1112-9867.
- Hager, W., h., (1987). Der Ablufss im U-Profil. Korrespondenz Abwasser 34(5): 468-482.

- Hager, W.H., Sinniger, R., (1985). Flow characteristics of the Hydraulic jump in Stilling Channel with an abrupt bottom rise, J. Hydraulic Research Vol. 23, 1985, No. 2 pp. 101-113; Vol. 24(3), pp. 207-215.
- Hager, W., Bremen R., H., et Kawogoshi N. (1990). Classical hydraulic jump; length of roller, J. Hydraulic research 28(5), 591-608.
- Hager, W. H., Li, D., (1992). Sill-controlled Energy Dissipator, J. Hydraulic research, vol.30, n°2,165-181.
- Hager, W. H., wanoschek, R., (1987). Hydraulic jump in triangular channel, J. Hydraulic Research, Vol.25, n°5,549-564.
- Rajaratnam, N., (1964). The Forced Hydraulic Jump. Water Power, January, 14-19, February, 61-65.
- Rajaratnam, N., (1964), Discussion to Silvester (1964) Journal of Hydraulic Division, ASCE 90(HY4), 341-350.
- Rajaratnam, N., (1965), Hydraulic Jump in horizontal conduit, Water Power, 17, pp. 80-83.
- Rajaratnam, N., (1967). Hydraulic jumps, Advances in hydro science, 4: 197-280, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York, N.Y.
- Rajaratnam, N., (2002), Hydraulic jump on corrugated beds, J. Hydraulic Engrg., Volume 128, Issue 7,656-663.
- Rajaratnam, N., Subramania, K., (1968, 1969, 1970), Profil of the hydraulic jump, Proc.