

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2020



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع/2020

Mémoire de Master

Filière : Science et technologie

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Thème

Etude expérimentale de profil de surface du ressaut hydraulique en canal non-rectangulaire asymétrique avec un convergent trapézoïdal

Nom et Prénom de l'étudiant :
DJAFRI Sid ali

Encadreur : CHERHABIL Sonia

Co-encadreur : DEBABECHE Bouthaina

Année universitaire : 2019 - 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Sommaire



Sommaire

اهداء

شكر و عرفان

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Principales notations

Introduction générale.....I

Première partie

Etude théorique

Chapitre I : Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

I.	Ressaut hydraulique en canal rectangulaire.....	1
I.1	Introduction	1
I.2	Définition	1
I.3	Ressaut hydraulique classique.....	2
I.3.1	Phénomène.....	2
I.3.2	Typologie du ressaut hydraulique classique.....	3
I.3.3	Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut	4
I.3.4	Caractéristiques géométriques du ressaut.....	6
I.3.4.1	Hauteur du ressaut	6
I.3.4.2	Longueurs caractéristiques du ressaut.....	7
I.3.5	Rendement et les pertes de charge due au ressaut hydraulique.....	10
I.4	Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire.....	13
I.4.1	Introduction.....	13
I.4.2	Approche de Forster et Skinde (1950)	14

I.4.2.1	Seuil continu à paroi mince.....	14
I.4.3	Seuil continu à paroi épaisse	15
I.5	Ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire	17
I.5.1	Approche de <i>Rand</i>	17
I.6	Conclusion	19

Chapitre II : Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal

II.	Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal.....	20
II.1	Introduction	20
II.2	Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique.....	20
II.2.1	Introduction	20
II.2.2	Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal	21
II.2.2.1	Rapport des hauteurs conjuguées	21
□	Cas particulier du canal rectangulaire	23
□	Cas particulier du canal triangulaire.....	23
II.2.2.2	Longueur du ressaut.....	24
II.2.2.3	Rendement.....	26
□	Cas particulier du canal rectangulaire	27
□	Cas du canal triangulaire	27
II.2.3	Conclusion.....	28
II.3	Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique.....	28
II.3.1	Approche d' <i>Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954)</i>	28
II.3.1.1	Analyse de la section totale	30
II.3.1.2	Analyse de bande longitudinale (volume de contrôle).....	30
II.3.1.3	Discussion des résultats	32
II.3.2	Approche d' <i>Hubert Chanson, Kiri Urvisha et Leng Xinqian (2018)</i>	34
II.3.2.1	Propagation positive de ressaut dans un type non rectangulaire (Canal trapézoïdal asymétrique).....	34
II.3.2.2	Installation expérimentale :	35

II.3.3 Conclusion.....	37
------------------------	----

Chapitre III : Profil de la surface de ressaut hydraulique dans quelques canaux

III. Profil de la surface de ressaut hydraulique dans quelques canaux.....	38
III.1 Introduction	38
III.2 Vue théorique sur le profil de surface généralisé dans différents types de canaux.....	38
III.2.1 Profil de surface généralisé dans un canal rectangulaire	38
III.2.2 Profil de surface du ressaut en canal rectangulaire (compacité du ressaut)	39
III.2.2.1 Approche de <i>Debabeche (2003)</i>	39
III.2.3 Profil de surface généralisé du ressaut dans un canal trapézoïdal (Compacité du ressaut).....	40
III.2.4 Profil de surface généralisé du ressaut classique dans un canal triangulaire.....	41
III.2.4.1 Etude de <i>Hager et Wanoschek (1987)</i>	41
III.2.5 Profil de surface généralisé du ressaut en canal profil en “U”	42
III.2.5.1 Etude de <i>Debabeche et Achour (2000)</i>	42
III.3 Conclusion	43
Conclusion de la première partie.....	IV

Deuxième partie

Etude expérimentale

Chapitre I : Description du processus expérimental

I. Description du processus expérimental	44
I.1 Introduction	44
I.2 Description du dispositif	44
I.3 Appareillage des mesures	50
I.3.1 Mesure des débits.....	50
I.3.1.1 Méthodologie de mesure de débit.....	51
I.3.2 Mesure des hauteurs de la surface libre	53

I.3.2.1	Limnimètre.....	54
I.4	Conclusion.....	55

Chapitre II : Etude expérimentale

II.	Etude expérimentale	56
II.1	Introduction	56
II.2	Procédure expérimentale	56
II.3	Exploitation et analysassions des résultats expérimentaux	56
II.3.1	Variation de la hauteur h_1 en fonction du débit pour toute la gamme	57
II.3.2	Variation de la hauteur h_2 en fonction du débit pour toute la gamme	57
II.3.3	Variation du profil de surface du ressaut hydraulique $f= h(x)$ pour toutes les ouvertures	58
II.3.3.1	Ouverture n°01 « 8 cm »	58
II.3.3.2	Ouverture n°02 « 8.5 cm »	60
II.3.3.3	Ouverture n°03 « 9 cm »	63
II.3.3.4	Ouverture n° 04 « 9.5 cm »	65
II.3.3.5	Ouverture n°05 « 10 cm »	68
II.3.3.6	Ouverture n°06 « 10.5 cm »	70
II.4	Conclusion	73
	Conclusion de la deuxième partie.....	VI
	Conclusion générale.....	VII
	Référence bibliographie	

إهداء

أحمد الله عز وجل على منه و عونه لإتمام هذا العمل.

إلى الذي وهبني كل ما يملك حتى أحقق له آماله، إلى من كان يدعيني قدما نحو الأمام لنيل
المبتغى إلى الإنسان الذي امتلك الإنسانية بكل قوة، إلى الذي سهر على تعليمي بتضحياته جسام
مترجما في تقديسه للعلم، إلى مدرستي الأولى في الحياة،
أبي الغالي على قلبي أطال الله في عمره؛

إلى رمز الوفاء وفيض السناء ووجود العطاء عند البلاء إلى من قال فيمن الرسول صلى الله عليه
وسلم الجنة تحت أقدام الأمهات؛ إلى التي سهرت الليالي من أجل راحتني وأضاءت لي الدروب بالشموع؛

إلى أول اسم تلفظت به شفاهي

أمي ثم أمي أطال الله في عمرها

إليهما أهدي هذا العمل المتواضع لك يي أدخل على قلبهما شيئا من السعادة؛

إلى جدي وجدتي رحمهما الله؛

إلى إخوتي وأخواتي الذين تقاسموا معي حبه الحياة؛

إلى الصغيرين أنفال ورائد طه الأمين

إلى أعمز الأصدقاء والزلاء في الطور الجامعي؛

إلى الأستاذة المشرفة الدكتورة هرحويل صونيا؛

إلى كل أساتذة قسم الهندسة المدنية والري؛

إلى كل من ساهم في انجاز هذا العمل من قريب أو بعيد ولو بكلمة طيبة؛

إلى كل من كان لهم أثر على حياتي، و إلى كل من أحبهم قلبي و نسيهم قلبي؛

إلى كل هؤلاء أهدي هذا العمل

الطالب: جعفري سيدعلي

شكر وعرفان

قال رسول الله صلى الله عليه وسلم: "من لم يشكر الناس لم يشكر الله"

صدق رسول الله صلى الله عليه وسلم

الحمد لله على إحسانه و الشكر له على توفيقه و امتنانه و نشهد أن لا إله إلا الله وحده لا شريك له تعظيما لشأنه و نشهد أن سيدنا و نبينا محمد عبده و رسوله الداعي إلى رضوانه

صلى الله عليه و على آله و أصحابه و أتباعه و سلم

بعد شكر الله سبحانه و تعالى على توفيقه لنا لإتمام هذا البحث المتواضع

أتقدم بجزيل الشكر إلى الوالدين العزيزين الذين أمانوني و شجعوني على الاستمرار في

مسيرة العلم والنجاح، وإكمال الدراسة الجامعية والبحث؛

كما أتقدم بالشكر والتقدير والعرفان إلى أستاذتي القديرة المحترمة "شرحيل صونيا" والتي كان لها الفضل والدور الأكبر لتعاونها وحرصها في أن تخرج هذه الرسالة إلى حيز الوجود وبالصورة التي هي عليها الآن، وفي سبيل ذلك لم تبخل علي بالمعلومة والتوجيه وتقديم الملاحظات والنصح الإرشادي إلى المراجع القيمة التي أفادتني في موضوع بحثي، وأشكرها أيضا على تواضعها سعة صدرها؛

كما أشكر الأستاذة المساعدة "دوايش بثينة" التي لم تحذر جهدا في سبيل إنجاح هذا

العمل ولو قوفها معنا طوال انهاء العمل وأشكرها أيضا لطيبتها وكرمها وسعة صدرها.

أتقدم بالشكر والتقدير إلى جميع الأساتذة من قسم الهندسة المدنية والري بجامعة محمد خيضر، كما أوصل شكري إلى الأساتذة أعضاء لجنة المناقشة الذين تفضلوا بقراءة المذكرة.

كما لا يفوتني ان أشكر كل من صديقي "خليل وعبد القادر" لجهودهما ومساهمتهما في هذا العمل؛

كما أتوجه بخالص شكري وتقديري إلى كل من ساعدني من قريب أو من بعيد على إنجاز

وإتمام هذا العمل.

الطالب: جعفري سبط علي

Résumé

Résumé :

Ce présent mémoire a pour l'objectif d'étudier, d'un point de vue expérimental le profil de surface généralisé d'un ressaut hydraulique en canal non rectangulaire (trapézoïdale asymétrique).

L'objectif principal est de trouver des relations fonctionnelles, pour dimensionné le profil de surface de cette canal.

Cette étude a été divisée en deux parties : la première partie (bibliographique), concerne les recherches liées aux travaux effectués dans ce domaine par les chercheurs ; la deuxième partie, concerne les expériences qui nous permettent de trouver de nouvelles relations expérimentales.

Mots clés : Ressaut hydraulique, Profil de surface, Canal non rectangulaire (Trapézoïdale asymétrique), Bassin de dissipation.

Abstract:

This « memoir » aims to study from an experimental point of view the hydraulic jump in non-rectangular channel (symmetric trapezoidal).

The main objective is the determination of practical functional public relation for dimensional of surface profile of this channel.

This study consists of two main parts: the first part is bibliographical through which we reviewed the current works achieved in this field by researchers; the second part relates to experiments that allow us to find new experimental relationships.

Keywords: Hydraulic jump, Surface profile, Non-rectangular channel (Symmetric trapezoidal), stilling basin.

ملخص:

هذه المذكرة تهدف إلى الدراسة التجريبية لمقطع المساحة للقنطرة الهيدروليكية في القناة غير المستوية (شبه منحرفة الشكل متناظرة).

الهدف الأساسي هو إيجاد علاقات عامة لتحديد أبعاد المقطع لهذه القناة.

جزئت هذه الدراسة إلى قسمين: القسم الأول يختص بالأبحاث المتعلقة بالأعمال المنجزة في هذا المجال من طرف باحثين؛ أما القسم الثاني فيتعلق بالتجارب التي تسمح لنا بإيجاد علاقات تجريبية جديدة

الكلمات المفتاحية: القنطرة الهيدروليكية، مقطع المساحة، القناة غير المستوية (شبه المنحرفة غير متناظرة)، حوض التبريد.

Liste des figure

LISTE DES FIGURES

Première partie :

Chapitre I :

Figure (1.1) : a) Ressauts naturels dans le Verdon (Alpes-de- Haute-provence,France, b) Schéma descriptive du ressaut Hydraulique.....	2
Figure (1.2) : Classification des ressauts hydrauliques en fonction du nombre de Froude (<i>Chow,1959</i>)	3
Figure (1.3) : Ressaut hydraulique classique.....	4
Figure (1.4) : Représentation graphique de l'équation de <i>Bélanger (1829)</i> dans un canal horizontal.....	6
Figure (1.5) : Hauteur du ressaut hydraulique.....	7
Figure (1.6) : Longueur relative $\frac{L_j}{h_2}$ en fonction de nombre de Froude F_1	9
Figure (1.7) : Ressaut hydraulique avec à rouleau a) Développé, b) Non développé.....	10
Figure (1.8) : (----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique.....	11
Figure (1.9) : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 (—) Courbe tracée selon la relation (1.26), (----) courbe tracée Selon la relation (1.27).....	13
Figure (1.10) : Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.....	14
Figure (1.11) : Variation expérimentale de la hauteur relative $\frac{s}{h_1}$ du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative x/h_2 du seuil (Forster et Skrinde,1950).....	15
Figure (1.12) : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.....	16
Figure (1.13) : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon <i>Forster et Skrinde (1950)</i> . Courbe tracé selon la relation la relation (1.31).....	16
Figure (1.14) : Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes selon <i>Rand (1957)</i> : 0) Ressaut classique avec hauteurs conjuguées h_1 et h_2 ; 1) class 1, longueur L_{smin} . ; 2) class 2, longueur	

intermédiaire L_s ; 3) class 3, longueur $L_{s_{\max}}$; s : hauteur du seuil, s_c : hauteur critique du seuil et s_{\max} : hauteur maximale du seuil.....17

Figure (1.15) : Hauteurs conjuguées $\frac{h_1}{h_2} = f(s, k)$ pour $F_1 = 9$. Valeurs et courbes expérimentales : (---) limite d'influence de l'aval sur l'amont.....19

Chapitre II :

Figure (2.1) : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M . $0 < M < \infty$: profil trapézoïdal ; $M=0$: profil rectangulaire ; $M \rightarrow \infty$: profil triangulaire.....24

Figure (2.2) : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdal.....25

Figure (2.3) : Variation du rendement η du ressaut en canal trapézoïdal en fonction du nombre de Froude F_1 pour différentes valeurs de M_1 (Equation (2.21)).....28

Figure (2.4) : Section transversale du canal.....28

Figure (2.5) : Section de la bande longitudinale.....31

Figure (2.6) : Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté peu profond.....32

Figure (2.7) : Diagramme adimensionnel du taux de changement de M sur le côté peu profond.....32

Figure (2.8) : Schéma général d'écoulement.....33

Figure (2.9) : Modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la propagation positive du ressaut dans un canal composé prismatique ($\frac{d_1}{D} < 1$).....35

Figure (2.10) : Modèle de la section transversale du canal - A gauche : en regardant vers l'amont.....36

Figure (2.11) : Photographie de l'installation expérimentale en aval.....36

Chapitre III :

Figure (3.1) : Profil de la surface ressaut hydraulique plan.....39

Figure (3.2) : Variations expérimentales du profil de surface ($y=f(X)$) du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite rectangulaire, pour trois rapports intermédiaires de compacité. (—) courbes d'ajustements. (---) courbe selon l'équation $y=\text{Tan}_h(1,5X)$39

Figure (3.3) : Variations expérimentales du profil de surface [$y = f(X)$] du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite trapézoïdal, pour cinq rapports de compacité. (—) courbes d'ajustements.....40

Figure (3.4) : Profil de surface généralisé $Y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ($m = 1$), selon *HAGER et WANOSCHEK (1987)*.....41

Figure (3.5) : Profil de surface du ressaut.....	42
Figure (3.6) : Profil de surface généralisé du ressaut contrôlé dans un canal profilé en “U”, pour différentes hauteurs initiales h_1 : (\diamond) 2, (Δ) 2.32, (x) 3.3, (o) 5, () 6. (\square) courbe selon l’équation (3.5).	43

Deuxième partie :

Chapitre I :

Figure (1.1): Photographie du modèle expérimental du canal non rectangulaire.....	44
Figure (1.2): Schématisation 3D du modèle expérimental du canal non rectangulaire.....	45
Figure (1.3): Photographie du fond du canal non rectangulaire.....	45
Figure (1.4): Schématisation 3D du fond du canal non rectangulaire.....	46
Figure (1.5): Photographie du bassin d’alimentation.....	46
Figure (1.6) : Schématisation 3D du bassin d’alimentation.....	47
Figure (1.7): Photographie de pompe centrifuge axiale.....	47
Figure (1.8): Schématisation 3D de pompe centrifuge axiale.....	48
Figure (1.9): Photographie du convergent.....	48
Figure (1.10): Schématisation 3D du convergent.....	48
Figure (1.11): Photographie de la vanne levante.....	49
Figure (1.12): Schématisation 3D de la vanne levante.....	49
Figure (1.13): Photographie des deux vannes.....	49
Figure (1.14): Schématisation 3D des deux vannes.....	50
Figure (1.15): Débitmètre à diaphragme.....	51
Figure (1.16): Courbe expérimentale de la relation en $Q(m_3/s)$ fonction de $\Delta h (m)$.....	52
Figure (1.17): Photographie du limnimètre à vernier.....	53
Figure (1.18): Schématisation 3D de l’instrument « limnimètre ».....	53
Figure (1.19): Positions du limnimètre sur le canal non rectangulaire.....	55

Chapitre II :

Figure (2.1): Hauteur des ouvertures sur le canal non-rectangulaire.....	56
Figure (2.2): Variation de la hauteur h_1 en fonction du débit pour toute la gamme.....	57
Figure (2.3): Variation de la hauteur h_2 en fonction du débit pour toute la gamme.....	58
Figure (2.4): Ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire (ouverture 8 cm).....	58
Figure (2.5): Variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f= h(x)$ pour une ouverture de 8 cm	59

Figure (2.6): Ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire (ouverture 8.5 cm).....	61
Figure (2.7): Variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f= h(x)$ pour une ouverture de 8.5 cm.....	61
Figure (2.8): Ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire (ouverture 9 cm).....	63
Figure (2.9): Variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f= h(x)$ pour une ouverture de 9 cm.....	64
Figure (2.10): Ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire (ouverture 9.5 cm).....	66
Figure (2.11): Variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f= h(x)$ pour une ouverture de 9.5 cm.....	66
Figure (2.12): Ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire (ouverture 10 cm).....	69
Figure (2.13): Variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f= h(x)$ pour une ouverture de 10 cm.....	69
Figure (2.14): Ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire (ouverture 10.5 cm).....	71
Figure (2.15): Variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f= h(x)$ pour une ouverture de 10.5 cm.....	71

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (1.1): Valeurs des mesures du débit par l'étalonnage.	51
Tableau (2.1) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.5).....	60
Tableau (2.2) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.7).	62
Tableau (2.3): Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.9).	65
Tableau (2.4): Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.11).	67
Tableau (2.5): Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.13).	70
Tableau (2.6): Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.15).	72

Notations principales

1409910112 huywetheric2

PRINCIPALES NOTATIONS:

A_1 :	L'aire de la section mouillée initiale	$[m^2]$
A_2 :	L'aire de la section mouillée finale	$[m^2]$
B :	La grande base du canal trapézoïdal	$[m]$
b :	La petite base du canal trapézoïdal	$[m]$
D :	Diamètre	$[m]$
ε :	Rugosité absolue des parois du canal	$[mm]$
F_1 et F	Nombre de Froude à l'amont du ressaut	$[-]$
g :	Accélération de la pesanteur	$\frac{m}{s^2}$
G :	Poids de la tranche liquide	$[N]$
h :	Hauteur du ressaut	$[m]$
h_1 :	Hauteur initiale du ressaut	$[m]$
h_2 :	Hauteur finale du ressaut	$[m]$
\bar{h} :	Distance entre le centre de gravité de la section transversale et la surface libre de l'écoulement	$[m]$
\bar{h}_1 :	Position du centre de gravité de section A_1	$[m]$
\bar{h}_2 :	Position du centre de gravité de section A_2	$[m]$
h^* :	Hauteur du ressaut classique	$[m]$
h^*_1 :	Hauteur initiale du ressaut classique	$[m]$
h^*_2 :	Hauteur finale du ressaut classique	$[m]$
H :	La charge totale	$[m]$
h_{cr} :	Le profondeur critique	$[m]$

Δh_{12} :	Perte de charge due au ressaut entre 1 et 2	[m]
h_b :	Hauteur maximal du rouleau de fond	[m]
K :	Coefficient de correction du volume du ressaut	[-]
L_r :	Longueur du rouleau	[m]
L_j :	Longueur du ressaut	[m]
L_r^* :	Longueur du rouleau classique rectangulaire	[m]
L_j^* :	Longueur du ressaut classique rectangulaire	[m]
L_u :	La distance du pied du ressaut au début de rouleau de fond	[m]
L_b :	Longueur du rouleau de fond	[m]
L_s :	Position du seuil par rapport au début du ressaut	[m]
m :	Cotangente de l'angle d'inclinaison d'un talus	[-]
M :	La hauteur relative initiale du ressaut $M = (mh_1)/b$	[-]
P_1 :	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	[N]
P_2 :	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	[N]
ρ :	Masse volumique du liquide	$\frac{kg}{m^3}$
Q :	Débit volume	$\frac{m^3}{s}$
q :	Débit unitaire	$\frac{m^3}{s}$
s :	Hauteur du seuil ou de la marche positive	[m]
S :	Hauteur relative du seuil	[-]
V :	Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiales et finale	[m ³]
V_1 :	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	$\frac{m}{s}$
V_2 :	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	$\frac{m}{s}$

w:	Rapport d'aspect : $w = h_1/b$	[—]
x:	Position de seuil ou de la marche	[m]
X:	Position relative de seuil ou de la marche	[—]
Y:	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	[—]
Y*:	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[—]
λ_r:	Longueur relative du retour latéral du courant	[—]
λ_j:	La longueur relative du ressaut	[—]
λ_b:	Longueur relative du rouleau de fond	[—]
x_0:	Largeur de la section transversale	[m]
y_0:	Différence entre la profondeur de l'eau dans le fond et les côtés peu profonds	[m]
Y:	Profondeur de l'eau dans le côté peu profond	[m]
Y_{are}:	Profondeur moyenne	[m]
X_s:	Longueur du retour latéral sur le côté peu profond du canal	[m]
X_d:	Longueur de retour latéral sur le côté profond du canal	[m]
G:	Rapport de la force de pression et de l'écoulement amont et aval	[—]
α:	Angle d'inclinaison du canal	[—]
η:	Rendement du ressaut	[—]
θ:	Angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal	[rd]

Introduction générale

Introduction générale :

Les ouvrages de retenue, tels que les barrages hydrauliques, sont souvent soumis à de fortes crues. Dans les périodes de crues, la retenue étant pleine, l'eau est restituée à travers un évacuateur de crue vers la rivière. Le lit de la rivière se trouve alors confronté à un écoulement torrentiel à forte énergie cinétique. Celle-ci engendre des forces tractrices néfastes par leur caractère érosif. Afin d'éviter d'importantes modifications du lit de la rivière située à l'aval du barrage, il serait nécessaire de dissiper cette énergie. Le moyen le moins onéreux et le plus pratique est certainement le ressaut hydraulique (*Debabeche, Ghomri et Kateb, 2017-2018*). Le principe consiste à transformer l'écoulement torrentiel en un écoulement fluvial engendrant une diminution des forces tractrices, cette transformation est réalisée dans les bassins de dissipation (*Siad, 2018*).

Le ressaut est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente nulle ou faible, sans obstacle à l'aval (*Bremen et al, 1990*). Il est dit contrôlé lorsque sa formation est conditionnée par la mise en place d'un obstacle (*Hager et Bretz, 1988*). Il est dit forcé lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle (*Rand, 1957*).

Du point de vue pratique, ce sont surtout les dimensions géométriques du bassin de dissipation qui intéressent l'ingénieur hydraulicien. Ces dimensions sont étroitement liées aux caractéristiques du ressaut et à la forme géométrique du canal dans lequel il évolue (*Debabech et al., 2006*).

L'étude des paramètres hydrauliques du ressaut, tels que, le rapport des profondeurs conjuguées, la perte d'énergie ainsi que la longueur du ressaut, a attiré l'attention de divers chercheurs (*Bakki & Medakene, 2018*).

Leonard de Vinci (1452-1519) fut le premier à étudier le phénomène hydraulique du ressaut. Plus tard, d'autres chercheurs ont également essayé d'expliquer ce phénomène (*Hadj Azzem, 2016*).

Après 300 années (*1818*), l'italien **Bidone (1781-1839)** a donné la mesure et la description du phénomène du ressaut hydraulique sous base des études expérimentales (*Mahamdioua, 2016*). Plus tard, **Bélangier (1928)** présente une expression mathématique quand au rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique pour cela, il a appliqué le principe de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de lit horizontal (*BenMalek, 2012*). Plus tard, **Bakhmeteff et Matzake (1936)** ont effectué des expériences sur les pentes très faibles et ont proposé les dimensions du profil de surface extérieur (*Ancer, 2018*). En 1938 **Posey et Hsing** ont étudié le ressaut hydraulique dans

un canal trapézoïdal. Dans le même ordre, **Moore (1957)** a étudié la formation du ressaut à la base des chutes d'eau (**Mahamdioua, 2016**).

Le ressaut est dit contrôlé, lorsqu'il se forme entièrement à l'amont de l'obstacle ou au seuil. Il est dit forcé, lorsqu'il se forme de part et d'autre de ce dernier. (**Rand, 1957**).

L'obstacle a pour rôle de provoquer la formation du ressaut et de contrôler sa position surtout lors de changement de débit (**Siad, 2018**).

Ces dernières années le ressaut hydraulique a fait l'objet de plusieurs recherches fondamentales et appliquées (**Mahamdioua, 2016**). La bibliographie montre que la modification des conditions à l'amont (débit, hauteurs, ..., etc.) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur, la pente du canal, la rugosité du fond, ..., etc.) peut conduire à différentes configurations du ressaut (**Khebli, 2019**).

Dans les dernières années le ressaut hydraulique a fait l'objet de plusieurs recherches expérimentales et numériques dans différents profils géométriques. Dans le domaine de l'expérimentation nous pouvons citer les travaux de, **Hager et Bretz (1987)**, **Hager (1992)**, **Ead et Rajaratnam (2002)**, **Chanson (2009)**, qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal. **Hager et Wanoschek (1987)**, **Achour et Debabeche (2003)** et **Debabeche et Achour (2007)**, qui ont examinés le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire horizontal. **Debabeche et al. (2009)**, ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire en pente (**Carvalho, Debabeche et Hafnaoui, 2018**).

Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier le profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire avec convergent trapézoïdal.

Notre présent mémoire comporte deux grandes parties :

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

Le premier chapitre aborde les principaux travaux entretenus dans un canal rectangulaire à savoir ; classique, contrôlé et forcé. A travers ce chapitre nous allons passerons en revue la classification de **Bradley et Peterka (1957)**, les études de **Hager et Sinniger (1986-1989)** ; **Hager et Bremen (1989)** et **Hager et al (1990)**, sur les différentes caractéristiques du ressaut classique. Ensuite, les travaux de **Forster et Skrinde (1950)** et de **Achour, Debabeche et Sedira, (2002)** sur le ressaut contrôlé par seuil (**Siad, 2018**), et les travaux du **Rand (1957)** concernant le ressaut hydraulique forcé par seuil.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'analyse théorique et expérimentale par (**Silvester,1964**) et (**Wanoschek et Hager,1989**) (**Ancer, 2018**), sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal

asymétrique, ainsi que l'approche présentée par (*Alberto José et Rodriguez-Diaz,1954*) et (*Hubert Chanson,2017-2018*) sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de profil de la surface du ressaut hydraulique évoluant dans différents canaux. Nous exposerons les travaux effectués sur le profil de surface dans différents canaux, à savoir, ceux de (*Debabeche, 2003*) ; (*Debabeche et Achour, 2000*) ; (*Hager et Wanosch, 1987*) ; et (*Zaid, 2015*).

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

Première partie

Etude théorique

Chapitre I :

Ressaut hydraulique en canal
rectangulaire

I. Ressaut hydraulique en canal rectangulaire :

I.1 Introduction :

En revenant sur l'histoire des études du ressaut hydraulique, nous constatons que les recherches préliminaires effectuées dans ce domaine, sont basées sur le modèle du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire. De ce fait le ressaut classique a donné le point de départ pour les chercheurs hydrauliciens. En écoulement brusquement varié, la transition, d'un régime torrentiel en régime fluvial, est assurée par le ressaut, en dissipant une grande quantité d'énergie hydraulique. L'écoulement en amont du ressaut est caractérisé par un nombre adimensionnel, c'est le nombre de Froude F_1 , qui est donné par : $F = \frac{v}{\sqrt{gh}}$ (pour un canal de section droite rectangulaire).

La variation de ce dernier autour de l'unité provoque différents régimes : si $F_1 \leq 1$, le régime est lent (fluvial) ou critique, au-delà de cette valeur, apparaissent différents types du ressaut hydraulique ; nous les citerons donc à travers ce chapitre, selon la classification de (**Bradley et Peterka, 1957**) D'après les études faites dans ce domaine, on s'accorde à dire que, le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation liant le rapport $Y = \frac{h_2}{h_1}$ des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 .

Pour une section droite rectangulaire, l'équation de **Bélangier (1828)** a fait l'exemple d'application du Y proposée par (**Hager et Sinniger, 1985**). Le ressaut est caractérisé par la longueur L_r^* de son rouleau ainsi que par la longueur L_j^* sur laquelle il s'étend. Ces caractéristiques n'ont pu être évaluées que par la voie de l'expérimentation. Les travaux présentés par **Hager et al (1990)** font l'objet de notre étude bibliographique, concernant La capacité du ressaut pour dissiper une telle énergie est caractérisée par son rendement η , qui est le rapport entre la différence des charges totales initiales et finales Δh_{12} , et la charge totale dans la section initiale du ressaut h_1 . Nous passerons en revue les travaux de (**Hager et Sinniger, 1986**), concernant leur relation, qui permet le calcul explicite du rendement η .

A la fin de ce chapitre nous aborderons le ressaut hydraulique contrôlé et forcé par seuil dans un canal rectangulaire. Les travaux les plus récents effectués dans ce domaine, sont ceux de **Forster et Skrinde (1950)**, et ceux de **Rand (1957)** et **Bretz (1988)**. Nous représenterons la relation reliant le rapport des hauteurs conjuguées Y , le nombre de **Froude** F_1 et la hauteur relative S du seuil. Nous aborderons aussi leurs approches sur l'écoulement franchissant un seuil continu à paroi mince et le seuil contenu à paroi épaisse, (**BenMalek,2012**).

I.2 Définition :

Pour un écoulement à surface libre, le changement de régime de l'écoulement intervient dans le dissipateur : à son entrée, le régime est torrentiel, à sa sortie il est fluvial : cette transition s'appelle **un ressaut hydraulique (Bretz, 1988)**. Un ressaut est une variation rapide du niveau d'eau lors du passage d'un écoulement super-critique à sous-critique. (Ancey, 2018). Il est accompagné d'une agitation marquée et de grandes pertes d'énergie (Lencastre, 1996). (Figure 1.1).

L'écoulement en amont du ressaut est caractérisé par un nombre adimensionnel, c'est le nombre de Froude F_1 qui est donné par : $F = v/\sqrt{g * h}$ (1. 1) (Moummi & Nagoudi, 2018).

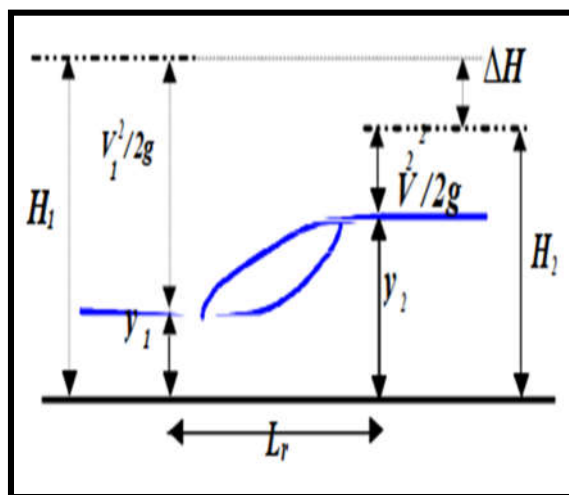
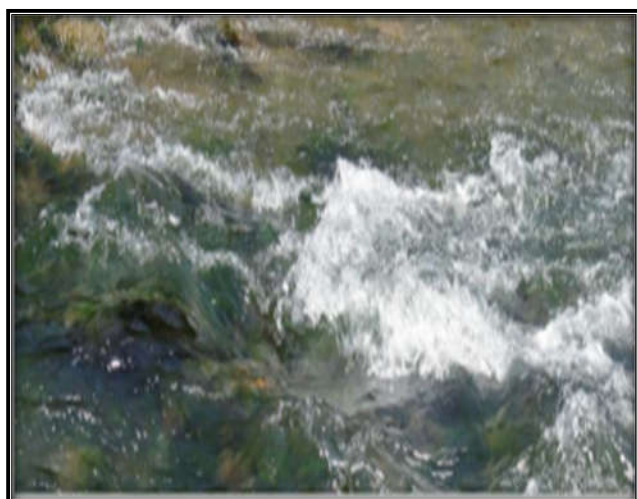


Figure (1.1) : a) Ressauts naturels dans le Verdon
(Alpes-de-Haute-Provence, France), (Richard, 2013).

b) Schéma descriptive du ressaut
Hydraulique (Degoutte, 2004).

I.3 Ressaut hydraulique classique :

I.3.1 Phénomène :

Dans un canal ou un cours d'eau, la transition d'un écoulement torrentiel à un écoulement fluvial est un phénomène appelé ressaut hydraulique. La transition est souvent brutale et turbulente avec généralement inclusion dans l'eau de multiples bulles d'air donnant au ressaut un aspect bouillonnant. Juste après le début du ressaut, l'eau est entraînée, surtout dans la partie supérieure de l'écoulement, dans une région tourbillonnaire de recirculation assez instable, en haut de laquelle au moins, le fluide a tendance à revenir vers l'amont.

Cette région est appelé un rouleau. La position du ressaut n'est pas stationnaire mais oscillante de même que le profil de profondeur, traversé de perturbations plus ou moins périodiques. Quand la profondeur moyenne du ressaut augmente de façon monotone, le ressaut est dit direct. Dans d'autres cas, au contraire, le phénomène est très peu turbulent, sans bulles d'air ni rouleau et la profondeur

ondule sur une distance assez grande vers l'aval. Un tel ressaut, est dit ondulaire. Il ne sera pas question dans ce travail du ressaut ondulaire. Les ressauts apparaissent fréquemment dans la nature, par exemple dans les torrents de montagne. Dans un évier ou un lavabo, on observe la formation d'un ressaut circulaire. On peut aussi recréer des ressauts hydrauliques en laboratoire. Le ressaut hydraulique dit classique se forme dans un canal horizontal, de section rectangulaire et dont le fond est lisse. Les travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique sont nombreux et le présent sous chapitre se propose de passer en revue les principaux d'entre eux (*Richard, 2013*).

I.3.2 Typologie du ressaut hydraulique classique (*Sellam, 2013-2014*), (*Berchet, 2014*) :

Les différents types de ressaut dépendent du nombre de Froude en amont du ressaut F_1 :

- $F_1 = 1$: régime critique **sans ressaut**.
- $1.0 < F_1 < 1.7$: **ressaut ondulé**, pour lequel la différence de hauteur de part et d'autre du ressaut est faible et la surface est ondulée et lisse.
- $1.7 < F_1 < 2.5$: **ressaut faible**, des petits rouleaux apparaissent mais la surface de l'eau reste lisse à l'aval.
- $2.5 < F_1 < 4.5$: **ressaut oscillant**, le jet oscille tantôt vers le fond, tantôt vers la surface du canal. A chaque oscillation naît une onde partant vers l'aval.
- $4.5 < F_1 < 9.0$: **ressaut stable ou stationnaire**, pour lequel les rouleaux s'intensifient et s'agrandissent tandis que l'écoulement en profondeur est à nouveau stable.
- $F_1 > 9.0$: **ressaut raide ou fort**. Le jet rapide est perturbé par la retombée des rouleaux et induit des ondes importantes vers l'aval.

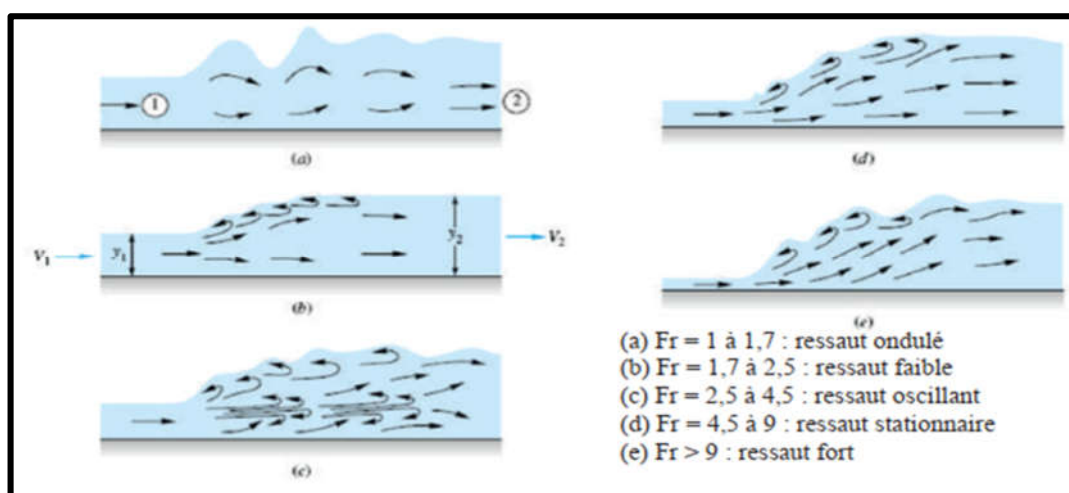


Figure (1.2) : Classification des ressauts hydrauliques en fonction du nombre de Froude (*Chow, 1959*), (*Ancey, 2018*).

I.3.3 Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut (Débabeche, 2003) :

La figure (1.3) montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiale et finale 1 et 2.

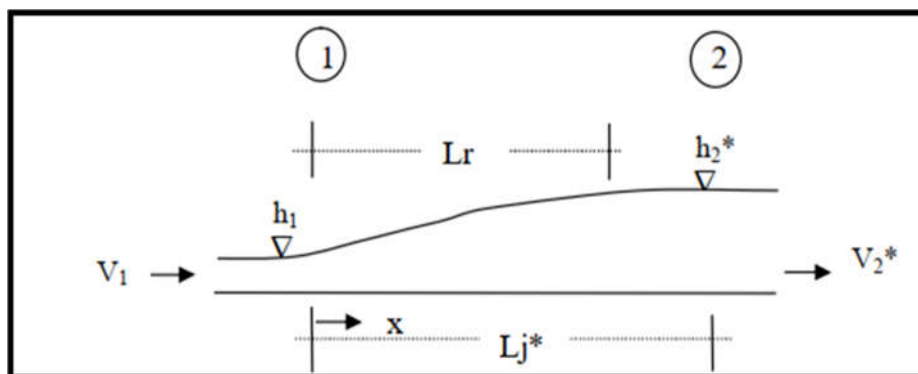


Figure (1.3) : Ressaut hydraulique classique.

Où :

L_r^* : longueur de rouleau.

L_j^* : longueur de ressaut classique.

L'écoulement à l'amont du ressaut (à l'origine) est caractérisé par une profondeur h_1 et une vitesse moyenne V_1 .

L'équation de continuité permet d'écrire :

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} \quad (1.2)$$

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

b : est la largeur du canal rectangulaire.

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

L'application de cette loi a nécessité quatre hypothèses simplificatrices :

1. la répartition des pressions dans la section finale et initiale est hydrostatique ;
2. la distribution des vitesses y est uniforme ;

3. la perte de charge par frottement est négligeable ;

4. la résistance de l'air est négligeable.

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

$$\frac{\gamma b h_1^2}{2} + \rho Q V_1 = \frac{\gamma b h_2^2}{2} + \rho Q V_2 \quad (1.3)$$

h_2^* : hauteur final de ressaut classique.

V_2^* : vitesse d'écoulement de ressaut classique.

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

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{(g \cdot b^2 \cdot h_1^3)} \quad (1.4)$$

On a (*Bakki & Medakene, 2018*):

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{\frac{h_2}{2} F_1^2 (b \cdot h_1^2) + (h_1^2 \cdot b)}{2} = \frac{F_1^2 (b \cdot Y^2 \cdot h_1^2)}{Y^3 + (b \cdot Y^2 \cdot h_1^2)}$$

et on a:

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

cette équation est devient :

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

$$2F_1^2 = (Y+1)Y$$

alors :

$$8F_1^2 + 1 = 4Y^2 + 4Y + 1$$

donc :

$$8F_1^2 + 1 = (2Y + 1)^2$$

La relation (1.3) conduit :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} [\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1] \quad (1.5)$$

La relation (1.5) est connue sous le nom d'équation de Bélanger et permet d'évaluer le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 .

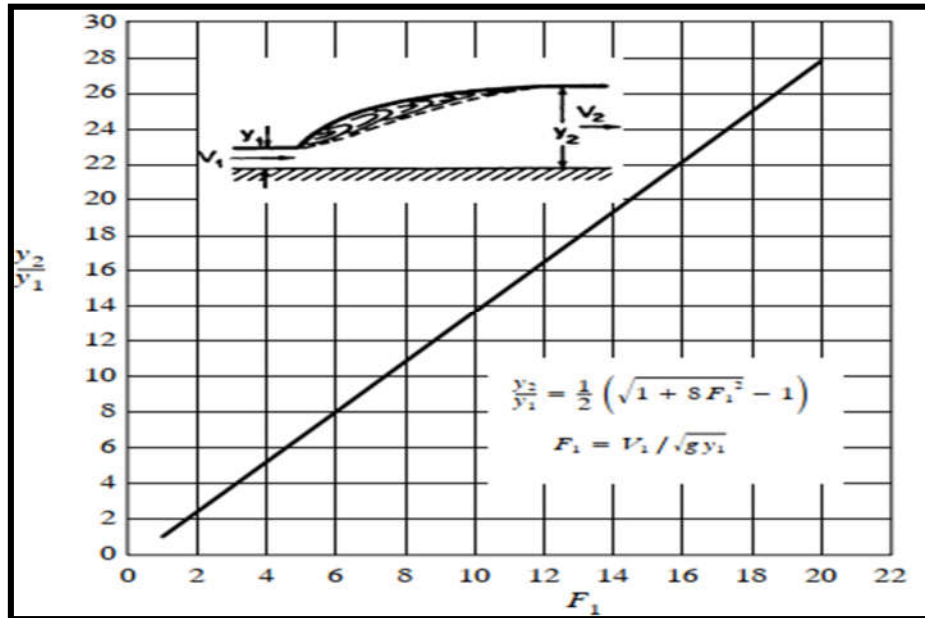


Figure (1.4) : Représentation graphique de l'équation de Bélanger (1928) dans un canal rectangulaire horizontal (Lagacé, 2011).

HAGER et *SINNIGER* (1985) proposent une relation approchée applicable pour les nombres de Froude $F_1 > 2$:

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} F_1 - \frac{1}{2} \quad (1.6)$$

I.3.4 Caractéristiques géométriques du ressaut :

Comme nous le montrerons plus loin le ressaut en canal rectangulaire de pente nulle et de frottement négligeables se présente dans la Figure (1.1_a). Les caractéristiques géométriques du ressaut sont définies ci h , L_r et L_j . (Carlier, 1980).

I.3.4.1 Hauteur du ressaut (Kourim, 2019) :

La hauteur du ressaut est donnée par :

$$h = h_2 - h_1 \quad (1.7)$$

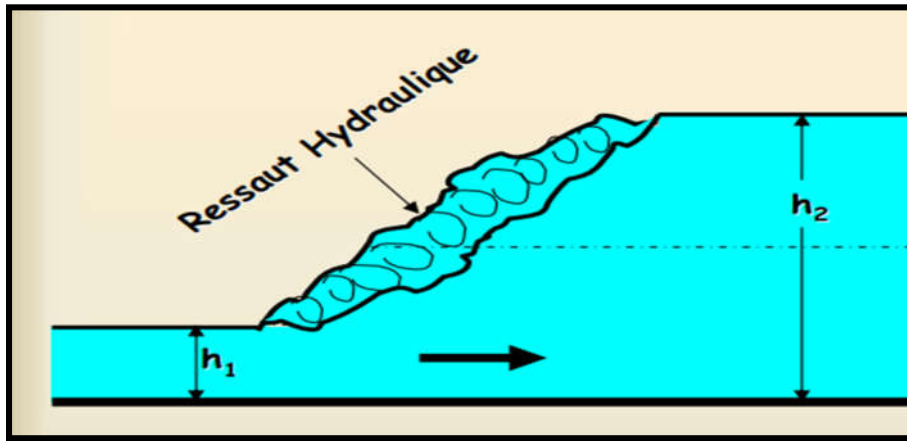


Figure (1.5) : Hauteur du ressaut hydraulique (Sellam, 2013-2014).

I.3.4.2 Longueurs caractéristiques du ressaut :

La longueur du ressaut dite L est la distance entre les deux hauteurs conjuguées h_1 et h_2 , de toute évidence, si le début d'un ressaut est relativement facile à identifier, la fin d'un ressaut est très difficile à définir.

Le ressaut hydraulique est caractérisé par la longueur L_r de son rouleau ainsi que par la longueur L_j sur laquelle il s'étend. Ces caractéristiques n'ont pu être évaluées que par la voie de l'expérimentation (Meziani, 2018).

I.3.4.2.1 Longueur du ressaut hydraulique (BenMalek, 2012), (Hager & Sinniger, 1989), (Khebli, 2019) et (Meziani, 2018) :

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

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

Toutes ces définitions ont pour but d'indiquer la limite aval du ressaut au-delà de laquelle la protection ou le renforcement du bassin amortisseur n'est plus nécessaire ; en effet, cette limite définit

la zone ou l'écoulement est franchement fluvial caractérisé par de faibles vitesses et des forces tractrices sans conséquences. Dans la pratique, on s'accorde à dire que la longueur L_j correspondant à la distance du bassin amortisseur nécessitant une protection contre les affouillements.

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

$$\frac{L_j}{h_1} = 220 \operatorname{Tgh}[(F_1 - 1)/22] \quad (1.8)$$

« **Tgh** » : désigne la tangente hyperbolique.

La variation de la longueur relative $\frac{L_j}{h_2}$ en fonction du nombre de Froude F_1 La figure (1.6) indique, suivant les essais de **Bradley et Peterka (1957)**, que $\frac{L_j}{h_2}$ prend une valeur moyenne égale à 6 pour la gamme pratique $4 < F_1 < 12$. Ce résultat est encore admis de nos jours.

$$L_j / h_2 = 6 \quad (1.9)$$

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

$$\frac{L_j}{h_2} = \frac{35 - \sqrt{F_1}}{8 + F_1} \quad (1.10)$$

D'autres formules ont été proposées, pour un canal de section droite rectangulaire, selon

Carlier (1980) on a :

formule de **Smetana (1933)**:

$$L_j = 6(h_2 - h_1) \quad (1.11)$$

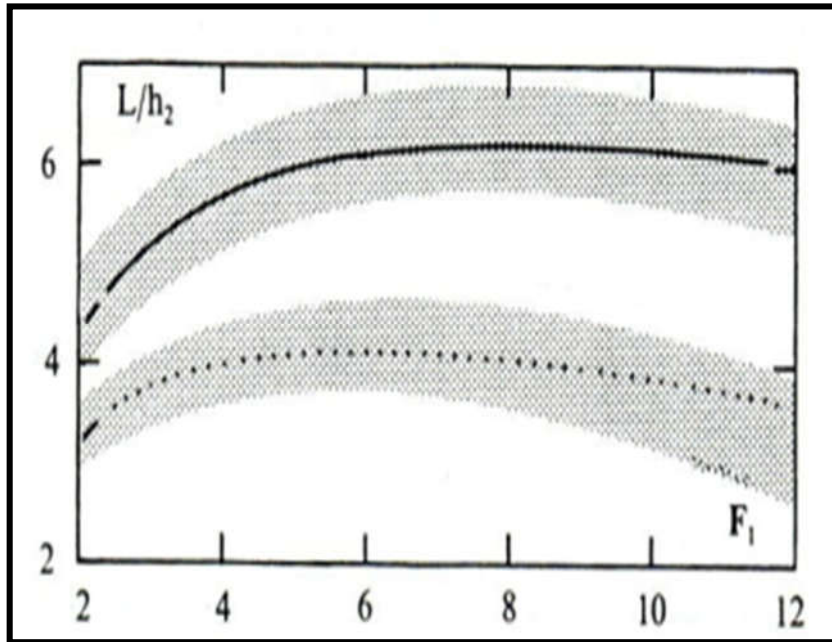


Figure (1.6) : Longueur relative $\frac{L_j}{h_2}$ en fonction de nombre de Froude F_1 .

I.3.4.2.2 Longueur du rouleau (Khenouche, 2016), (Siad, 2018) :

Plusieurs tentatives ont été conduites par différents chercheurs dans le but de définir les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique, mais ces tentatives présentent des controversés et une ambiguïté dans la façon de déterminer ces longueurs.

Safranez (1929) a injecté des colorants pour pouvoir définir la fin du rouleau ; **Einwachter (1932)**, **Bakhmeteff et Matzke (1936)** ont défini la longueur du ressaut comme la distance entre la section initiale et finale de ressaut dans laquelle la profondeur est maximale, la position de cette section est loin de la fin du rouleau.

Hager et al (1990) définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisant ainsi la notion de longueur de rouleau **développé** et **non développé**.

La figure (1.7) montre deux types de ressaut et les longueurs L_r qui leur correspondent. Le rouleau non développé est caractérisé par une longueur plus courte que celle du rouleau développé et sa surface à l'avale se présente sous l'aspect de vagues. Au fond de la masse liquide en mouvement, on peut distinguer une zone de rouleau dite de séparation formant un tourbillon de fond. En raison de la présence de cette zone, le jet entrant dans la section initiale du ressaut est dévié vers la surface libre figure (1.7.b).

Le rouleau développé présente une surface relativement lisse et est caractérisé par une quasi-stabilité. Le jet entrant dans la section initiale du ressaut adhère sur une certaine distance au fond du canal puis diverge en s'orientant vers l'aval figure (1.7.a).

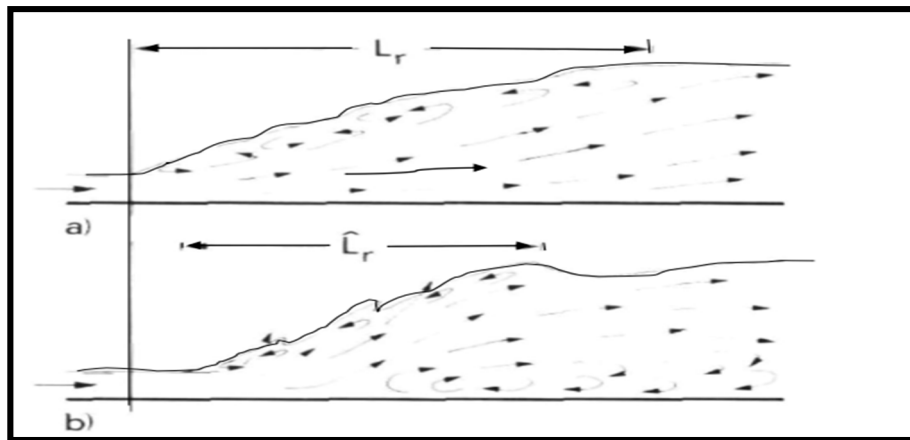


Figure (1.7) : Ressaut hydraulique avec à rouleau

a) Développée b) Non Développée.

Les essais effectués par **Hager et al. (1990)**, montrent que le rapport $\lambda_r = \frac{L_r}{h_1}$ dépend du nombre de Froude F_1 et du rapport d'aspect $w = \frac{h_1}{b}$. Les auteurs proposent les relations suivantes :

$$\lambda_r = -12 + 160Tgh\left(\frac{F_1}{20}\right) \quad \text{pour } w = \frac{h_1}{b} < 0.1 \quad (1.12)$$

$$\lambda_r = -12 + 100Tgh\left(\frac{F_1}{12.5}\right) \quad \text{pour } 0.1 < w = \frac{h_1}{b} < 0.7 \quad (1.13)$$

<<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 :

$$\lambda_r = \frac{L_r}{h_1} = 8 \quad (F_1-1.5) \quad 2.5 < F_1 < 8 \quad (1.14)$$

I.3.5 Rendement et les pertes de charge due au ressaut hydraulique (Hager & Sinniger, 1989), (Daoudi, 2016) :

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

La figure(1.8) montre la ligne de charge totale le long de la longueur L_j sur laquelle s'étend le ressaut classique.

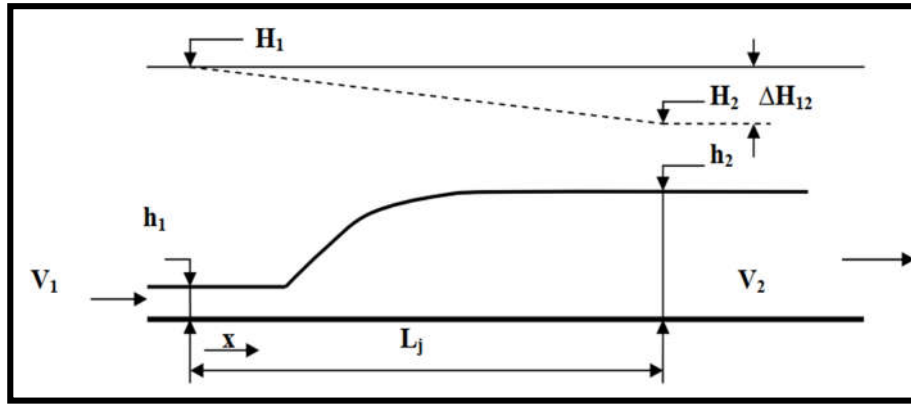


Figure (1.8) : (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique.

Le ressaut est accompagné d'une perte de charge qu'il est facile de calculer (*Flamant, 1900*). Par l'application du théorème de *Bernoulli (1738)* on peut déterminer la perte d'énergie, $\Delta H_{12} = H_1 - H_2$ produite par le ressaut en admettant que $Z_1 = Z_2$ (canal horizontal), La figure (1.8), on obtient :

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

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 :

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

V_1 et V_2 : les vitesses moyennes qui correspondent aux sections amont et aval du ressaut.

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

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

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

Avec : $A_1 = b \cdot h_1$ et $A_2 = b \cdot h_2$

En tenant compte des relations (1.18) s'écrit :

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

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

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

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

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

Donc à partir de la relation (1.19) on peut conclure la perte de charge due au ressaut classique et ne dépend que des hauteurs conjuguées. La capacité de dissipation du ressaut est représentée par η :

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

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 (1.4) du nombre de Froude on obtiendra :

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

$$H_1 = h_1 \cdot \left(Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}\right) \quad (1.24)$$

Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique définit par la relation (1.6) de Bélanger

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

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

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

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

Les relations (1.25) et (1.26) sont représentées graphiquement sur un système des coordonnées cartésiennes, illustrées par la figure (1.9).

La figure (1.9) représente le rendement de ressaut hydraulique classique en fonction le nombre de Froude

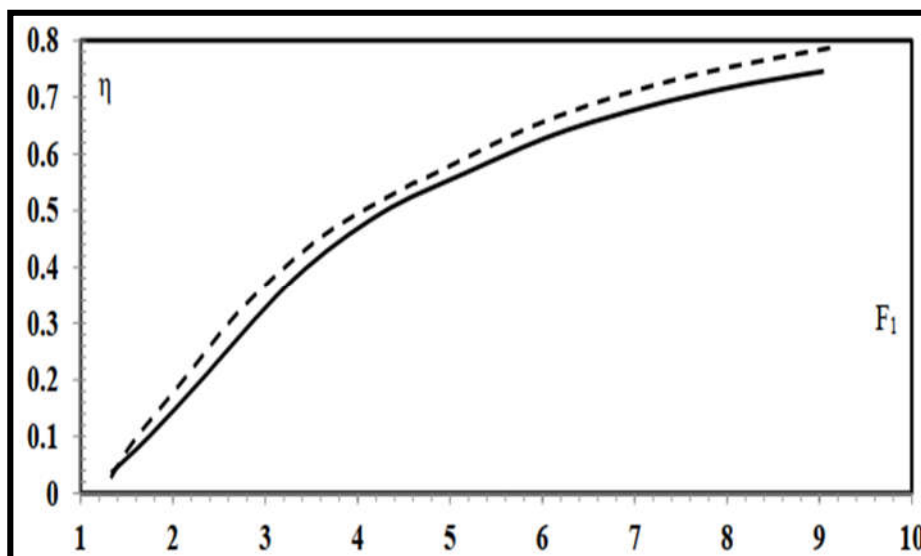


Figure (1.9) : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 (—) Courbe tracée selon la relation (1.25), (-----) courbe tracée Selon la relation (1.26).

Remarque :

Plusieurs abaques existent pour la détermination rapide des caractéristiques d'un ressaut par projection simple du nombre de Froude de l'écoulement torrentiel, ces abaques permettent de déterminer à la fois le type du ressaut, sa longueur ainsi que la perte d'énergie provoquée.

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

I.4.1 Introduction (Achour et al, 2002) :

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse (Forster et Skinde,1950), continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative (Hager et Sinniger, 1985). Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau aval, de contrôler sa position lors des changements des paramètres de l'écoulement et contribuent enfin à une meilleure compacité du bassin amortisseur (Bretz,1987; Hager et Li,1992). L'analyse dimensionnelle montre que la relation liant :

- le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.
- la hauteur géométrique s du seuil.
- la hauteur initiale h_1 du ressaut.
- la hauteur h_2 à l'amont immédiat du seuil.

- la position X du seuil comptée à partir du pied du ressaut.
- la profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval du seuil.

I.4.2 Approche de Forster et Skinde (1950), (Achour et al, 2002) :

I.4.2.1 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 .

La figure (1.10) montre un ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince dans un canal rectangulaire. Le seuil de hauteur s est dénoyé et fonctionne alors comme un déversoir. La profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval du seuil n'a aucune influence sur le comportement du ressaut et répond à l'inégalité :

$$h_3 < h_2 - \frac{3}{4}s \quad (1.27)$$

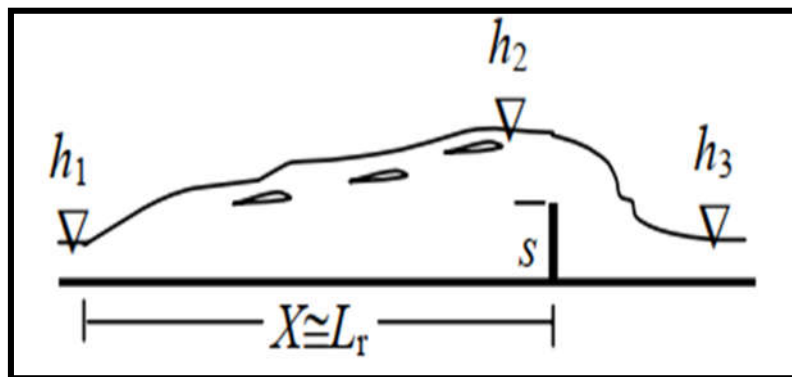


Figure (1.10) : Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

La figure (1.11) montre la variation expérimentale de la hauteur relative $\frac{s}{h_1}$ du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les valeurs 3, 5 et 10 de la position relative x/h_2 du seuil.

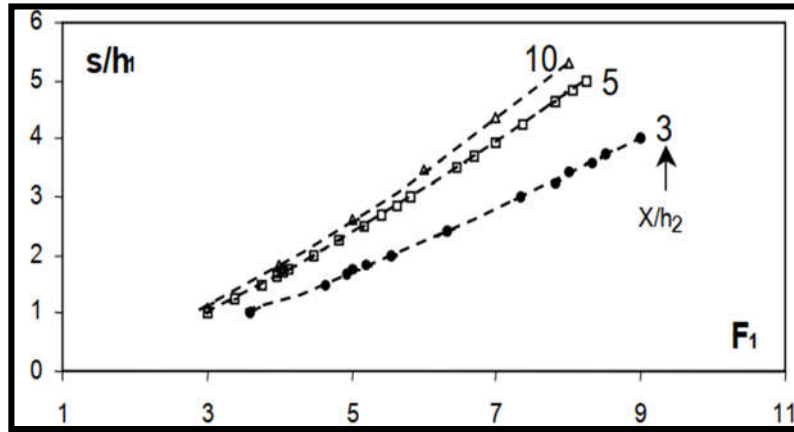


Figure (1.11) : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative x/h_2 du seuil (Forster et Skrinde,1950).

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.4.3 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 1.12). 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 :

$$0.1 \leq \frac{h_2 - s}{L} \leq 0.35 \quad (1.28)$$

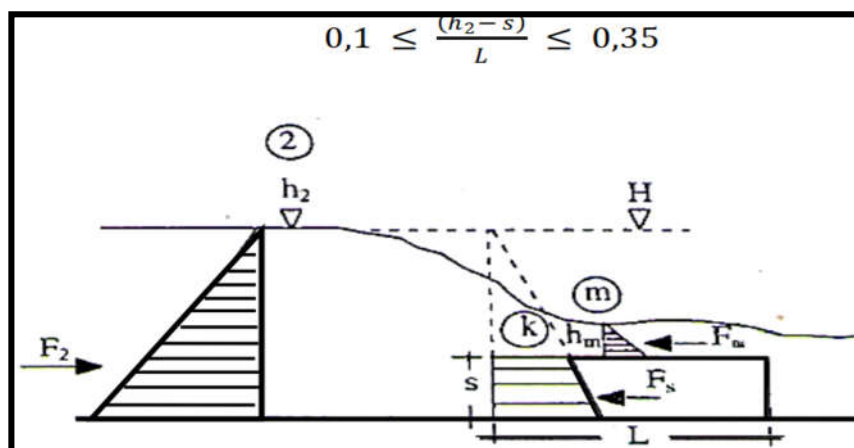


Figure (1.12) : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.

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.

$$\frac{21.33F_1^2}{\sqrt{1+8F_1^2-1}} = \frac{(\sqrt{1+8F_1^2-1}-2\frac{s}{h_1})^3}{\sqrt{1+8F_1^2-1-2\frac{s}{h_1}}} \quad (1.29)$$

Contrairement au cas du seuil à paroi mince, une seule courbe est obtenue (figure 1.13) traduisant la variation de s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 . Cette courbe peut être utilisée à condition que :

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

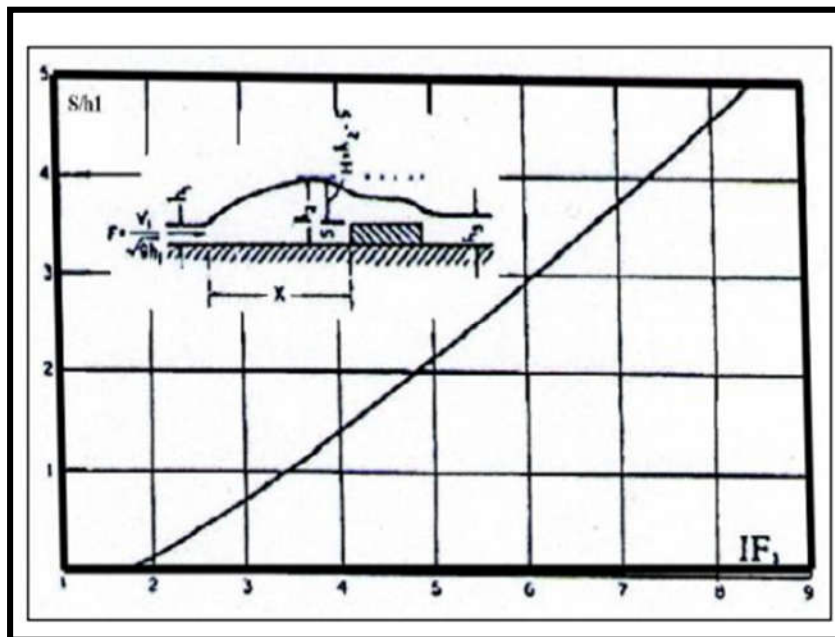


Figure (1.13) : Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracé selon la relation la relation (1.30).

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 1.14) :

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

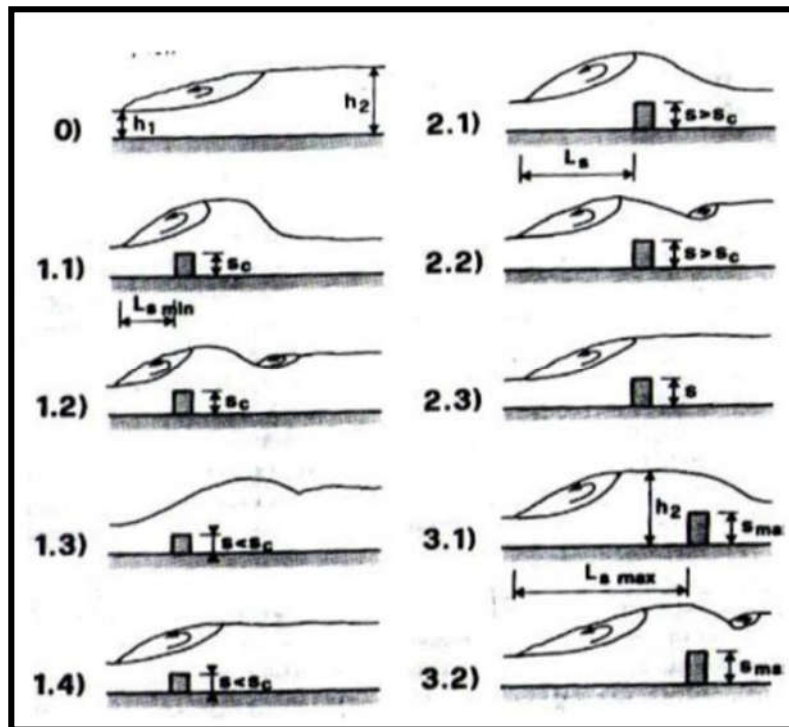


Figure (1.14) : Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes selon *Rand* (1957) : 0) Ressaut classique avec hauteurs conjuguées h_1 et h_2 ; 1) class 1, longueur $L_{s_{min}}$; 2) class 2, longueur intermédiaire L_s ; 3) class 3, longueur $L_{s_{max}}$; s : hauteur du seuil, s_c : hauteur critique du seuil et s_{max} : hauteur maximale du seuil.

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

$$K = \frac{\left(\frac{L_s}{h_1}\right) - \left(\frac{L_1}{h_1}\right)_{\min}}{\left(\frac{L_1}{h_1}\right)_{\max} - \left(\frac{L_1}{h_1}\right)_{\min}} \quad (1.31)$$

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 Y_F en fonction de F_1 pour différentes hauteurs relatives du seuil $S = \frac{s}{h_1}$ 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 $Y_F = \frac{h_2}{h_1}$ en fonction de $S = \frac{s}{h_1}$ pour divers valeurs de K , arrangement plus pratique à utiliser pour le dimensionnement (figure 1.14), mais avec l'inconvénient qu'il faut un diagramme pour chaque nombre de Froude.

La figure (1.15) représente la hauteurs conjuguées $\frac{h_2}{h_1}$ pour $F_1 = 9$ en fonction de $S = \frac{s}{h_1}$ pour divers valeurs de K .

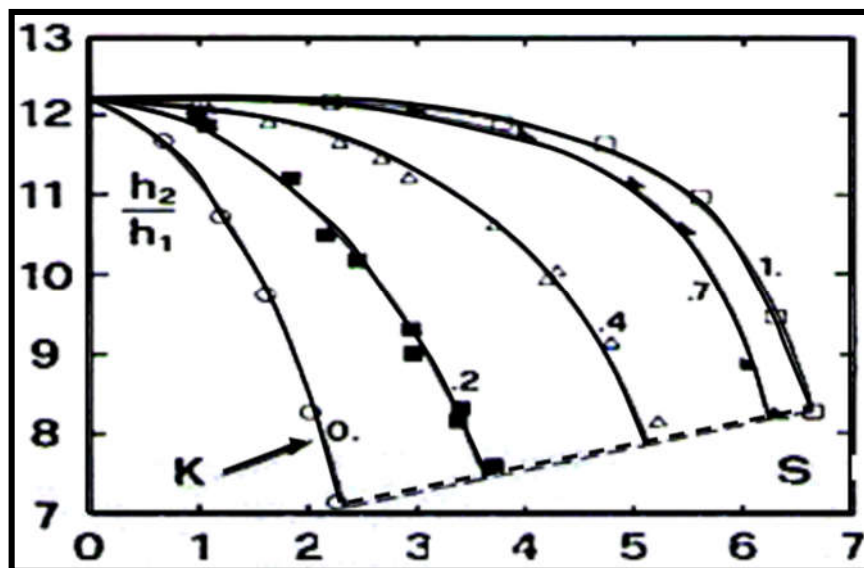


Figure (1.15) : Hauteurs conjuguées $\frac{h_2}{h_1} = f(s, k)$ pour $F_1=9$. Valeurs et courbes expérimentales : (----) limite d'influence de l'aval sur l'amont.

I.6 Conclusion :

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

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

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

Chapitre II :

Ressaut hydraulique en canal
trapézoïdal

II. Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal :

II.1 Introduction (Siad, 2018) :

Le ressaut hydraulique évaluant dans des canaux non-rectangulaire a reçu une véritable attention, notamment en canal trapézoïdal, la performance du ressaut dans ce type de canal présente un intérêt considérable pour des applications pratiques, étant donné que le profil trapézoïdal présente des avantages économiques pour des petites angles d'inclinaison des parois en comparant avec des parois verticaux dans un canal rectangulaire.

Ce chapitre sera divisé en deux axes, dans le premier nous allons présenter les travaux de *Silvester (1964)*, *Wanoschek et Hager (1989)* « Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique » le deuxième sera présenter l'approche d'*Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954)* « Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique »

II.2 Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique :

II.2.1 Introduction (Meziani, 2018) :

Dans cette partie, nous allons citer quelques travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal symétrique. Nous citerons particulièrement ceux effectués par *Silvester (1964)*, *Wanoschek et Hager (1989)* sur le ressaut classique. Ces auteurs ont notamment contribué à définir la longueur du ressaut et l'ont exprimé sous la forme adimensionnelle tel que :

$$\frac{L_j}{h_2 - h_1} = 7.1(1 + 10M) \quad (2.1)$$

Avec :

- $M = \frac{m \cdot h_1}{b}$ où : $m = \cotg(\theta)$ (la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal).
- b : la base du trapèze.
- h_1 et h_2 sont respectivement la hauteur initiale et final.
- M : paramètre adimensionnel représente en fait, la hauteur relative initiale du ressaut.

La relation de *Silvester (1964)* montre clairement que, la longueur du ressaut est d'autant plus grande que M tend vers l'infini. Les valeurs croissantes de M indiquent un profil trapézoïdal géométriquement rétréci à la base en tendant vers le profil triangulaire ($b \rightarrow 0$). Par contre, les valeurs décroissantes de M aboutissent à des profils trapézoïdaux d'autant plus refermés vers le haut en tendant vers le profil rectangulaire ($M \rightarrow \infty$). Ces considérations laissent penser que le ressaut en

canal triangulaire devrait s'étendre sur une longueur beaucoup plus grande que son homologue du rectangulaire.

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

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

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

De même pour la longueur caractéristique du ressaut, nous allons aborder à travers ce chapitre un autre paramètre caractéristique du ressaut ; ce paramètre est le rapport des hauteurs conjuguées Y , obtenu par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut.

II.2.2 Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal (*Meziani, 2018*) :

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

II.2.2.1 Rapport des hauteurs conjuguées (*Kateb, 2014*), (*Hager & Sinniger, 1989*) :

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

$$A_1 = b * h_1 + m * h_1^2 \quad (2.2)$$

$$A_2 = b * h_2 + m * h_2^2 \quad (2.3)$$

Les centres de gravité des sections initiales et finales sont :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6} \left(\frac{3b+2mh_1}{A_1} \right) \quad (2.4)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6} \left(\frac{3b+2mh_2}{A_2} \right) \quad (2.5)$$

Les forces de pressions des sections initiales et finales sont :

$$P_1 = \bar{w}h_1 * A_1 \quad (2.6)$$

$$P_2 = \bar{w}h_2 * A_2 \quad (2.7)$$

L'application de cette équation donne :

$$\frac{bh_1^2}{2} + \frac{mh_1^2}{3} + \frac{Q_1}{gA_1} = \frac{bh_2^2}{2} + \frac{mh_2^2}{3} + \frac{Q_2}{gA_2} \quad (2.8)$$

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1^2)}{g(bh_1+mh_1^2)^3} \quad (2.9)$$

En introduisant le paramètre Y, définissant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut l'équation devient :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(2M+1)}{2(1+3)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (2.10)$$

Tels que :

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

L'équation (2.10) a cinq variables est réduite à trois variables (F_1^2 , M, Y).

Les éléments connus sont Q, h_1 , b et m qui forment :

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

L'élément inconnu est $h_2 = ?$

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

- **Cas particulier du canal rectangulaire :**

Pour obtenir la fonction $Y(F_1)$ pour le cas du ressaut hydraulique évaluant en canal rectangulaire, il suffit d'annuler dans l'équation (2.10) m et M ($m = 0$ et $M = 0$). L'équation (2.10) devient.

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

Ou encore :

$$F_1^2 = \frac{Y(Y-1)}{2} \quad (2.11)$$

Et F_1^2 devient :

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

Éléments connus : Q , b , h_1 donnent F_1 .

L'équation (2.10) conduit à la relation :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (2.12)$$

C'est l'équation de **Bélangier (1928)**, cette équation traduit un ressaut classique sans obstacle en aval. Elle a été reprise par **Hager (1988)** :

Valable pour $F_1 > 3$:

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} F_1 - \frac{1}{2}$$

Hager à vérifier expérimentalement que pour des ressauts où $F_1 > 3$, $\sqrt{1 + 8F_1^2} \approx \sqrt{8F_1^2}$

D'où a relation :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} F_1 - \frac{1}{2} \quad (2.13)$$

- **Cas particulier du canal triangulaire :**

En remplaçant dans l'équation (2.10) : $b = 0$ et $1/M = 0$ ($M \rightarrow \infty$), l'équation (2.10) donne :

$$F_1^2 = \frac{2Y^2(Y^2+Y+1)}{3(Y+1)} \quad (2.14)$$

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

$$Y = \left(\frac{2}{3}F_1^2 - 1\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.15)$$

La figure (2.1) représente la variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M dans trois cas :

* :profil trapézoïdaux ;

*: profil rectangulaire ;

* : profil triangulaire.

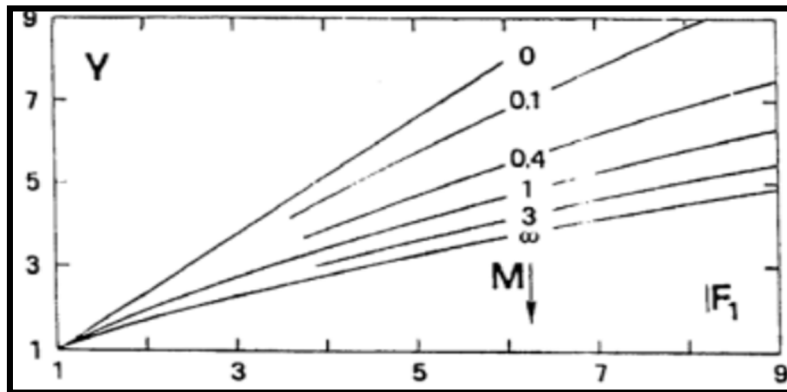


Figure (2.1) : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M .

$0 < M < \infty$: profil trapézoïdaux ; $M=0$: profil rectangulaire ;

$M \rightarrow \infty$: profil triangulaire.

II.2.2.2 Longueur du ressaut (*Rahmani, 2019*) :

La longueur du ressaut L_j n'a pu être quantifiée que par voie expérimentale et sa définition varie d'un auteur à un autre. En effet, on estime que la longueur L_j doit être mesurée dans la section à l'aval du ressaut.

La longueur du ressaut hydraulique en 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 :

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_2} = 5 \left[1 + 4 \left(\frac{w_2 - w_1}{w_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

Où : $w = b + 2mh$ avec w : largeur de surface d'eau .

L'erreur sur λ_j est estimée par : $\lambda_j = \lambda_j \pm 5$

Une autre formule de la longueur du ressaut a été analysée par (*Silvester, 1964*), (*Wanoschek et Hager, 1989*) c'est la relation :

$$\frac{L_j}{h_2 - h_1} = 7.1(1 + 10M) \quad (2.17)$$

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

$$\log 10 \left(\frac{\Delta H}{H_i} \right) = 1.71\xi + 0.315m + 1.58 \quad (2.18)$$

Où :

* $\xi = \frac{\Delta H}{H_i}$: la perte d'énergie relative à travers le ressaut.

Avec :

* ΔH : la perte d'énergie du ressaut.

* H_i : la charge totale d'eau.

D'après **Hager et Wanoschek (1989)**, La particularité du ressaut en canal trapézoïdal est l'apparition d'un rouleau du fond pour des nombres de Froude $F_1 > 4$. 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 (**Figure 2.2**) .

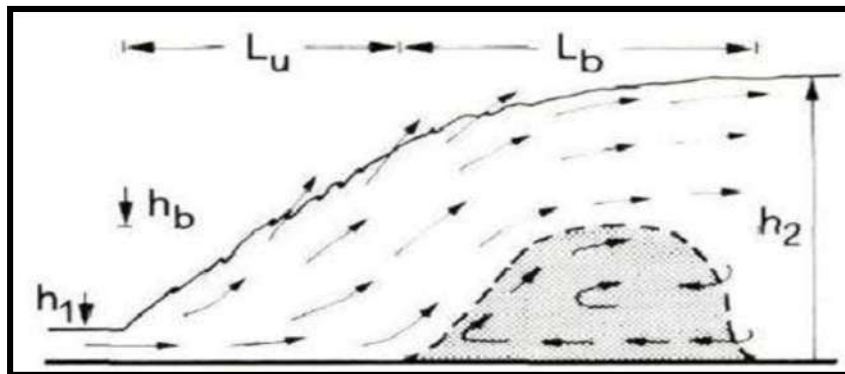


Figure (2.2) : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale.

II.2.2.3 Rendement (*Mahamdioua, 2016*) :

La perte de charge ΔH du ressaut est par définition la différence des charges initiale et finale :

$$\Delta H = H_1 - H_2 .$$

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

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} \quad (2.19)$$

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

$$H_1 = h_1 + \frac{\alpha_1 + Q^2}{2gA_1^2} \quad (2.20)$$

$$H_2 = h_2 + \frac{\alpha_2 + Q^2}{2gA_2^2} \quad (2.21)$$

Où :

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$$

$$Q = V_1 * A_1 = V_2 * A_2$$

L'injection des expressions (2.2) (2.3) et (2.19) (2.20) dans l'équation (2.16) aboutit à l'équation (2.15), qui suit, exprimant le rendement du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal :

$$\eta = \frac{Y + \frac{F_1^2(1+M)^3}{2Y^2(1+2M)(1+MY)^2}}{1 + \frac{F_1^2(1+M)}{2+(1+2M)}} ; 0 < \eta < 1 \quad (2.22)$$

Puisque, d'après l'équation (2.12), le rapport des hauteurs conjuguées Y est directement lié au nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident et au facteur de forme M , le rendement η ne dépend lui aussi, d'après l'équation (2.21), que de F_1 et de M .

Lorsque $M = 0$, la relation (2.21) mène à l'expression du rendement du ressaut évoluant dans un canal horizontal de section droite rectangulaire. Par contre, lorsque $1/M = 0$, la relation (2.2) conduit à l'expression du rendement du ressaut évoluant dans un canal de section droite triangulaire constante (*Mahamdioua, 2016*).

- **Cas particulier du canal rectangulaire :**

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

$$\eta = 1 - \frac{\frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (2.23)$$

Sinniger (1985) a proposé une bonne approximation de l'équation (2.16) :

$$\eta = [1 - \sqrt{2}F_1]^2 \quad ; \quad F_1 > 2.5$$

- **Cas du canal triangulaire :**

Pour le cas du canal triangulaire on a : $\frac{1}{M} = 0$

$$\eta = 1 - \frac{\frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}} \quad (2.24)$$

Hager et Sinniger (1985) proposent la relation approchée suivante :

$$\eta = [1 - \frac{12}{F_1^2}]^{\frac{1}{3}}]^2 \quad ; \quad F_1 > 3$$

La courbe inférieure correspond à $M_1 = 0$, représentant la forme rectangulaire, et la courbe supérieure correspond à $M^{-1} = 0$, représentant la forme triangulaire.

Le ressaut en canal triangulaire dissipe donc plus d'énergie, suivi du canal Trapézoïdal de différentes valeurs de M_1 et en fin, le canal rectangulaire dissipant Moins d'énergie.

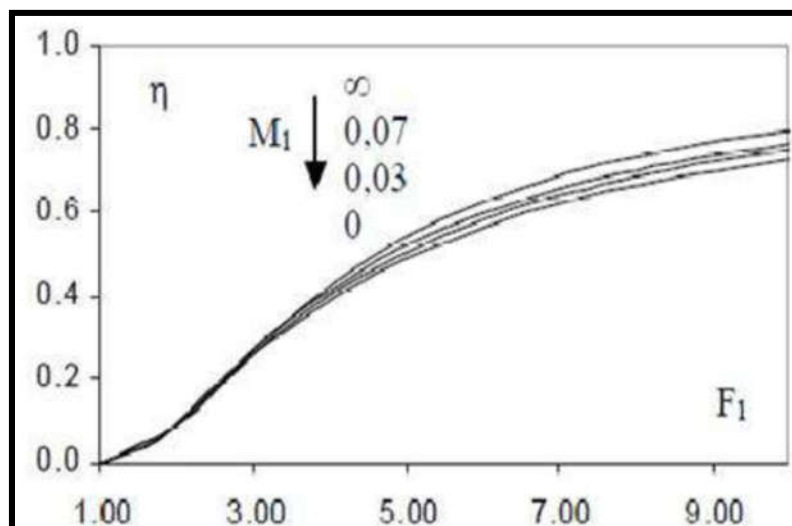


Figure (2.3) : Variation du rendement η du ressaut en canal trapézoïdal en fonction du nombre de Froude F_1 pour différentes valeurs de M_1 (Equation (2.22)).

II.2.3 Conclusion :

Dans ce deuxième chapitre on a présenté l'étude de *Wanoschek* et *Hager (1989)* sur le ressaut dénoyé dans un canal trapézoïdal, des relations seront données pour la quantification des longueurs caractéristiques du ressaut noyé se produisant dans canal rectangulaire et triangulaire ainsi que la longueur du ressaut dénoyé pour le canal trapézoïdal.

II.3 Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique :

II.3.1 Approche d'*Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954)* :

Dans cette approche, *Alberto José* et *Rodriguez-Diaz* ont étudié le ressaut dans un canal trapézoïdal dans lequel les parois latérales sont verticales, la surface de l'eau et le canal inférieur ne sont pas parallèles. La section non rectangulaire à étudier est présentée en coupe transversale dans la figure (2.4).

Cette étude a pour but de déterminer :

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

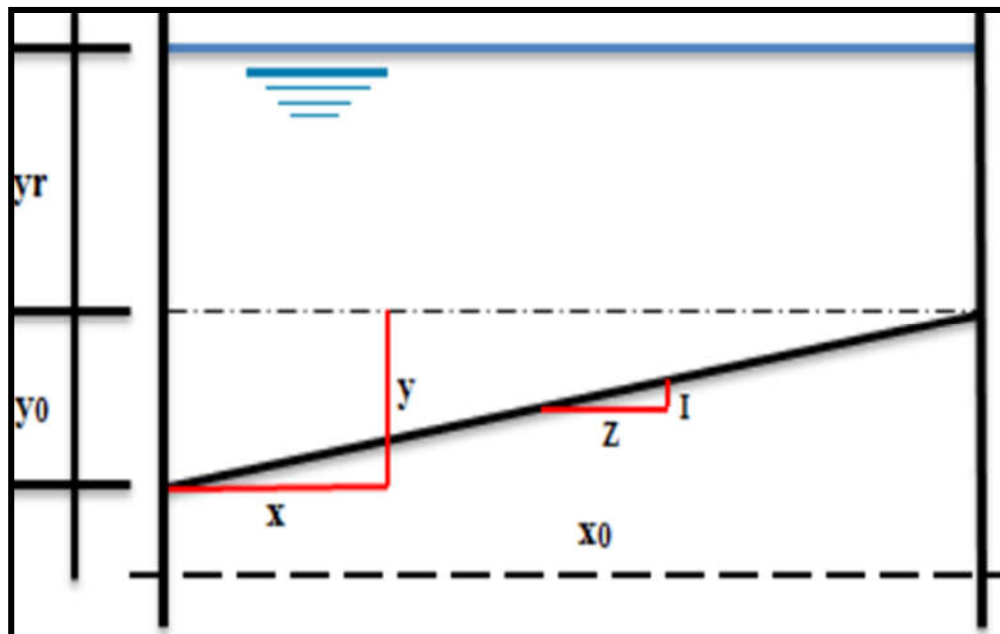


Figure (2.4) : Section transversale du canal.

X_0 : Largeur de la section transversale.

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

Y_r : Profondeur de l'eau dans le coté peu profond.

Y_{are} : Profondeur moyenne.

X_s : Longueur du retour latéral sur le coté peu profond du canal.

X_d : Longueur du retour latéral sur le côté profond du canal.

V :Vitesse.

Q : Débit.

$P + M$: Force de pression + quantité de mouvement.

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

$$\psi = \frac{P+M}{At*\frac{y_0}{2}}$$

Avec :

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

$$\phi = \frac{y_r}{y_0}$$

$$\theta = \frac{(Q * At)^2}{gy_0}$$

F_1 : Nombre de Froude ;

γ : Poids spécifique de l'eau ;

ρ : Densité de la masse ;

g : Accélération de la gravité.

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

II.3.1.1 Analyse de la section totale :

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

$$\mathbf{P} + \mathbf{M} = \frac{1}{2} \mathbf{x}_0 * \mathbf{y}_r^2 * \mathbf{\gamma} + \frac{1}{2} * \mathbf{x}_0 * \mathbf{y}_0 * \mathbf{\gamma} \left(\mathbf{y}_r + \frac{\mathbf{y}_0}{3} \right) + \frac{\phi Q^2}{\mathbf{x}_0 * \mathbf{y}_r + \left(\frac{1}{2} \mathbf{x}_0 * \mathbf{y}_0 \right)} \quad (2.25)$$

La forme adimensionnelle :

$$\boldsymbol{\Psi} = \boldsymbol{\Phi}^2 + \boldsymbol{\Phi} + \frac{1}{3} + \boldsymbol{\theta}(1 + 2\boldsymbol{\Phi}) \quad (2.26)$$

D'après l'équation de la quantité de mouvement, $\boldsymbol{\Psi}_1$ (amont) = $\boldsymbol{\Psi}_2$ (aval) :

$$\boldsymbol{\Phi}_1^2 + \boldsymbol{\Phi}_1 + \frac{1}{3} + \boldsymbol{\theta}(1 + 2\boldsymbol{\Phi}_1) = \boldsymbol{\Phi}_2^2 + \boldsymbol{\Phi}_2 + \frac{1}{3} + \boldsymbol{\theta}(1 + 2\boldsymbol{\Phi}_2) \quad (2.27)$$

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

La solution de $\boldsymbol{\Phi}_2$ pour des valeurs données de $\boldsymbol{\Phi}_1$ et $\boldsymbol{\theta}$ a été réalisée graphiquement en traçant $\boldsymbol{\Psi}$ par rapport à $\boldsymbol{\Phi}$ a été construite, chaque courbe représente une valeur différente de $\boldsymbol{\theta}$.

D'après ces courbes, la valeur correcte de $\boldsymbol{\Psi}$ peut être déterminée pour donner la valeur de $\boldsymbol{\Phi}$ et de $\boldsymbol{\theta}$, puisque la valeur est la même pour les sections amont et aval.

II.3.1.2 Analyse de bande longitudinale (volume de contrôle) :

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

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

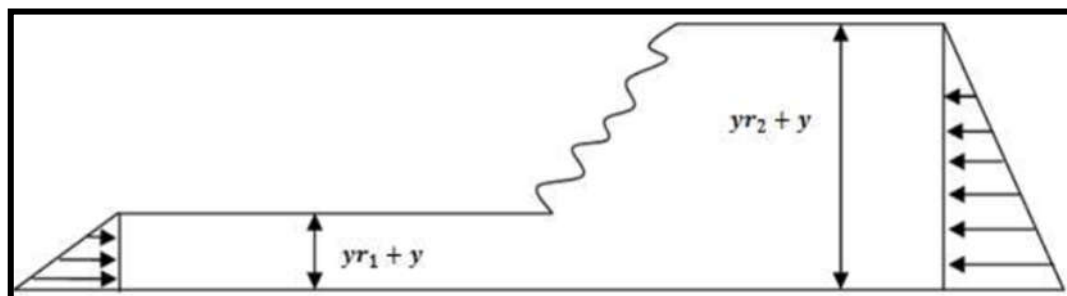


Figure (2.5) :Section de la bande longitudinale.

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

$$\frac{1}{2}\gamma(y_{r1} + y)^2 + V_1^2(y + y_{r1}) = \frac{1}{2}\gamma(y_{r2} + y)^2 + V_2^2(y + y_{r2}) \quad (2.28)$$

On a : $V = \frac{Q}{At(1+2\Phi)}$ divisant par γy_0^2 ; l'expression suivante est obtenue pour la bande :

$$P + \frac{M}{\gamma y_0^2} = \frac{\frac{1}{2}(\frac{y}{y_0} + \Phi_1)^2 \theta (\frac{y}{y_0} + \Phi_1)}{(1+2\Phi_1)} = \frac{\frac{1}{2}(\frac{y}{y_0} + \Phi_2)^2 \theta (\frac{y}{y_0} + \Phi_2)}{(1+2\Phi_2)} \quad (2.29)$$

Pour l'équilibre :

$$(P + M)_{S_1} = (P + M)_{S_2}$$

$$G = (P + M)_{S_1} / (P + M)_{S_2} \quad (2.30)$$

$M = 1$: Pour l'équilibre.

$M > 1$: Pour $P+M$ déficience en amont.

$M < 1$: Pour $P+M$ surplus en amont.

De la géométrie :

$$G = \frac{1/2(1 - \frac{x}{x_0} + \Phi_2)^2 + \theta(1 - \frac{x}{x_0} + \Phi_2) / (1+2\Phi_2)^2}{1/2(1 - \frac{x}{x_0} + \Phi_1)^2 + \theta(1 - \frac{x}{x_0} + \Phi_1) / (1+2\Phi_1)^2} \quad (2.31)$$

Le paramètre G ressemble au paramètre de forme H utilisé dans les études de la couche limite.

La valeur de G est une mesure approchée de la quantité de mouvement à toute la bande longitudinale, et la valeur de H représente la mesure approchée de la quantité de mouvement dans la couche limite.

Autrement, le critère de séparation de la couche limite est souvent exprimé par le taux de changement de H plutôt que la valeur communément utilisée de H . La valeur de G ou $\frac{\partial G}{\partial(\frac{x}{x_0})}$ peuvent être des mesures valables si le ressaut hydraulique est possible. La valeur maximale de G se produit au fond le peu profond ; où $\frac{x}{x_0} = 1$

$$G_m = \frac{\frac{1}{2} * \Phi_2^2 + \theta \Phi_2 / (1+2\Phi_2)^2}{\frac{1}{2} * \Phi_1^2 + \theta \Phi_1 / (1+2\Phi_1)^2} \quad (2.32)$$

Les valeurs de G par rapport à Φ pour les différentes valeurs de θ sont illustrées dans la figure (2.6)

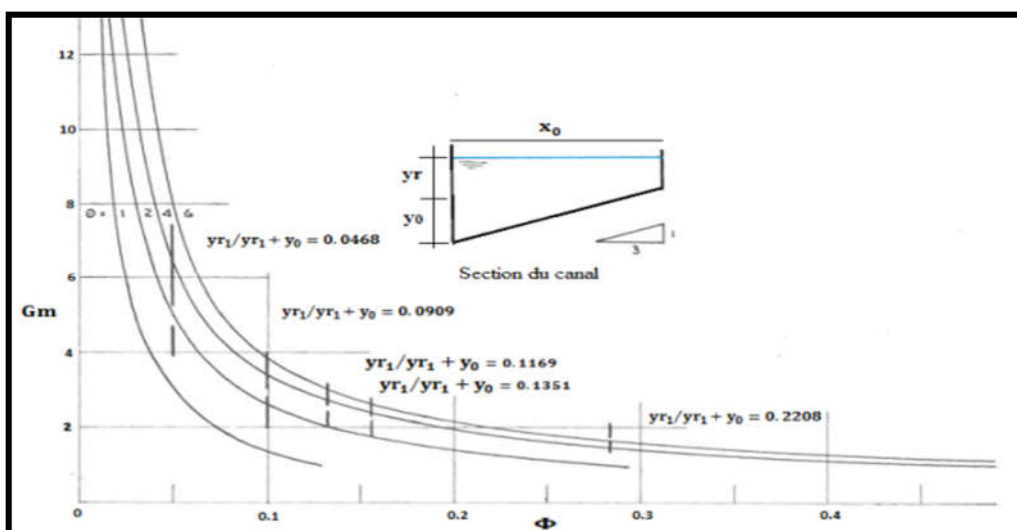


Figure (2.6) : Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté peu profond.

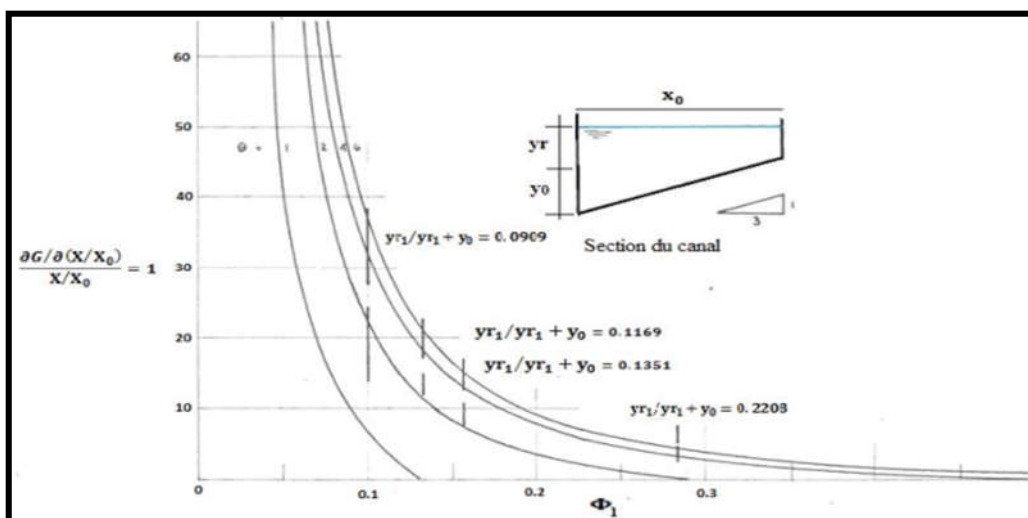


Figure (2.7) : Diagramme adimensionnel du taux de changement de M sur le côté peu profond.

II.3.1.3 Discussion des résultats :

Il existe deux types différents d'écoulement :

* Le premier type se compose d'ondes ondulantes à travers le canal et des rouleaux sur le côté peu profond. Une seconde vague bien définie a toujours été observée avec ce type d'écoulement. Un modèle de ce type d'écoulement est représenté sur les figures (2.8a et 2.8b).

* Le deuxième type consiste en une onde perpendiculaire à la section transversale qui peut être appelée ressaut hydraulique ; aucune seconde vague n'a été observée. Ce type d'écoulement est également esquissé dans les figures (2.8c et 2.8d).

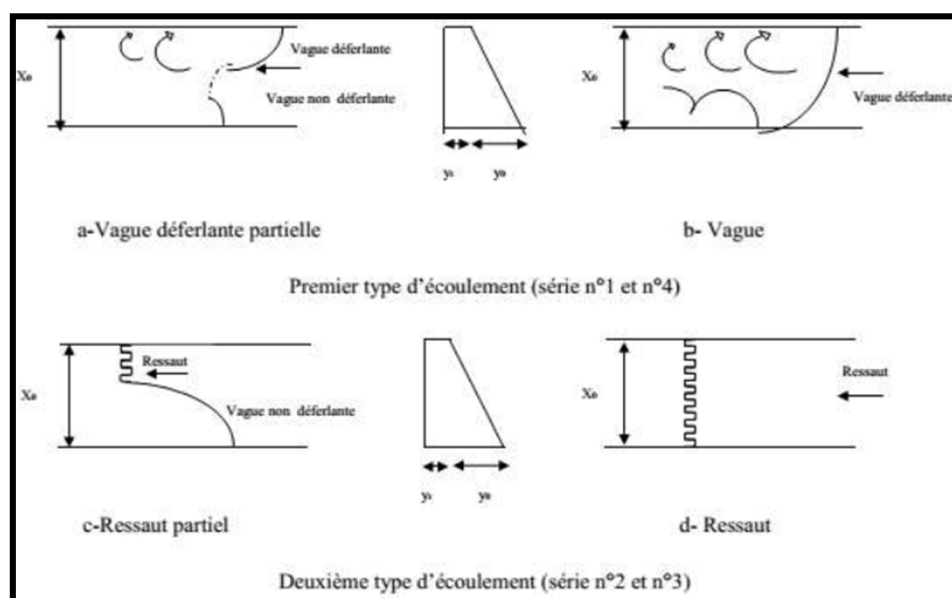


Figure (2.8) : Schéma général d'écoulement.

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

Dans la fin, l'étude expérimentale *d'Alberto José* et *Rodriguez-Diaz (1954)* ont permis de déterminer les paramètres suivants :

1. En fonction de la valeur du nombre de Froude, l'écoulement est divisé en deux types. Si le nombre de Froude est inférieur à 1.83, des vagues déferlantes partielles sont obtenues ; et si le nombre de Froude est supérieur à 1.83, des vagues déferlantes sur toute la section du canal sont observées.

2. La valeur limite théorique de $F_1 = 1.73$ pour les conditions de ressaut irrégulier et direct dans le canal rectangulaire sont très proches de la valeur de $F_1 = 1.83$ obtenu pour ce canal. Par conséquent, la valeur du nombre de Froude un peu inférieur à 2 peut être considérée comme la limite entre les vagues déferlantes et non déferlantes indépendamment de la forme du canal.

3. Dans un canal rectangulaire, le nombre de Froude est suffisant pour décrire le type de l'onde, puisque seulement deux types sont possibles ; le ressaut irrégulier et direct.

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

4. Dans le cas de G_m est supérieur à **2.8**, la longueur de retour latéral sur le côté peu profond augmente rapidement (si il y a une déviation par rapport à la forme rectangulaire) ; et elle devient infinie (si le canal est triangulaire).

5. La longueur du retour latéral sur le côté profond est toujours plus petite que celle sur le côté peu profond, elle augmente également par la diminution de la largeur du canal. Donc, la condition limite dans le canal rectangulaire est obtenue si la longueur des deux côtés du canal est la même.

6. La longueur du retour latéral sur le côté peu profond pour un ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire ($F_1 > 1.83$ et $G_m < 2.8$) est plus petite que la longueur du ressaut dans un canal rectangulaire.

7. Les conclusions 5 et 6 indiquent que le ressaut hydraulique dans une section non rectangulaire est plus efficace en tant que dissipateur d'énergie que dans une section rectangulaire.

II.3.2 Approche d'Hubert Chanson, Kiri Urvisha et Leng Xinqian (2018) :

II.3.2.1 Propagation positive de ressaut dans un type non rectangulaire (Canal trapézoïdal asymétrique) :

Dans un canal ouvert, le ressaut positif est le mouvement instable de l'écoulement, caractérisé par une augmentation soudaine de l'élévation de l'eau. Les applications peuvent inclure les ressauts dans les canaux hydroélectriques et les ressauts induits par l'opération de vanne rapide. Alors, la littérature se concentre sur la propagation positive du ressaut dans les canaux rectangulaires, cette étude a examiné la propagation positive amont du ressaut dans un canal asymétrique prismatique non rectangulaire. Des expériences détaillées sont réalisées dans un canal de **0,7 m** de largeur et de **19 m** de longueur, équipé d'une pente de lit transversal **1V: 5H**. Des mesures non stationnaires sont effectuées à l'aide de compteurs de déplacement acoustique, **ADV Profiler** et **ADV** vélocimétrie. Une caractéristique clé était le mouvement d'écoulement non stationnaire en trois dimensions. Cela a engendré un mouvement secondaire transitoire compliqué et un mélange transversal amélioré par rapport à la propagation positive des ondes dans les canaux rectangulaires, Alors que le mouvement secondaire n'était pas différent du mouvement secondaire à débits continus dans les canaux composés

prismatiques, les résultats présents ont souligné la nature transitoire et l'intensité extrême du mouvement secondaire dans les ondes positives.

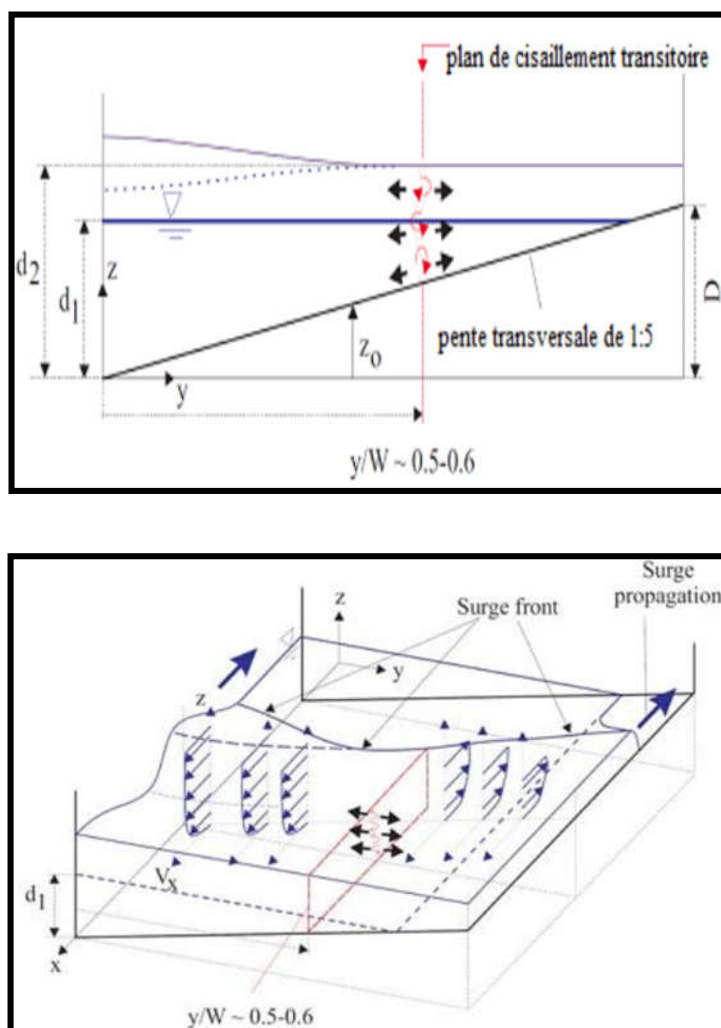


Figure (2.9) : Modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la propagation positive du ressaut dans un canal composé prismatique ($d_1/D < 1$).

II.3.2.2 Installation expérimentale :

Les expériences ont été menées dans le laboratoire d'ingénierie hydraulique avancée de l'Université du Queensland. Le canal incliné rectangulaire de **19 m** de long et **0,7 m** de large était équipé de parois latérales en verre de **0,52 m** de hauteur. L'installation est auparavant utilisée par **LENG** et **CHANSON** (2015a, b, 2016,2017). Avec une section transversale rectangulaire. Le lit du canal est modifié avec l'installation d'une pente transversale **1V :5H**, en **PVC** (Figure 2.10 et 2.11).

L'écoulement d'eau est permanent, et il est alimenté par un réservoir d'eau en amont, suivi d'une série de stabilisateurs d'écoulement et d'une convergente lisse tridimensionnelle pour assurer une entrée régulière. Une vanne à fermeture rapide est située à l'extrémité aval du canal ($x = 18.1$ m) et

sa fermeture rapide a généré une surtension positive se propageant en amont. Ici x est la distance longitudinale depuis le début du canal. La pente du canal est constante pour toutes les expériences ($S_0 = 0,002216$). La figure (2.10) montre le canal en aval. Dans la suite, y est la distance transversale horizontale mesurée à partir de la paroi droite en verre et z est la distance verticale mesurée à partir du point le plus bas du canal, c'est-à-dire du côté de la paroi latérale droite (figure 2.10).

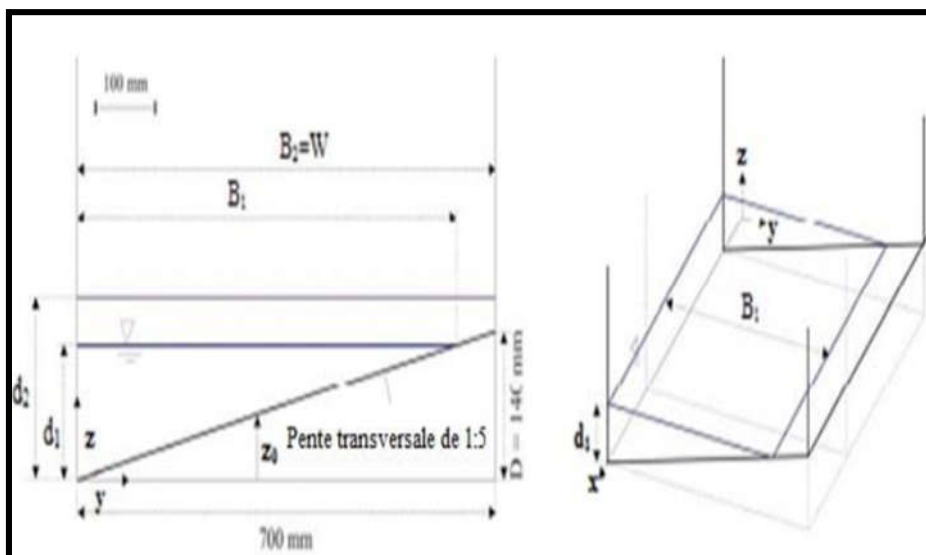


Figure (2.10) : Modèle de la section transversale du canal - A gauche : en regardant vers l'amont.



Figure (2.11) : Photographie de l'installation expérimentale en aval.

Globalement, le champ turbulent instable présentait des différences marquées par rapport aux observations dans les canaux rectangulaires. Ceci implique que les résultats quantitatifs obtenus dans les canaux rectangulaires pourraient ne pas être directement applicables aux canaux asymétriques non

rectangulaires. Par exemple, pour le jet, une surtension sur les pentes de glissement des canaux trapézoïdaux artificiels ; pour les courants de marée, des interactions le long des rives du fleuve dans les estuaires naturels. Dans les sections asymétriques non rectangulaires, il faut s'attendre à un mouvement secondaire transitoire important, associé à des niveaux de contrainte de cisaillement turbulents plus élevés. En outre, les résultats peuvent être directement pertinents pour la propagation de surtensions dans les voies navigables trapézoïdales artificielles et les canaux naturels de forme irrégulière en termes de modélisation numérique. Les modèles numériques classiques avec profondeur moyenne, par ex. basés sur les équations de St Venant et de Boussinesq, ne permettent pas de modéliser le mouvement turbulent tridimensionnel complexe sous les surtensions dans les canaux irréguliers. Un modèle complet de dynamique des fluides informatiques tridimensionnelle (CFD 3D) basé sur les équations de *Navier-Stokes* est requis, Bien qu'une validation appropriée soit essentielle et nécessite des données de modélisation physique appropriées et de haute qualité (*LENG et al. 2017, LUBIN et CHANSON 2017*).

II.3.3 Conclusion :

Cette partie bibliographie a pour objectif de faire le point sur les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique dénoyé en canal trapézoïdal asymétrique. Une étude a été proposée qui est celle d'*Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954)* et *Hubert chanson d'Hubert, Kiri Urvisha et Leng Xinqian (2018)*.

Chapitre III :

Profil de la surface généralisé de
ressaut hydraulique dans
quelques canaux

III. Profil de la surface de ressaut hydraulique dans quelques canaux :

III.1 Introduction (Khenouche, 2016) :

Le profil d'un ressaut hydraulique classique a aussi été mesuré par de nombreux chercheurs. À partir de mesures expérimentales de *Murzyn & Chanson (2009)* et de *Chachereau & Chanson (2011)*, *Chanson (2011)* a proposé la loi auto similaire suivante :

$$\frac{h-h_1}{h-h_2} = \left(\frac{x-x_1}{L_r}\right)^{0.441} \quad (3.1)$$

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

III.2 Vue théorique sur le profil de surface généralisé dans différents types de canaux :

III.2.1 Profil de surface généralisé dans un canal rectangulaire (*Hager & Sinniger, 1989*) :

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

$$\mathbf{X} = \frac{x}{L_r}, \quad \mathbf{f} = \frac{h-h_1}{h_2-h_1} \quad (3.2)$$

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

La figure (3.1) permet la détermination du profil de la surface $h(x)$, en supposant que h_2 , h_1 sont connus. A cause des ondes de surface et de la forte turbulence, la surface réelle du ressaut n'est pas une ligne précise et unique. Des fluctuations temporelles caractérisent la surface sur toute la longueur du ressaut.

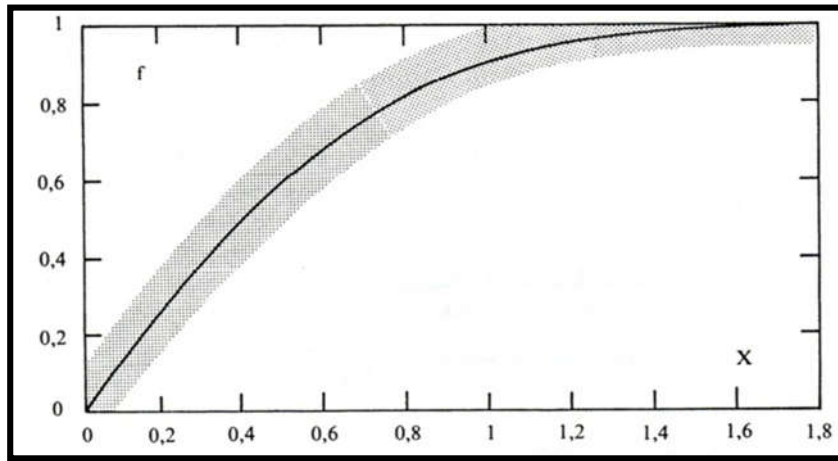


Figure (3.1) : Profil de la surface ressaut hydraulique plan.

III.2.2 Profil de surface du ressaut en canal rectangulaire (compacité du ressaut) :

III.2.2.1 Approche de *Debabeche (2003)* :

La figure (3.2) représente les profils de la surface du ressaut relatifs à quelques rapports intermédiaires de compacité du ressaut, à savoir : $\gamma \leq 0.9$, $\gamma = 1.15$, $\gamma = 1.45$, $\gamma = 1.93$.

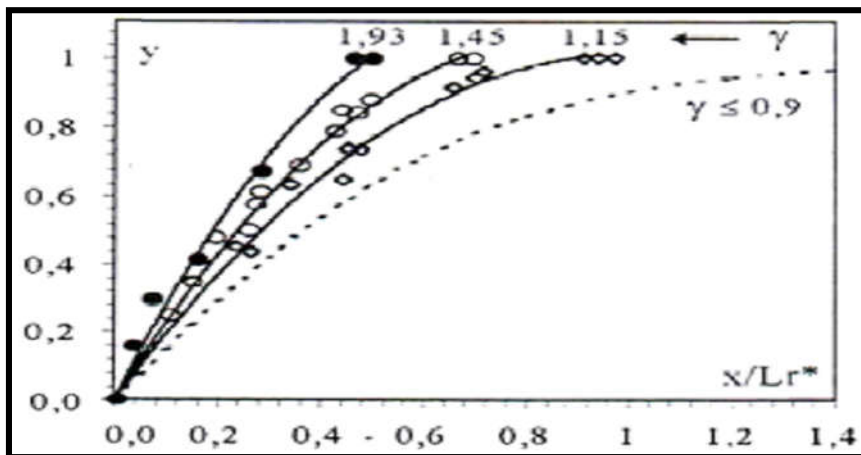


Figure (3.2) : Variation expérimentales du profil de surface ($y=f(X)$) du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite rectangulaire, pour trois rapports intermédiaires de compacité. (—) courbes d'ajustements. (---) courbe selon l'équation $y=Tan_h(1,5X)$.

La courbe en trait correspondant au profil du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$) possède une allure courbée, celle-ci se redresse progressivement en allant vers un rapport γ de compacité supérieur, jusqu'à ce qu'elle avoisine une forme linéaire pour un fort rapport de compacité ($\gamma=1,93$). L'analyse des mesures expérimentales a permis d'aboutir à une équation généralisée tenant compte du rapport γ de compacité du ressaut.

Les points expérimentaux se situent alors sur une courbe d'équation :

$$y = \text{Tan}_h[(2\gamma - 0.3)X] \quad (3.3)$$

III.2.3 Profil de surface généralisé du ressaut dans un canal trapézoïdal (Compacité du ressaut), (Zaid, 2015) :

Pour la gamme de h_1 variant de 2 à 5 cm, nous avons représenté le profil de surface généralisé $y = f(X)$, telles que : $y = [h(x) - h_1] / [h_2 - h_1]$, $X = x/L_r$.

La figure (2.3) représente les profils de surface du ressaut relatifs à chaque valeur de compacité du ressaut, à savoir : $\gamma \leq 0.9$, $\gamma = 0.96$, $\gamma = 1.07$, $\gamma = 1.18$, $\gamma = 1.29$, $\gamma = 1.40$.

La figure (3.3) nous montrent que les points expérimentaux s'ajustent au tour d'une courbe de tangente hyperbolique de la forme $y = a * \text{Tan}_h (b.X)$.

La courbe en trait correspondant au profil du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$) possède une allure courbée, celle-ci se redresse progressivement en allant vers un rapport γ de compacité supérieur, jusqu'à ce qu'elle avoisine une forme linéaire pour un fort rapport de compacité.

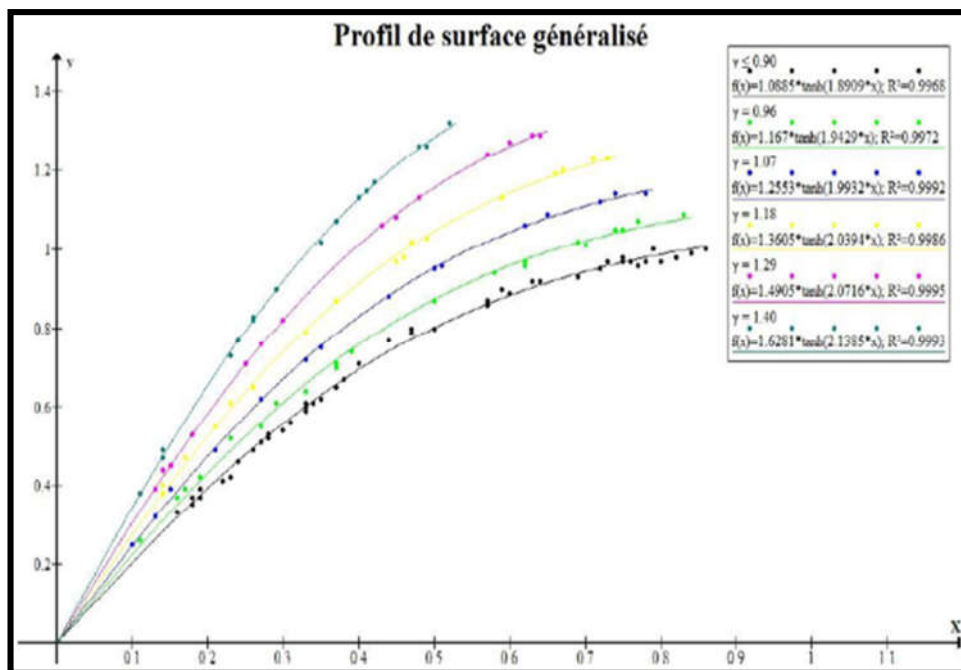


Figure (3.3): Variation expérimentales du profil de surface [$y = f(X)$] du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite trapézoïdal, pour Cinq rapports de compacité.

(—) courbes d'ajustements.

III.2.4 Profil de surface généralisé du ressaut classique dans un canal triangulaire :

III.2.4.1 Etude de *Hager et Wanoschek (1987)* :

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

Par contre, pour $x=L_j$, correspondant à $X=1$, nous pouvons écrire que $h(x)=h_2$ et $y=1$. Les variables adimensionnelles X et $y(x)$ décrivant le profil de surface du ressaut le long de l'axe longitudinal du canal sont telles que $0 \leq X \leq 1$ et $0 \leq y \leq 1$.

La Figure (3.4) représente les mesures expérimentales de *HAGER et WANOSCHEK (1987)* concernant le profil de surface généralisé du ressaut en canal triangulaire le long de l'axe longitudinal du canal.

Les points de mesures, obtenus pour $6,8 \leq F_1 \leq 11,8$; se situent ainsi sur une courbe d'équation approchée :

$$y(X) = (1 + \alpha X) \cdot \text{Tan}_h (\beta X) \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (3.4)$$

Avec : Tan_h : désigne la tangente hyperbolique.

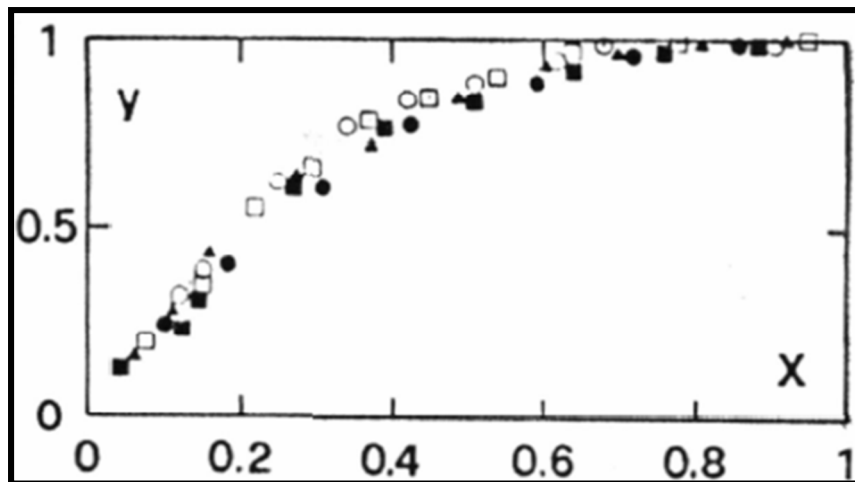


Figure (3.4) : Profil de surface généralisé $Y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ($m = 1$), selon *HAGER et WANOSCHEK (1987)*.

III.2.5 Profil de surface généralisé du ressaut en canal profil en “U” :

III.2.5.1 Etude de *Debabeche et Achour (2000)* :

Comme pour le ressaut rectangulaire, l'expérimentation a permis de définir le profil de la surface libre du ressaut depuis son origine jusqu'à sa section finale dans un canal profilé en “U”.

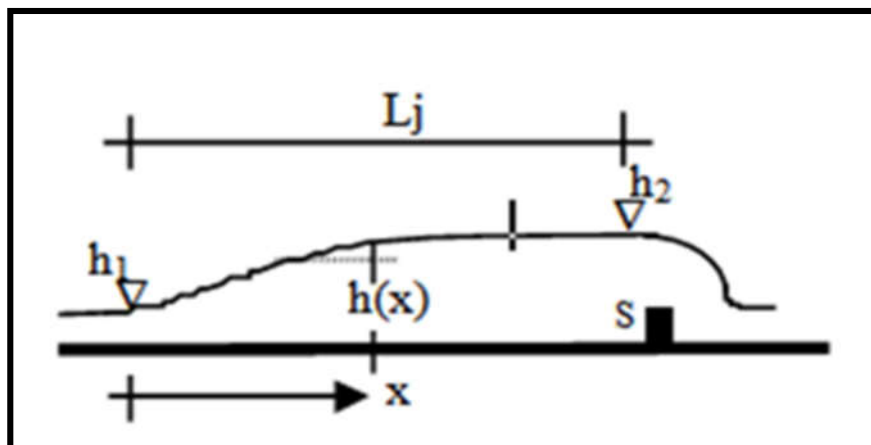


Figure (3.5) : Profil de surface du ressaut.

Comme le montre le schéma simplifié de la figure (3.5), la coordonnée longitudinale x est telle que $0 \leq x \leq L_j$, tandis que la profondeur $h(x)$ est telle que $h_1 \leq h(x) \leq h_2$; h_1 et h_2 sont les hauteurs conjuguées du ressaut.

Les paramètres x et $h(x)$ peuvent servir à composer les variables adimensionnelles y et X , en écrivant que $y = (h(x) - h_1(x)) / (h_2 - h_1)$ et $X = x/L_j$, les variables adimensionnelles y et X sont telles que $0 \leq y \leq 1$ et $0 \leq X \leq 1$.

La variation du rapport y en fonction du rapport X est représentée à la figure (3.5).

Cette figure montre à la fois les points de mesures expérimentales et la courbe tracée par application de la relation :

$$y = \sin(1.5X) \quad (3.5)$$

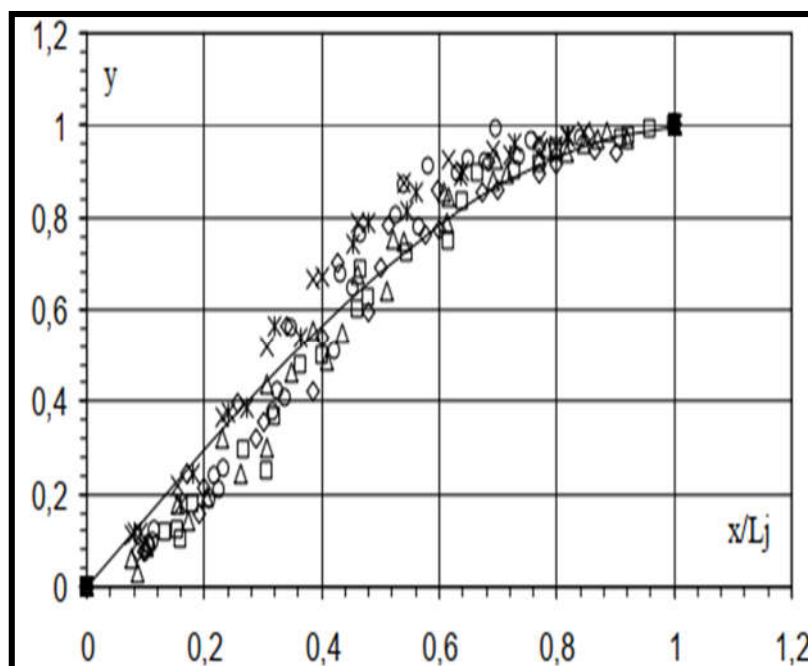


Figure (3.6) : Profil de surface généralisé du ressaut contrôlé dans un canal profilé en “U”, pour différentes hauteurs initiales h_1 : (\diamond) 2, (Δ) 2.32, (x) 3.3, (o) 5, (\square) 6. (\square) courbe selon l’équation (3.5).

La figure (3.6) montre que le nuage de points issu de l'expérimentation peut être représenté par la relation (3.5).

Bien que, l'étude expérimentale a montré que les caractéristiques du ressaut évoluant dans un canal profilé en “U”, présentent une certaine dépendance de la hauteur initiale h_1 (ou hauteur relative amont y_1), le nuage de point montre que ce n'est pas le cas pour le profil de surface généralisé. Comme pour un ressaut rectangulaire, la relation $y = f(X)$ ne dépend pas de la hauteur initiale h_1 .

III.3 Conclusion :

Le troisième chapitre, a permis d'examiner les principaux travaux concernant le profil de surface dans différents types de canaux à savoir : le canal rectangulaire (*Debabeche, 2003*) et (*Hager et Sinniger, 1989*) ; le canal trapézoïdal (*Zaid, 2015*) pour cinq rapports de compacité γ ; le canal en “U” (*Debabeche et Achour, 2000*) et le triangulaire (*Hager et Wanoschek, 1987*).

**Conclusion de la
première partie**
b1Gw!9rE b9r116

Conclusion de la partie bibliographique :

Cette première partie de notre étude a eu pour objectif de passer en revue l'état des connaissances des principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique. A travers trois chapitres :

Le premier chapitre a eu pour but d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Trois types de ressaut ont été étudiés :

_ **Le ressaut hydraulique classique** : où nous avons mis l'accent sur les travaux de *Hager & Bretz (1990)*, relatif aux caractéristiques du ressaut classique. Nous avons appliqués l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre ses sections initiale et finale, en négligeant les pertes de charge autres que celles dues au ressaut, mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement.

_ **Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil** : nous avons cité les travaux de *Forster et Skrinde (1950)* concernant le seuil à paroi mince et épaisse. Ensuite, on a examiné l'étude de *Achour et al (2002)*, qui ont abouti à proposer des relations empiriques permettant le calcul de la hauteur relative S du seuil en fonction de la position relative x/h_2 de celui-ci et de nombre de **Froude** F_1 de l'écoulement incident.

Enfin, concernant **le ressaut hydraulique forcé par seuil mince**, les travaux de *Rand (1957)* ont fait l'objet de notre étude bibliographique. L'auteur a élaboré une relation entre la hauteur du seuil et sa position et ce, pour faire la classification du ressaut forcé en **10 cas** typiques.

Le deuxième chapitre de notre étude est consacré au ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal, celui-ci est divisé en deux axes ressaut hydraulique symétrique et ressaut hydraulique asymétrique :

Dans le premier axe nous avons mis l'accent sur les travaux de *Hager & Wanoschek (1987)* qui ont étudié le comportement du ressaut, l'étude porte aussi sur le rapport des hauteurs conjuguées Y qui varié en fonction de nombre de **Froude** amont F_1 et de rapport de forme M . Dans cette étude les auteurs ont découvert pour la première fois, l'existence d'un rouleau du fond dont les caractéristiques ont été définit.

Le cas du canal trapézoïdal symétrique est le plus général : par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut, nous avons déterminé la relation des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 et nous avons déduit le cas du canal rectangulaire et triangulaire. La même chose pour la détermination du rendement du ressaut, mais pour ce cas, l'application du théorème de Bernoulli est nécessaire.

Dans le deuxième axe nous avons présentés le travaux d'*Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954)*, *Hubert Chanson, Kiri Urvisha et Leng Xinqian (2018)* dans un canal trapézoïdale asymétrique.

Le troisième chapitre, nous avons présentés plusieurs travaux organisés par des chercheurs (*Hager & Sinniger, 1989*) ; (*Debabeche, 2003*) ; (*Zaid, 2015*) ; (*Hager et Wanoschek, 1987*) et (*Debabeche & Achoure, 2000*) sur le profil de surface dans quelques types des canaux.

Deuxième partie

Etude expérimentale

Chapitre I :

Description du processus expérimentale

I. Description du processus expérimentale :

I.1 Introduction :

Avant d'aborder les résultats expérimentaux, nous allons exposer une description détaillée du modèle expérimental, et faire la description des différents appareillages des mesures utilisées.

I.2 Description du dispositif :

. Nous disposons d'un canal d'essai qui se trouve au laboratoire d'hydraulique (**laboratoire LARGHYDE**), de l'université de **Biskra**. C'est un dispositif utilisé pour des essais d'envergure sur le thème de l'écoulement dans les canaux ouverts.

Ce dernier possède une section d'écoulement non rectangulaire d'une largeur de « **29.3 cm** » par « **7m** » de longueur avec un circuit d'eau fermé. Il est constitué d'une série de « **7** » panneaux transparent en verre permettant les prises de vue et observations. Ces panneaux sont reliés entre eux par collage au chloroforme. Le tout est fixé par boulonnage à une structure métallique rigide. L'étanchéité est assurée par des joints en caoutchouc et par la **silicone** Figure (1.1) et Figure (1.2).

Le fond est incliné transversalement d'une pente de $\frac{1}{3}$, Figure (1.3) et Figure (1.4). Un bassin d'alimentation Figure (1.5) et Figure (1.6), est relié à une pompe centrifuge Figure (1.7) et Figure (1.8). Celle-ci aspire de l'eau d'un réservoir ouvert de récupération et la refoule dans un bassin, également ouvert, alimentant le canal. Le système bassin de récupération-pompe-canal est relié par une conduite circulaire en PVC d'un diamètre de **115mm**.



Figure (1.1): Photographie du modèle expérimentale du canal non rectangulaire.

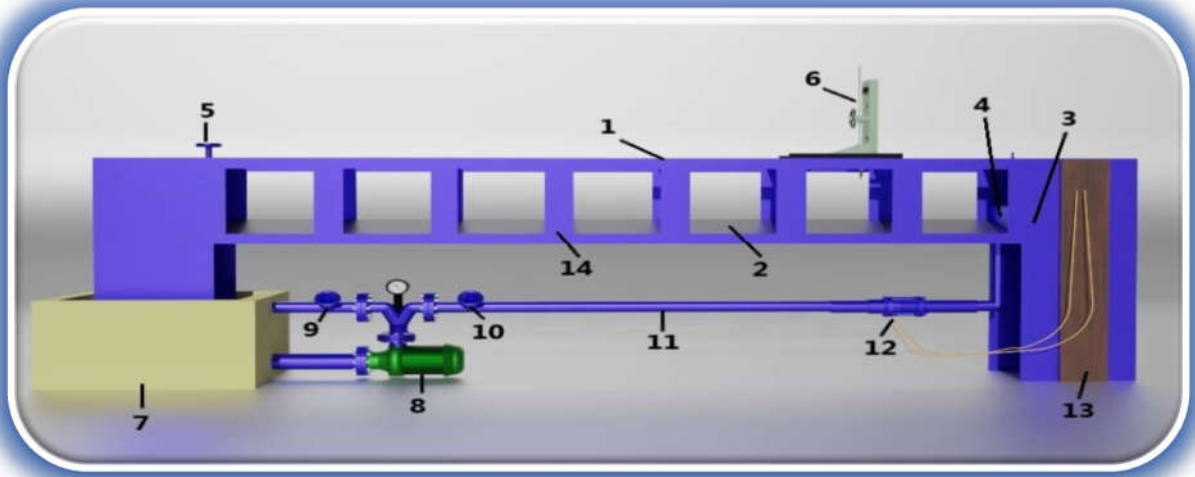


Figure (1.2): Schématisation 3D du modèle expérimentale du canal non rectangulaire.

La légende :

- | | |
|---|---------------------------------------|
| 1_ Canal non rectangulaire de 7m ; | 8_ Pompe centrifuge axiale ; |
| 2_ Fond incliné du canal ($1/3$) ; | 9_ Vanne de régulation de débit ; |
| 3_ Convergent triangulaire ; | 10_ Vanne de refoulement ; |
| 4_ Vanne de fond mobile en amont ; | 11_ Conduite en PVC ; |
| 5_ Vanne levante en aval ; | 12_ Diaphragme et Prise de pression ; |
| 6_ Limnimètre ; | 13_ Manomètre différentiel ; |
| 7_ Bassin d'accumulation avec un tranquillisateur ; | 14_ Baromètre. |



Figure (1.3): Photographie du fond du canal non rectangulaire.

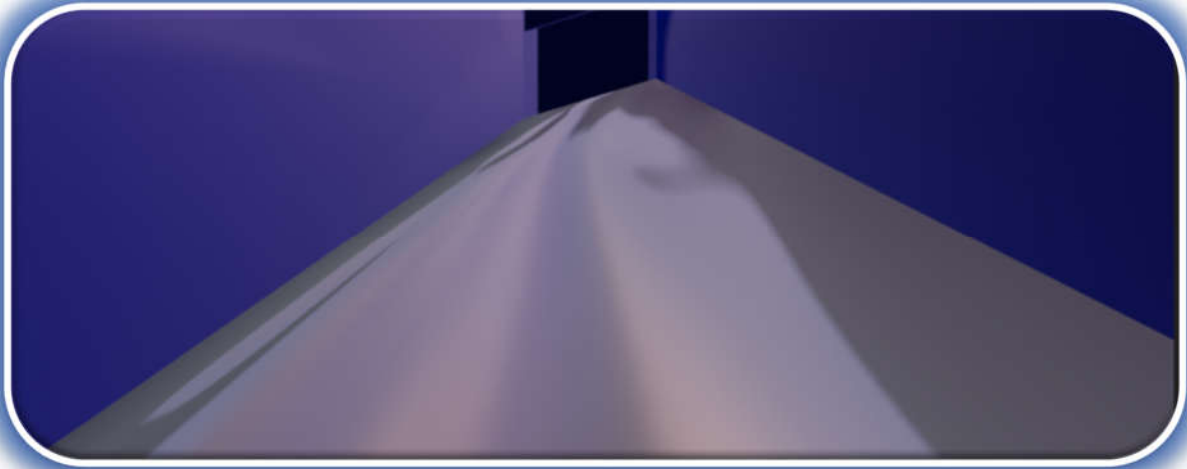


Figure (1.4): Schématisation 3D du fond du canal non rectangulaire.



Figure (1.5): Photographie du bassin d'alimentation.

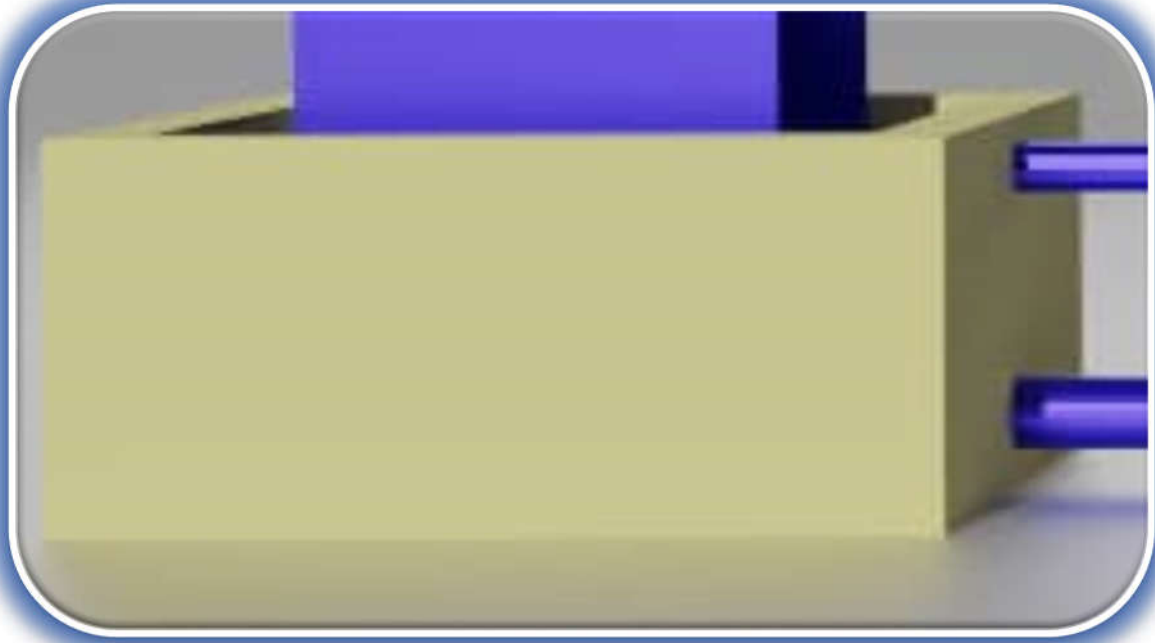


Figure (1.6) : Schématisation 3D du bassin d'alimentation.



Figure (1.7): Photographie de pompe centrifuge axiale.

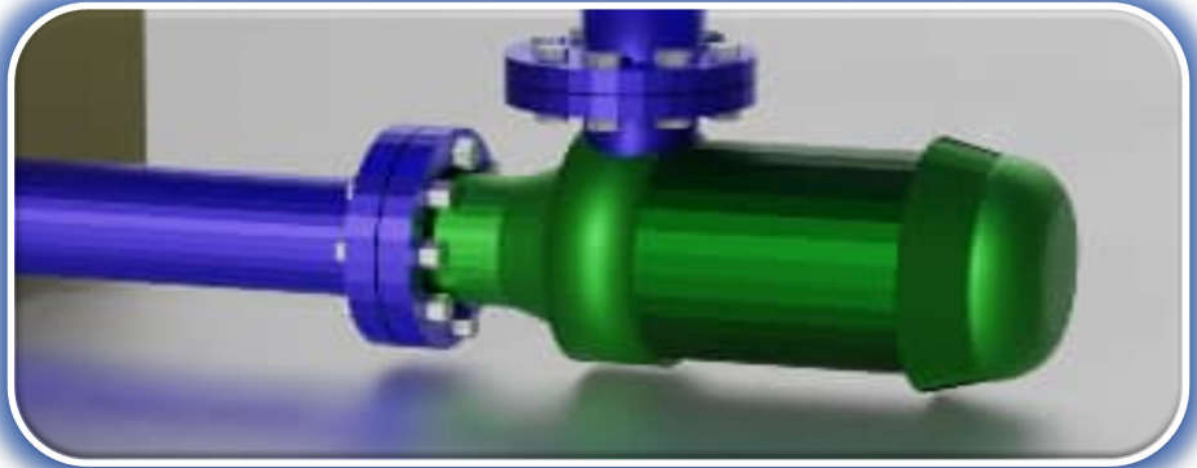


Figure (1.8): Schématisation 3D de pompe centrifuge axiale.

Le canal non rectangulaire est relié, dans sa partie amont à une vanne réglable reliés à un convergent, l'ouverture est de forme trapézoïdale. La hauteur de l'ouverture se varie entre **8cm et 11cm**. Figure (1.9), Figure (1.10).



**Figure (1.9): Photographie
du convergent.**



**Figure (1.10): Schématisation 3D
du convergent.**

Le canal est relié dans sa partie aval à une vanne mobile métallique Figure (1.11), Figure (1.12), le rôle de cette vanne est de régler la hauteur d'eau dans le canal et de positionner le ressaut hydraulique à l'abscisse voulue.



**Figure (1.11): Photographie de
de la vanne levante**



**Figure (1.12): Schématisation 3D
de la vanne levante.**

Le réglage des débits volume s'effectue par une deux vanne Figure (1.13), (1.14).



Figure (1.13): Photographie des deux vannes.



Figure (1.14): Schématisation 3D des deux vannes.

I.3 Appareillage des mesures :

Afin de réaliser nos essais expérimentaux, un appareillage de mesures a été utilisé, dont un débitmètre à diaphragme, pour mesurer les différents débits pris, et un limnimètre pour mesurer la hauteur de l'eau.

I.3.1 Mesure des débits :

Les débits ont été mesurés à l'aide d'un débitmètre à diaphragme, qui est considéré comme un dispositif destiné à la mesure des débits dans les conduites en charge.

Sur la conduite d'alimentation, un débitmètre à diaphragme a été installé Figure (1.15), ce dernier se compose de deux ménisques (a), qui sont reliés par deux tubes piézométriques (manomètre différentiel) et fixés sur un plan verticale, entre ces deux tubes une règle graduée a été fixée, afin de nous permettre de lire la différence de niveau Δh dans les tubes (b).



a_ Ménisques dans les tubes manométriques ;

b_ Manomètre différentiel ;

Figure (1.15): Débitmètre à diaphragme.

I.3.1.1 Méthodologie de mesure de débit :

Les mesures de débit sont effectuées à deux étapes parallèles :

1_ Première étape : mesurer le débit volume par la méthode volumétrique (récipient et chronomètre).

2_ Deuxième étape : lire simultanément la différence « Δh » des côtes des deux ménisques dans les tubes manométriques, puis on augmente le débit par la vanne de régulation, et on répète la même procédure. Les résultats sont présentés et détaillés dans le tableau suivant :

Essais N°	Δh (cm)	Δh (m)	t_{moy} (s)	V (l)	V (m ³)	Q (l/s)	Q (m ³ /s)
1	0.6	0.006	20.52	33	0.033	1.608	0.001608
2	0.7	0.007	17.66	33	0.033	1.869	0.001869
3	1.4	0.014	13.41	33	0.033	2.461	0.002461
4	2.2	0.022	9.39	33	0.033	3.514	0.003514
5	4.1	0.041	8.56	33	0.033	3.855	0.003855
6	7.7	0.077	12.49	85	0.085	6.805	0.006805
7	11.4	0.114	11.99	85	0.085	7.089	0.007089
8	14.5	0.145	10.02	85	0.085	8.483	0.008483
9	19	0.19	10.48	100	0.1	9.542	0.009542
10	23.1	0.231	9.23	100	0.1	10.834	0.010834
11	31.1	0.311	8.41	100	0.1	11.981	0.011891
12	42.5	0.425	6.22	100	0.1	16.077	0.016077

Tableau (1.1): Valeurs des mesures du débit par l'étalonnage.

L'étalonnage du débitmètre a été effectué pour des débits volumes tel que : $1.608 \leq Q \leq 16.077$.

Ces considérations montrent que pour un diaphragme donné, le débit volume Q peut s'écrire $Q = a * \Delta h^b$, où a et b sont des constantes, en notant que cette dernière est théoriquement égale à 0.6 à chaque débit volume passant par le diaphragme correspond une différence de cotes Δh . Les débits volumes Q ont été mesurés par la méthode volumétrique.

Les couples des valeurs $(Q, \Delta h)$ obtenus ont fait l'objet d'un ajustement puissance par la méthode des moindres carrés non linéaire Figure (1.16).

La courbe d'étalonnage issue des mesures expérimentales répond à la formule :

$$Q = 0.02218 * \Delta h^{0.5082} \quad (1.1)$$

avec : * Q : Le débit en (m^3/s).

* Δh :La différence de niveau en (m).

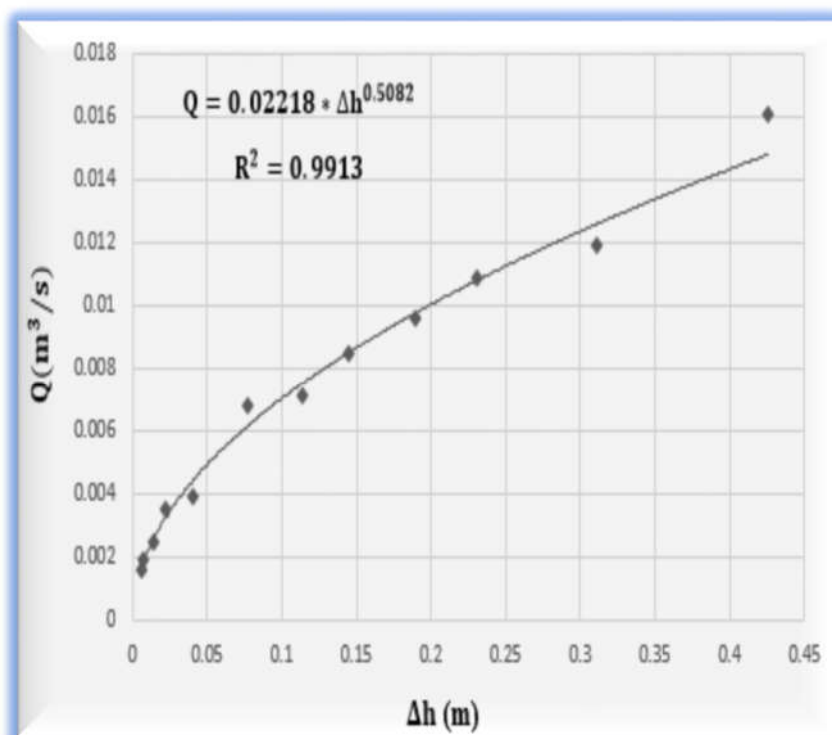


Figure (1.16): Courbe expérimentale de la relation en $Q(m^3/s)$ fonction de Δh (m).

Expérimentalement et dans le laboratoire : Nous ouvrons les deux vannes : la vanne de régulation de débit et la vanne de refoulement, sachant que la vanne de débit reste ouverte et celle de refoulement change d'instant (ouverture approximative). A l'aide du manomètre, on lit les hauteurs h_1 et h_2 , la différence entre elles présente Δh .

Le débit donc sera calculée à partir de l'équation (1.1), en remplaçant la valeur de Δh dans cette équation.

I.3.2 Mesure des hauteurs de la surface libre :

Comme nous l'avons souligné dans l'introduction, les profondeurs de la surface libre sont mesurées à l'aide d'un limnimètre à vernier à double précision Figure (1.17), Figure (1.18).



Figure (1.17): Photographie du limnimètre à vernier

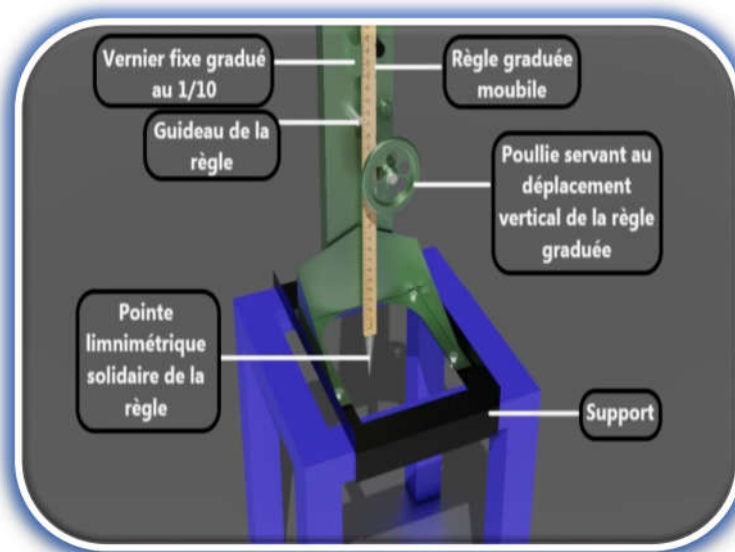


Figure (1.18): Schématisation 3D de l'instrument « limnimètre ».

I.3.2.1 Limnimètre :

Le limnimètre, Figure (1.17) est l'élément de base des dispositifs de lecture et d'enregistrement du niveau de l'eau ; l'instrument est formé d'une règle métallique profilée en « U » et graduée sur une seule face. Elle est munie, à sa partie inférieure d'une pointe verticale est appelée de pointe **limnimétrique**, dont le rôle est d'effleurer la surface de l'eau.

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 du 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.

La hauteur de l'eau sur le canal a été calculée par la relation suivante :

$$h = L \text{ surface libre} - L \text{ profondeur de l'eau}$$

Où,

h, Hauteur de la surface libre sur le canal en (mm) ;

L profondeur de l'eau, Lecture sur le limnimètre de la profondeur du canal ;

L surface libre, Lecture sur le limnimètre de la surface libre.

Vu que le canal d'étude est de forme non rectangulaire, cela signifie qu'il y a un côté plus profond et un autre moins profond, le limnimètre a été placé au milieu du canal (entre les deux côtés).

Les mesures de la hauteur de la surface libre ont été prise sur plusieurs points (**1m,1.5m,2m,2.5m, 3m, 3.5m,4m, 4.5m, 5m, 5.5m, 6m**), le début du ressaut hydraulique a été toujours fixé à **2 m** en aval de la vanne en amont Figure (1.19).

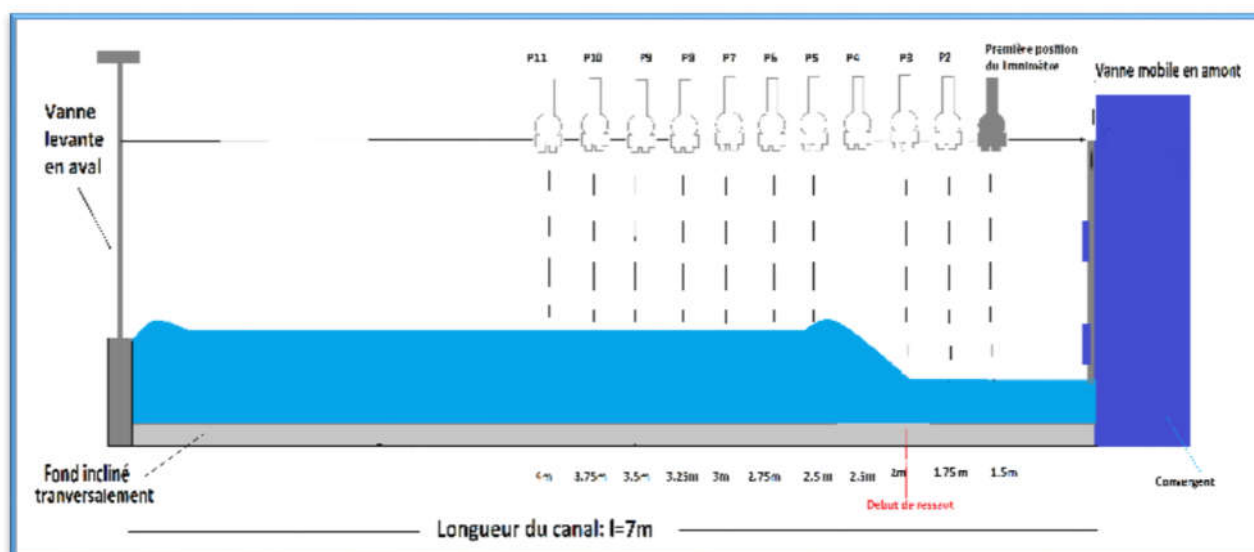


Figure (1.19): Positions du limnimètre sur le canal non rectangulaire.

I.4 Conclusion :

Un dispositif expérimental permettant de mener les essais sur le ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire est expliqué dans ce chapitre.

Ce dernier a été consacré à la description du modèle expérimental, de l'appareillage de mesure utilisé et de la description des essais.

En premier lieu, on a présenté le modèle expérimental et son fonctionnement en détail, et à l'aide des schémas et des photographies.

En deuxième lieu, les appareils de mesure ont été décrits, ainsi que le mode d'emploi des instruments qui a été bien clarifié en s'appuyant sur des schémas et des photographies.

Enfin, on a abordé la procédure expérimentale et les techniques utilisées dans la prise des mesures de différents paramètres du ressaut.

Chapitre II :

Etude expérimentale

II. Etude expérimentale :

II.1 Introduction :

Ce chapitre a pour déterminer expérimentalement le profil de la surface du ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire asymétrique pour différentes ouvertures. La formation du ressaut est conditionnée par la rotation de la vanne en aval du canal.

II.2 Procédure expérimentale :

L'objet de notre étude expérimentale est l'analyse, le ressaut hydraulique évoluant dans un canal non-rectangulaire asymétrique. L'expérimentation a été menée sur six ouvertures (**8cm, 8.5cm, 9cm, 9.5cm, 10cm, 10.5cm**), figure (2.1), la formation du ressaut a été menée par quatre « 04 » débits par ouverture, une fois la position du ressaut obtenue on mesure les hauteurs à chaque position, figure (1.9).

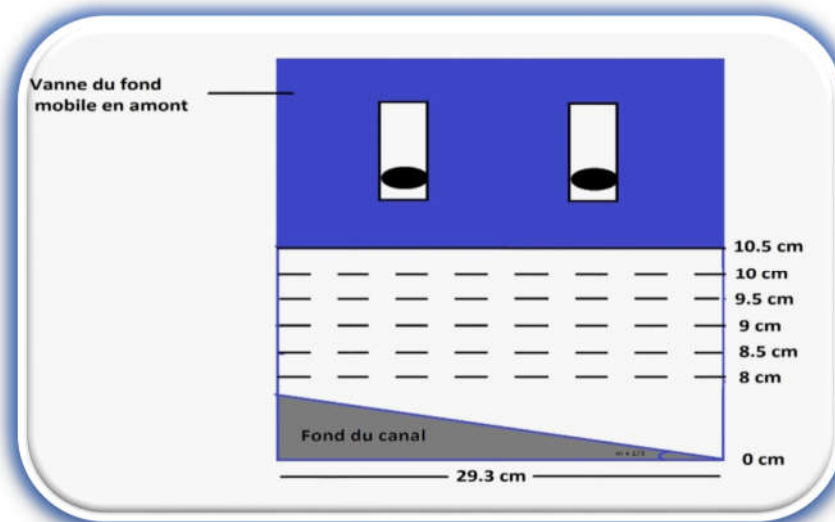


Figure (2.1) : Hauteur des ouvertures sur le canal non-rectangulaire.

II.3 Exploitation et analyse des résultats expérimentaux :

Les résultats récoltés au cours des différents processus expérimentaux sont alors les débits calculés par le débitmètre à diaphragme, les hauteurs de surfaces libres mesurées à l'aide d'un limnimètre positionné sur 11 positions de 1.5m à 4m avec une marge de 0.25m, sur le modèle physique, figure (1.19). Dans cette étape, on va présenter pour toutes la gamme étudiée les graphes de : la variation de la hauteur h_1 en fonction du débit, la variation de la hauteur h_2 en fonction du débit, la variation du profil de surface du ressaut $f=h(x)$ et le rapport $Y = (h_2/h_1)$ en fonction du nombre de Froude.

II.3.1 Variation de la hauteur h_1 en fonction du débit pour toute la gamme :

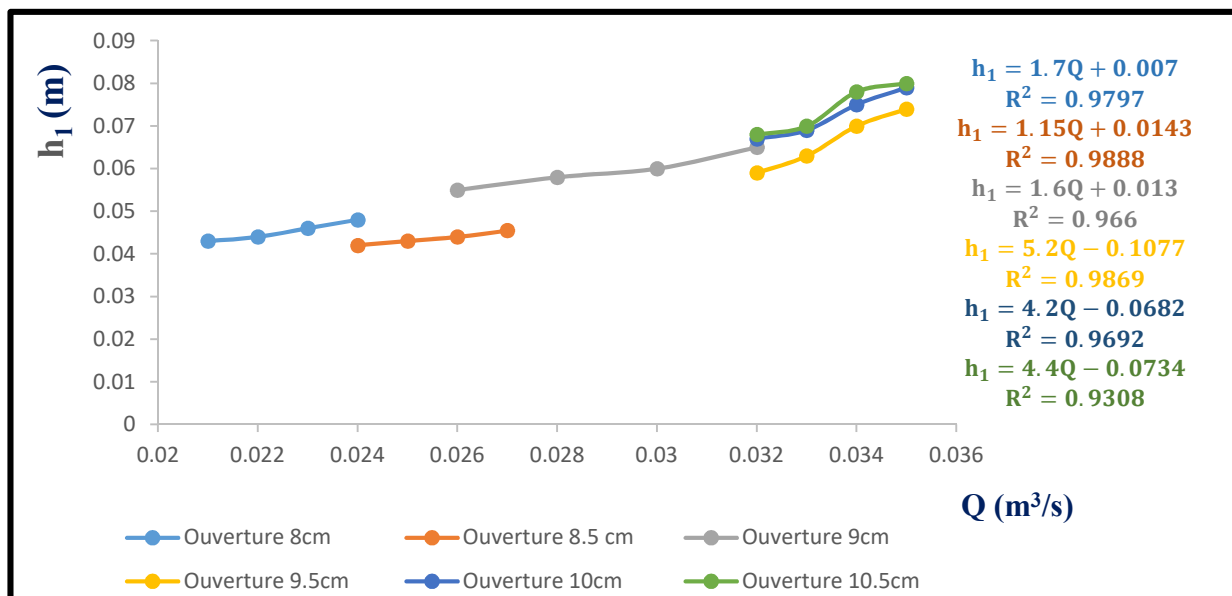


Figure (2.2) : Variation de la hauteur h_1 en fonction du débit pour toute la gamme.

La figure (2.2) représente les hauteurs de la surface libre au pied du ressaut hydraulique h_1 soit les hauteurs initiales conjuguées en fonction du débit. On observe que pour chaque ouverture, les valeurs de h_1 mesurées augmentent avec l'augmentation du débit.

D'après la figure (2.2), on constate que pour toutes les ouvertures testées, les valeurs de la hauteur conjuguée initiale h_1 , augmente proportionnellement avec les valeurs du débit volume Q .

D'autre part, l'analyse de la figure (2.2), montre que les points de mesures s'ajustent pour chaque valeur d'ouverture autour d'une courbe linéaire et suivent la forme: $h_1 = aQ + b$.

II.3.2 Variation de la hauteur h_2 en fonction du débit pour toute la gamme :

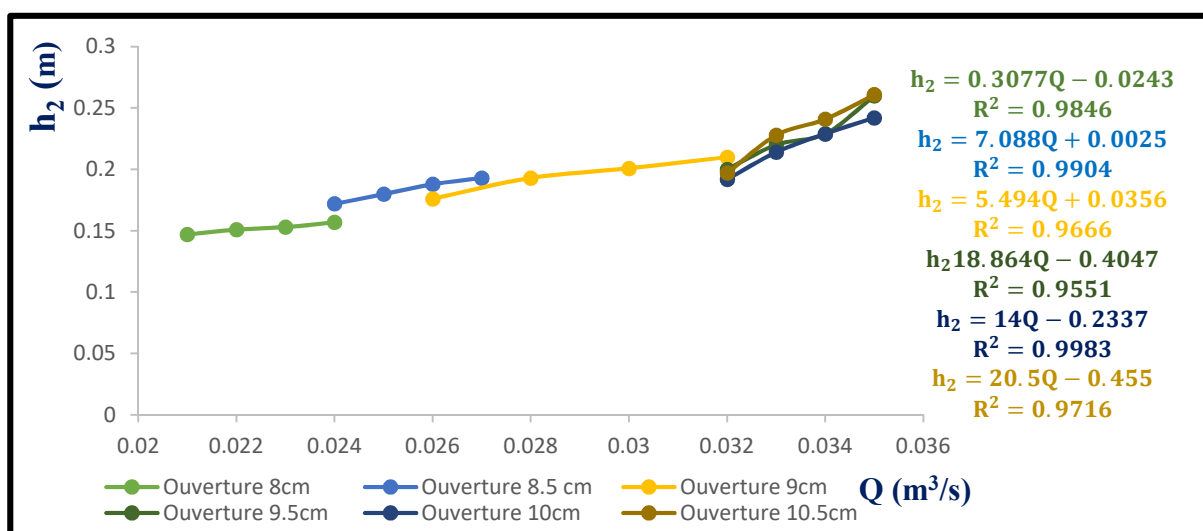


Figure (2.3) : Variation de la hauteur h_2 en fonction du débit pour toute la gamme.

La figure (2.3) représente les hauteurs conjuguées finales de la surface libre h_2 à la fin du ressaut) en fonction du débit, pour toute la gamme des ouvertures étudiées. On observe que pour chaque ouverture étudiée, la hauteur de la surface libre à la fin du ressaut soit la hauteur conjuguée finale h_2 s'accroît avec l'accroissement du débit.

D'après la figure (2.3), on constate que pour toutes les ouvertures testées, les valeurs de la hauteur conjuguée finale h_2 , augmente proportionnellement avec les valeurs du débit volume Q .

D'autre part, l'analyse de la figure (2.3), montre que les points de mesures s'ajustent pour chaque valeur d'ouverture autour d'une courbe linéaire et suivent la forme: $h_2 = aQ + b$.

II.3.3 Variation du profil de surface du ressaut hydraulique $f = h(x)$ pour toutes les ouvertures :

II.3.3.1 Ouverture n°01 « 8 cm » :

Comme nous l'avons souligné dans la procédure expérimentale, les débits de l'ouverture « 8 cm » montrent dans la figure (2.4).

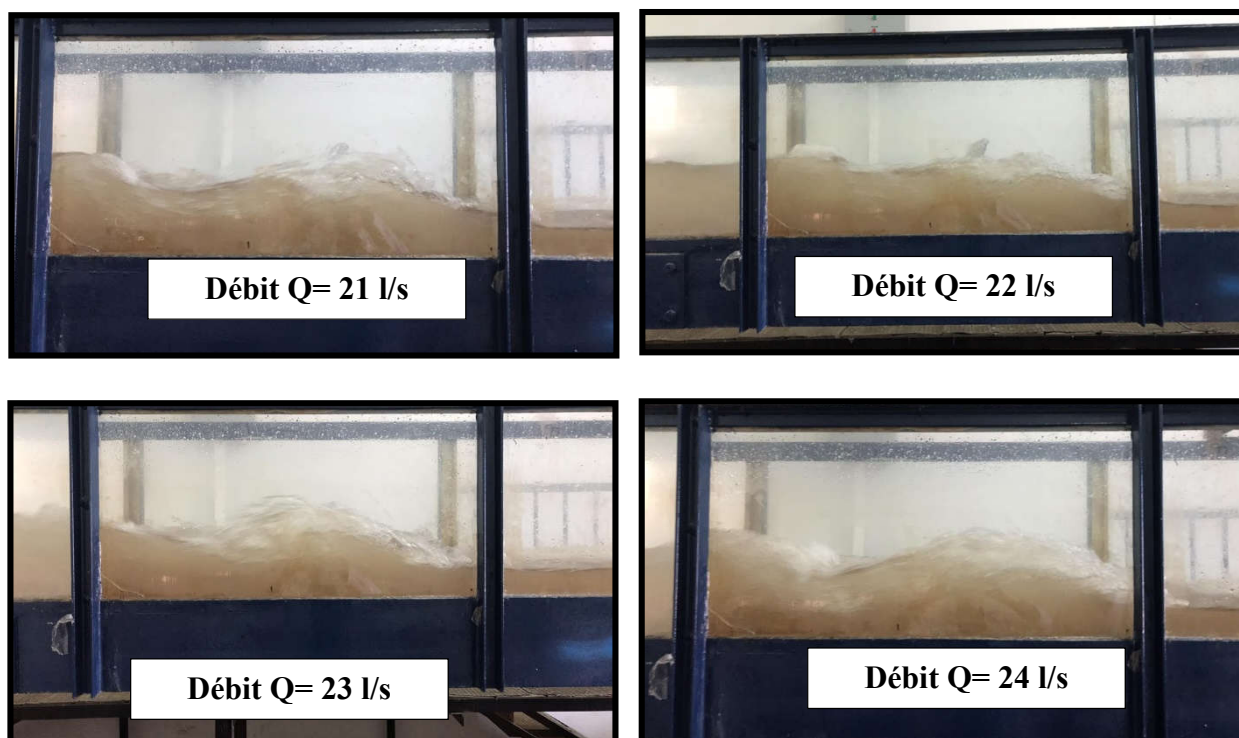


Figure (2.4) : Ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire (ouverture 8 cm).

La figure (2.5) montre que la variation du profil de surface du ressaut hydraulique $f = h(x)$, pour quatre « 04 » débits, tels que : $Q_1 = 21 \text{ l/s}$; $Q_2 = 22 \text{ l/s}$; $Q_3 = 23 \text{ l/s}$ et $Q_4 = 24 \text{ l/s}$.

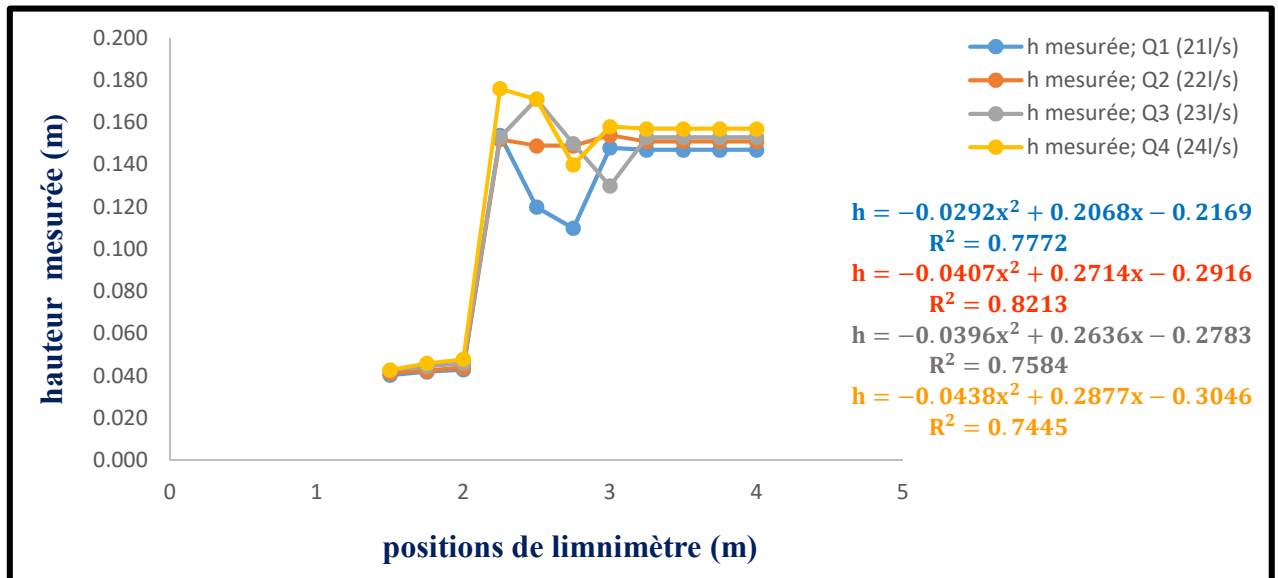


Figure (2.5) : Variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f = h(x)$ pour une ouverture de 8 cm.

Les données ayant servi au traçage de figure (2.5) sont regroupées au tableau (2.1) :

Debits (l/s) Limni (m)	Q= 21 l/s	Q= 22 l/s	Q= 23 l/s	Q= 24 l/s
Limni 1 : 1.5	0.04	0.041	0.042788	0.042888
Limni 2 : 1.75	0.042	0.043	0.0446	0.046
Limni 3 : 2	0.043	0.044	0.046	0.048
Limni 4 : 2.25	0.154	0.152	0.153	0.176
Limni 5 : 2.5	0.120	0.149	0.171	0.171
Limni 6 : 2.75	0.110	0.149	0.150	0.140
Limni 7 : 3	0.148	0.154	0.130	0.158
Limni 8 : 3.25	0.147	0.151	0.153	0.157
Limni 9 : 3.5	0.147	0.151	0.153	0.157
Limni 10 : 3.75	0.147	0.151	0.153	0.157
Limni 11 : 4	0.147	0.151	0.153	0.157

Tableau (2.1) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.5).

La figure (2.5) représente la variation du profil de surface du ressaut sur le canal non rectangulaire pour l'ouverture **8 cm**. La figure (2.5) montre que les points expérimentaux se présentent sous forme de quatre (04) nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée du débit révélant ainsi l'influence de celui-ci sur le profil de surface du ressaut.

D'autre part, l'analyse de la figure (2.5), montre que les points de mesures s'ajustent pour chaque valeur de débit autour d'une courbe d'une équation du deuxième degré et suivent la forme: $h_2 = a.Q^2 + b.Q + c$.

Les ressauts hydrauliques formés pour tous les débits **21 l/s**, **22 l/s**, **23 l/s** et **24 l/s**, sont de forme des vagues, où on observe que la hauteur de la surface libre reste presque stable de **1.5 m** jusqu'au pied du ressaut (**2 m**), la hauteur de l'eau augmente brusquement à **2 m**.

Pour les débits **21 l/s**, **22 l/s** et **24 l/s** ; le premier pique a été marqué à **2.25 m**, le deuxième à **3 m**, enfin la stabilisation à partir de **3.25 m** et pour le reste du canal.

Pour le débit **23 l/s**, un premier pique a été marqué à **2.5 m**, un deuxième à **3.25 m** puis la stabilisation pour le reste du canal.

Nos mesures montrent que pour une même valeur de position "x", la hauteur d'eau augmente lorsque **Q** augmente ; on constate ainsi que le débit influe sur le profil de surface du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique

II.3.3.2 Ouverture n°02 « 8.5 cm » :

La figure (2.4) montre la forme du ressaut hydraulique pour une ouverture « 8.5 cm », pour quatre (04) débits, tels que :

$$Q_1 = 24 \text{ l/s} ; Q_2 = 25 \text{ l/s} ; Q_3 = 26 \text{ l/s} \text{ et } Q_4 = 27 \text{ l/s}.$$





Figure (2.6): Ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire (ouverture 8.5 cm).

La figure (2.7) montre que la variation du profil de surface du ressaut hydraulique $f= h(x)$, pour les débits mentionnés ci-dessus.

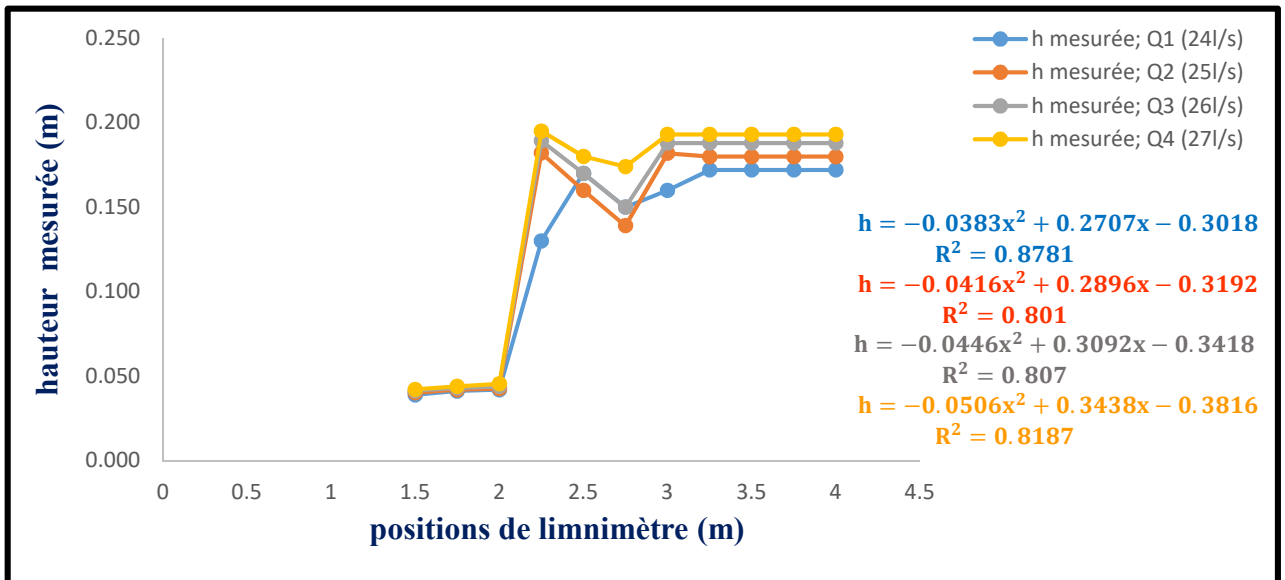


Figure (2.7): Variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f= h(x)$ pour une ouverture de 8.5 cm.

Les données ayant servi au traçage de figure (2.7) sont regroupées au tableau (2.2).

Debits (l/s) / Limni (m)	Q= 24 l/s	Q= 25 l/s	Q= 26 l/s	Q= 27 l/s
Limni 1 : 1.5	0.039	0.040	0.041388	0.042188

Limni 2 : 1.75	0.041	0.042	0.043	0.044
Limni 3 : 2	0.042	0.043	0.044	0.0455
Limni 4 : 2.25	0.130	0.182	0.1892	0.195
Limni 5 : 2.5	0.170	0.160	0.170	0.180
Limni 6 : 2.75	0.150	0.139	0.150	0.174
Limni 7 : 3	0.160	0.182	0.18788	0.193
Limni 8 : 3.25	0.172	0.180	0.18788	0.193
Limni 9 : 3.5	0.172	0.180	0.18788	0.193
Limni 10 : 3.75	0.172	0.180	0.18788	0.193
Limni 11 : 4	0.172	0.180	0.18788	0.193

Tableau (2.2) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.7).

La figure (2.7) représente la variation du profil de surface du ressaut sur le canal non rectangulaire pour l'ouverture **8.5 cm**. La figure (2.7) montre que les points expérimentaux se présentent sous forme de quatre (04) nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée du débit révélant ainsi l'influence de celui-ci sur le profil de surface du ressaut.

D'autre part, l'analyse de la figure (2.7), montre que les points de mesures s'ajustent pour chaque valeur de débit autour d'une courbe d'une équation du deuxième degré et suivent la forme: $h_2 = a.Q^2 + b.Q + c$.

Les ressauts hydrauliques formés pour tous les débits **24 l/s**, **25 l/s**, **26 l/s** et **27 l/s**, sont de forme des vagues, où on observe que la hauteur de la surface libre reste presque stable de **1.5m** jusqu'au pied du ressaut (**2 m**), (le jet caractérisant (écoulement torrentiel)), la hauteur de l'eau augmente brusquement à **2 m**, (le rouleau).

Pour le débit **24 l/s**, un premier pique a été marqué à **2.5 m**, un deuxième à **3.25 m** puis la stabilisation pour le reste du canal, (écoulement fluvial).

Pour le débit **25 l/s**, un premier pique a été marqué à **2.25 m**, un deuxième à **3** puis la stabilisation à partir de **3.25 m** et pour le reste du canal.

Pour les débits **26 l/s** et **27 l/s**, le premier pique a été marqué à **2.25 m**, le deuxième à **3 m** puis la stabilisation pour le reste du canal.

Nos mesures montrent que pour une même valeur de position "x", la hauteur d'eau augmente lorsque Q augmente ; on constate ainsi que le débit influe sur le profil de surface du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique.

II.3.3.3 Ouverture n°03 « 9 cm » :

La figure (2.6) montre la forme du ressaut hydraulique pour une ouverture « 9 cm », pour quatre (04) débits, tels que :

$$Q_1 = 26 \text{ l/s} ; Q_2 = 28 \text{ l/s} ; Q_3 = 30 \text{ l/s} \text{ et } Q_4 = 32 \text{ l/s}.$$

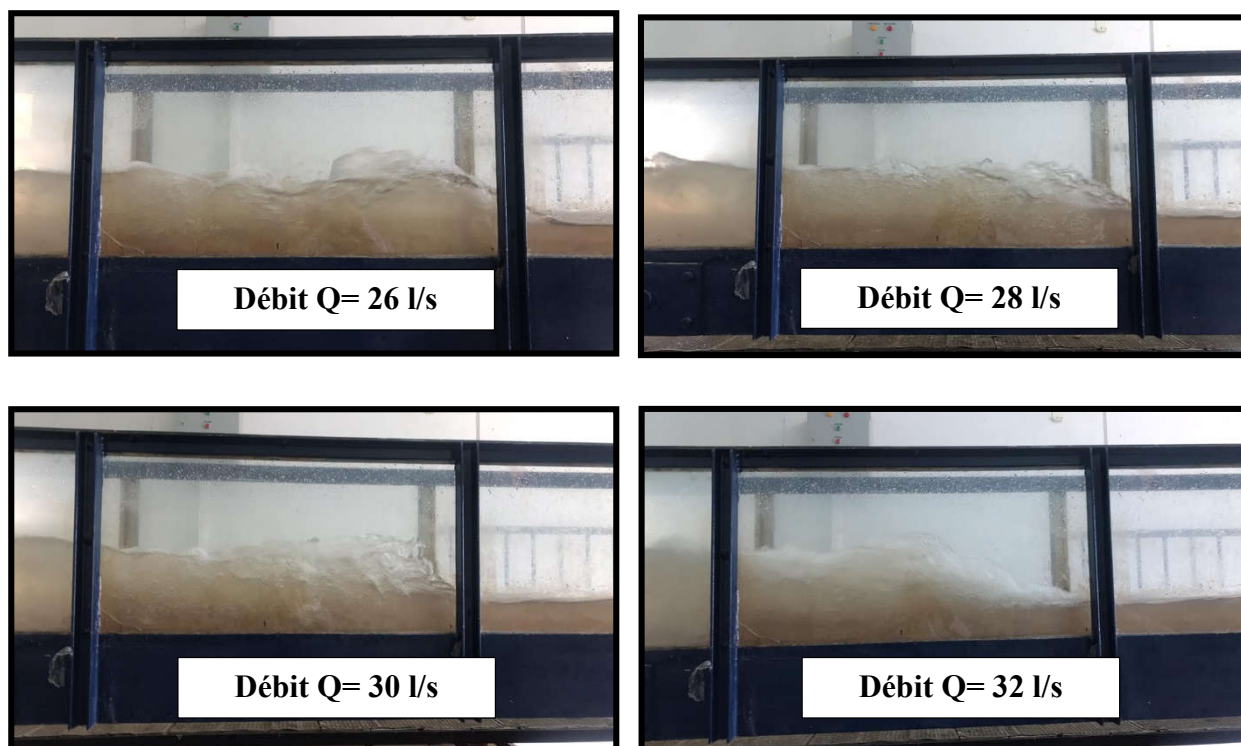


Figure (2.8): Ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire (ouverture 9 cm).

La représentation graphique de la variation du profil de surface du ressaut hydraulique $f = h(x)$, pour les débits mentionnés ci-dessus sur la figure (2.9).

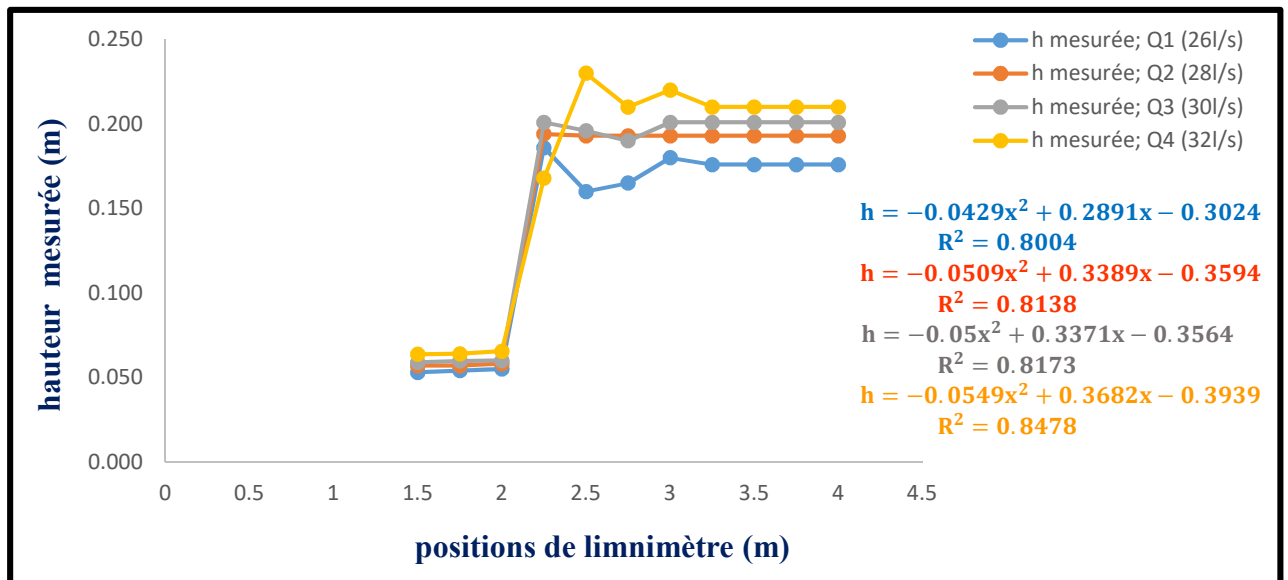


Figure (2.9): Variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f = h(x)$ pour une ouverture de 9 cm.

Les valeurs expérimentales ayant servi au traçage de figure (2.9) sont regroupées au tableau (2.3).

Debits (l/s) / Limni (m)	Q= 26 l/s	Q= 28 l/s	Q= 30 l/s	Q= 32 l/s
Limni 1 : 1.5	0.053	0.057	0.0589	0.064
Limni 2 : 1.75	0.054	0.057	0.0597	0.064
Limni 3 : 2	0.055	0.058	0.060	0.065
Limni 4 : 2.25	0.186	0.194	0.20088	0.168
Limni 5 : 2.5	0.160	0.193	0.196	0.230
Limni 6 : 2.75	0.165	0.193	0.19	0.210
Limni 7 : 3	0.180	0.193	0.20088	0.220
Limni 8 : 3.25	0.176	0.193	0.20088	0.210
Limni 9 : 3.5	0.176	0.193	0.20088	0.210
Limni 10 : 3.75	0.176	0.193	0.20088	0.210

Limni 11 : 4	0.176	0.193	0.20088	0.210
---------------------	--------------	--------------	----------------	--------------

Tableau (2.3): Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.9).

La figure (2.9) représente la variation du profil de surface du ressaut sur le canal non rectangulaire pour l'ouverture **9 cm**. La figure (2.9) montre que les points expérimentaux se présentent sous forme de quatre (04) nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée du débit révélant ainsi l'influence de celui-ci sur le profil de surface du ressaut.

D'autre part, l'analyse de la figure (2.9), montre que les points de mesures s'ajustent pour chaque valeur de débit autour d'une courbe d'une équation du deuxième degré et suivent la forme: $h_2 = a.Q^2 + b.Q + c$.

Les ressauts hydrauliques formés pour les débits **26 l/s**, **30 l/s** et **32 l/s**, sont de forme des vagues, où on observe que la hauteur de la surface libre reste presque stable de **1.5 m** jusqu'au pied du ressaut (**2 m**), la hauteur de l'eau augmente brusquement à **2 m**.

Pour les débits **26 l/s** et **28 l/s**, le premier pique a été marqué à **2.25 m**, le deuxième à **3 m** puis la stabilisation à partir de **3.25 m** et pour le reste du canal.

Pour le débit **30 l/s**, un premier pique a été marqué à **2.25 m**, un deuxième à **3 m** puis la stabilisation pour le reste du canal.

Pour le débit **32 l/s**, un premier pique a été marqué à **2.5 m**, un deuxième à **3 m** puis la stabilisation à partir de **3.25 m** et pour le reste du canal.

Nos mesures montrent que pour une même valeur de position "x", la hauteur d'eau augmente lorsque **Q** augmente ; on constate ainsi que le débit influe sur le profil de surface du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique.

II.3.3.4 Ouverture n° 04 « 9.5 cm » :

La figure (2.10) représente la forme du ressaut hydraulique de quatre débits (04) pour une ouverture de 9.5 cm tels que : $Q_1 = 32 \text{ l/s}$; $Q_2 = 33 \text{ l/s}$; $Q_3 = 34 \text{ l/s}$ et $Q_4 = 35 \text{ l/s}$.

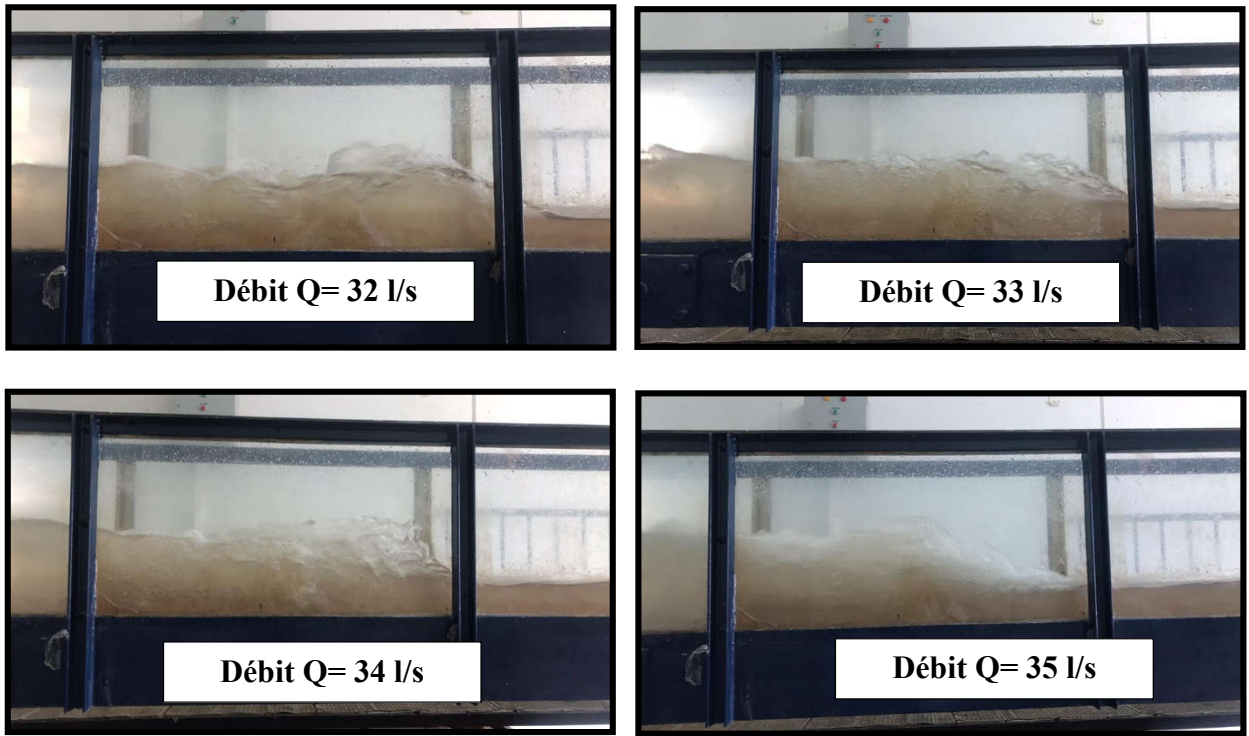


Figure (2.10): Ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire (ouverture 9.5 cm).

La figure (2.11) montre que la variation du profil de surface du ressaut hydraulique $f= h(x)$, pour les débits mentionnés ci-dessus.

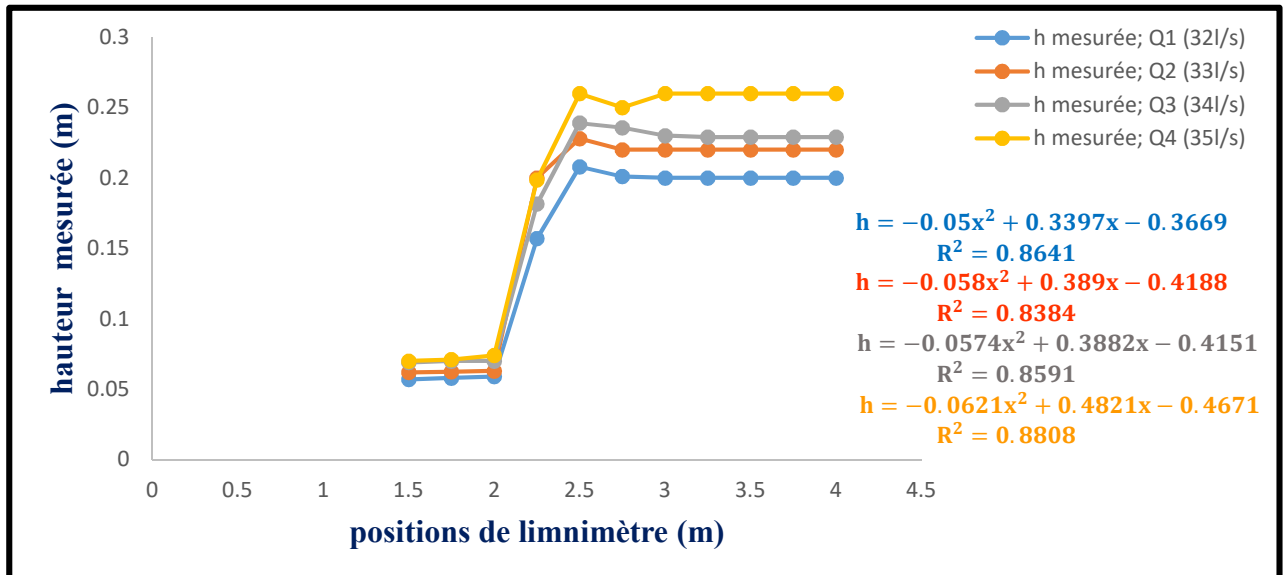


Figure (2.11): Variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f= h(x)$ pour une ouverture de 9.5 cm.

Les valeurs expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.11) sont consignés dans le tableau (2.4).

Debits (l/s) / Limni (m)	Q= 32 l/s	Q=33 l/s	Q= 34 l/s	Q= 35 l/s
Limni 1 : 1.5	0.057	0.062	0.069	0.07
Limni 2 : 1.75	0.058	0.062	0.07	0.071
Limni 3 : 2	0.059	0.063	0.07	0.074
Limni 4 : 2.25	0.157	0.200	0.18152	0.19852
Limni 5 : 2.5	0.208	0.220	0.239	0.25988
Limni 6 : 2.75	0.201	0.220	0.23574	0.250
Limni 7 : 3	0.200	0.220	0.23	0.25988
Limni 8 : 3.25	0.200	0.220	0.229	0.25988
Limni 9 : 3.5	0.200	0.220	0.229	0.25988
Limni 10 : 3.75	0.200	0.220	0.229	0.25988
Limni 11 : 4	0.200	0.220	0.229	0.25988

Tableau (2.4): Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.11).

La figure (2.11) représente la variation du profil de surface du ressaut sur le canal non rectangulaire pour l'ouverture **9.5 cm**. La figure (2.11) montre que les points expérimentaux se présentent sous forme de quatre (04) nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée du débit révélant ainsi l'influence de celui-ci sur le profil de surface du ressaut.

D'autre part, l'analyse de la figure (2.11), montre que les points de mesures s'ajustent pour chaque valeur de débit autour d'une courbe d'une équation du deuxième degré et suivent la forme: $h_2 = a.Q^2 + b.Q + c$.

Les ressauts hydrauliques formés pour tous les débits **32 l/s, 33 l/s, 34 l/s et 35 l/s**, sont de forme des vagues, où on observe que la hauteur de la surface libre reste presque stable de **1.5m** jusqu'au pied du ressaut (**2 m**), la hauteur de l'eau augmente brusquement à **2 m**.

Pour les débits **32 l/s** et **33 l/s**, un seul pique a été marqué à **2.5 m**, la stabilisation à partir de **3 m** et pour le reste du canal.

Pour le débit **34 l/s**, un seul pique a été marqué à **2.5 m**, la stabilisation à partir de **3.25 m** et pour le reste du canal.

Pour le débit **35 l/s**, un premier pique a été marqué à **2.5 m**, un deuxième à **3 m** puis la stabilisation pour le reste du canal.

Nos mesures montrent que pour une même valeur de position "**x**", la hauteur d'eau augmente lorsque **Q** augmente ; on constate ainsi que le débit influe sur le profil de surface du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique.

Nos mesures montrent que pour une même valeur de position "**x**", la hauteur d'eau augmente lorsque **Q** augmente ; on constate ainsi que le débit influe sur le profil de surface du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique.

II.3.3.5 Ouverture n°05 « 10 cm » :

La figure (2.10) montre la forme du ressaut hydraulique pour une ouverture « 10 cm », pour quatre (04) débits, tels que :

$$Q_1 = 32 \text{ l/s} ; Q_2 = 33 \text{ l/s} ; Q_3 = 34 \text{ l/s} \text{ et } Q_4 = 35 \text{ l/s}.$$

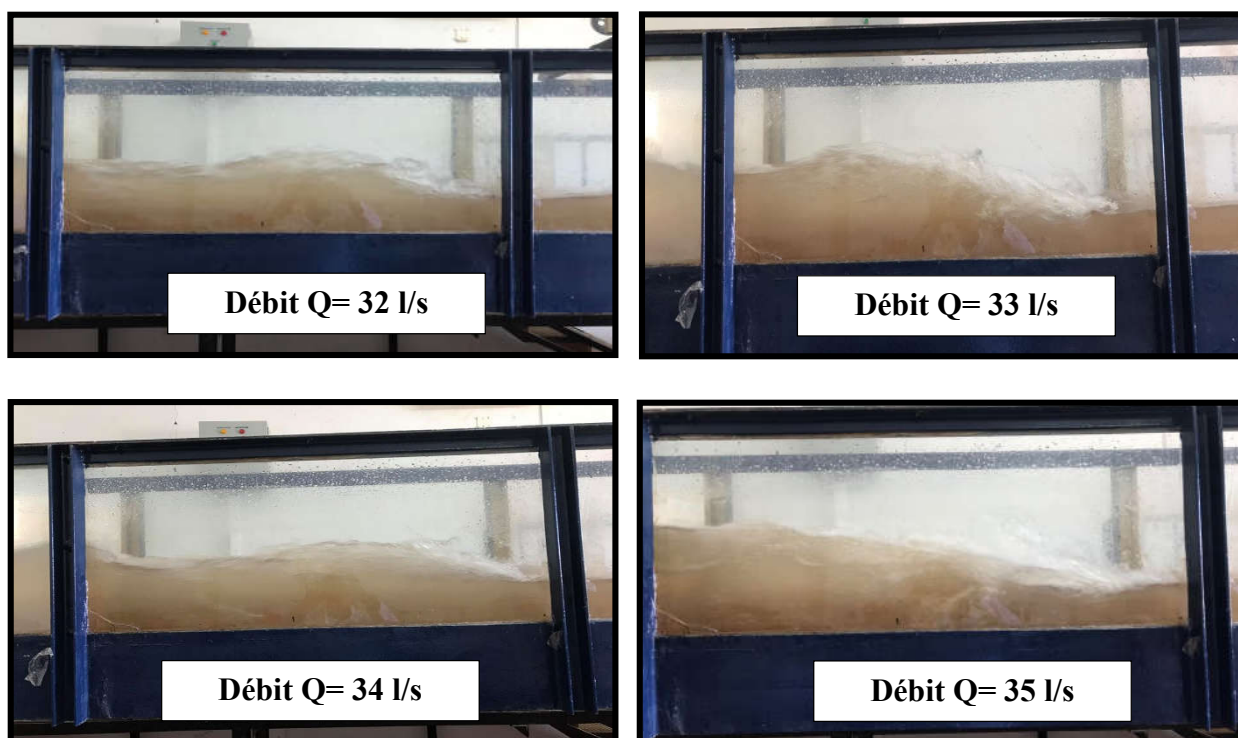


Figure (2.12): Ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire (ouverture 10 cm).

La représentation graphique de la variation du profil de surface du ressaut hydraulique $f = h(x)$, pour les débits mentionnés ci-dessus sur la figure (2.13).

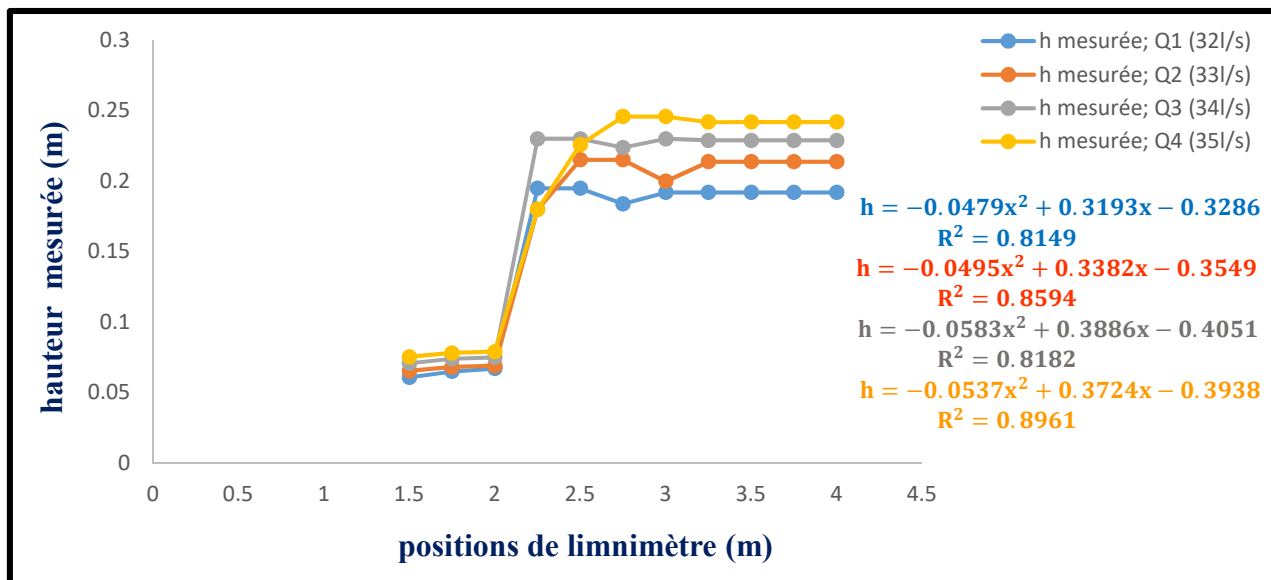


Figure (2.13): Variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f = h(x)$ pour une ouverture de 10 cm.

Les données ayant servi au traçage de figure (2.13) sont regroupées au tableau (2.5).

Debits (l/s) / Limni (m)	Q= 32 l/s	Q=33 l/s	Q= 34 l/s	Q= 35 l/s
Limni 1 : 1.5	0.06076	0.065372	0.07076	0.075372
Limni 2 : 1.75	0.065	0.068	0.074	0.078
Limni 3 : 2	0.067	0.069	0.075	0.079
Limni 4 : 2.25	0.19503	0.180	0.23008	0.180
Limni 5 : 2.5	0.19503	0.21518	0.224	0.226
Limni 6 : 2.75	0.184	0.21518	0.23008	0.24588
Limni 7 : 3	0.192	0.210	0.229	0.24588

Limni 8 : 3.25	0.192	0.214	0.229	0.242
Limni 9 : 3.5	0.192	0.214	0.229	0.242
Limni 10 : 3.75	0.192	0.214	0.229	0.242
Limni 11 : 4	0.192	0.214	0.229	0.242

Tableau (2.5): Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.13).

La figure (2.13) représente la variation du profil de surface du ressaut sur le canal non rectangulaire pour l'ouverture **10 cm**. La figure (2.13) montre que les points expérimentaux se présentent sous forme de quatre (04) nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée du débit révélant ainsi l'influence de celui-ci sur le profil de surface du ressaut.

D'autre part, l'analyse de la figure (2.13), montre que les points de mesures s'ajustent pour chaque valeur de débit autour d'une courbe d'une équation du deuxième degré et suivent la forme: $h_2 = a.Q^2 + b.Q + c$.

Pour les ressauts hydrauliques formés pour tous les débits **32 l/s, 33 l/s, 34 l/s et 35 l/s**, on observe que la hauteur de la surface libre reste presque stable de **1.5 m** jusqu'au pied du ressaut (**2 m**), la hauteur de l'eau augmente brusquement à **2 m**.

Pour le débit **32 l/s**, un premier pique a été marqué à **2.25 m**, un deuxième à **3 m**, puis la stabilisation pour le reste du canal.

Pour le débit **33 l/s**, un premier pique a été marqué à **2.5 m**, un deuxième à **3.25m**, puis la stabilisation pour le reste du canal.

Pour le débit **34 l/s**, un premier pique a été marqué à **2.25 m**, un deuxième à **3 m**, puis la stabilisation à partir de **3.25 m** et pour le reste du canal.

Pour le débit **35 l/s**, un seul pique a été marqué à **2.75 m**, puis la stabilisation à partir de **3.25 m** pour le reste du canal.

Nos mesures montrent que pour une même valeur de position "**x**", la hauteur d'eau augmente lorsque **Q** augmente ; on constate ainsi que le débit influe sur le profil de surface du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique.

II.3.3.6 Ouverture n°06 « 10.5 cm » :

La figure (2.14) montre la forme du ressaut hydraulique pour une ouverture « 10.5 cm », pour quatre (04) débits, tels que : $Q_1 = 32 \text{ l/s}$; $Q_2 = 33 \text{ l/s}$; $Q_3 = 34 \text{ l/s}$ et $Q_4 = 35 \text{ l/s}$.

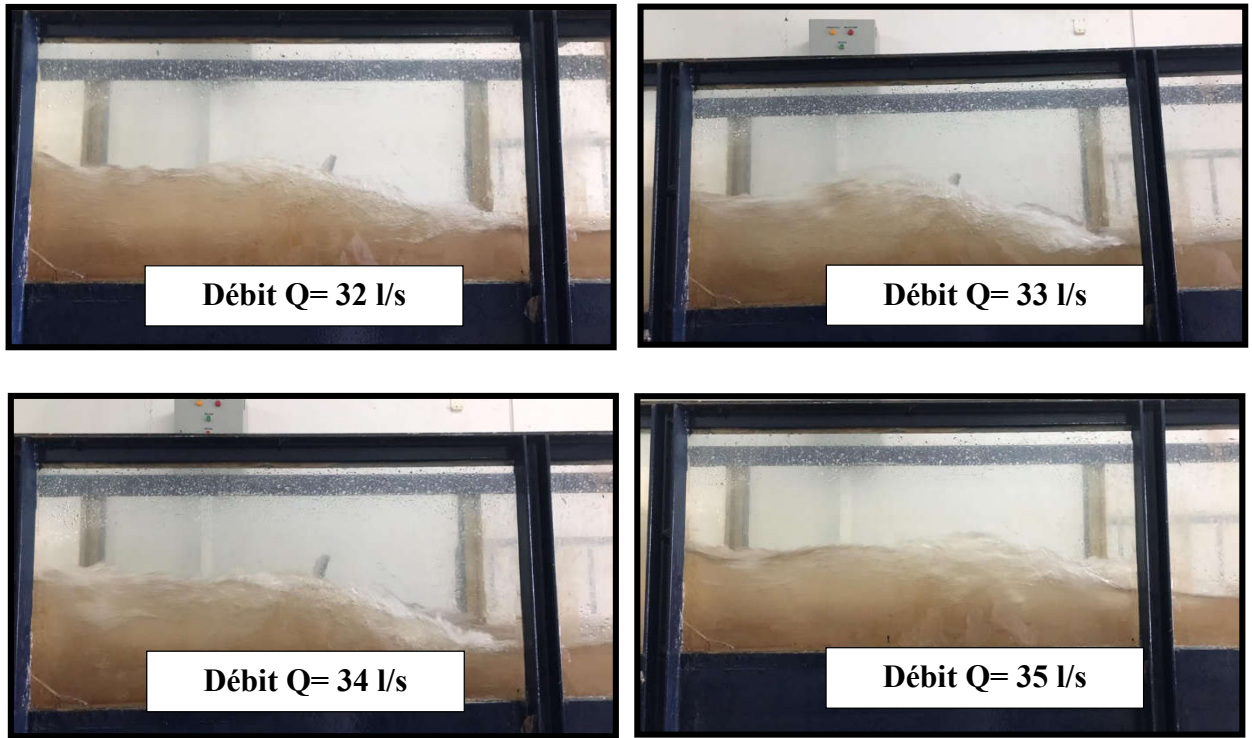


Figure (2.14): Ressaut hydraulique évoluant dans le canal non-rectangulaire (ouverture 10.5 cm).

La représentation graphique de la variation du profil de surface du ressaut hydraulique $f = h(x)$, pour les débits mentionnés ci-dessus sur la figure (2.14).

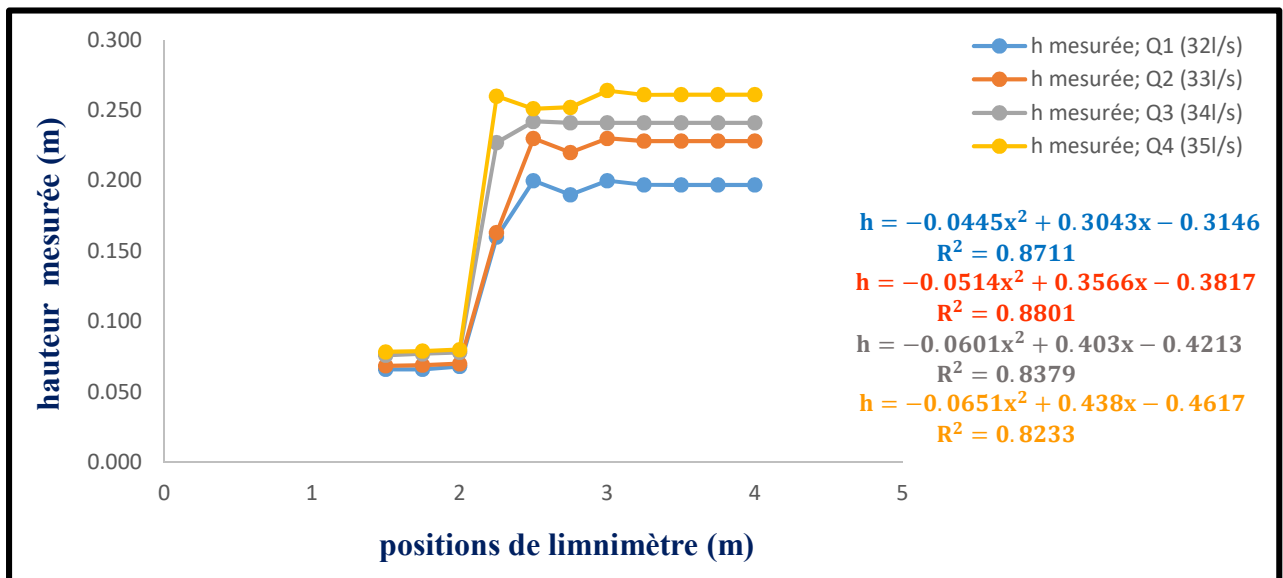


Figure (2.15): Variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f = h(x)$ pour une ouverture de 10.5 cm.

Les données ayant servi au traçage de figure (2.15) sont regroupées au tableau (2.6).

Debits (l/s) Limni (m)	Q= 32 l/s	Q=33 l/s	Q= 34 l/s	Q= 35 l/s
Limni 1 : 1.5	0.066	0.0685	0.076	0.0784
Limni 2 : 1.75	0.066	0.0669	0.077	0.079
Limni 3 : 2	0.068	0.070	0.078	0.080
Limni 4 : 2.25	0.160	0.163	0.227	0.260
Limni 5 : 2.5	0.200	0.230	0.242	0.251
Limni 6 : 2.75	0.190	0.220	0.241	0.264
Limni 7 : 3	0.200	0.230	0.241	0.252
Limni 8 : 3.25	0.197	0.228	0.241	0.261
Limni 9 : 3.5	0.197	0.228	0.241	0.261
Limni 10 : 3.75	0.197	0.228	0.241	0.261
Limni 11 : 4	0.197	0.228	0.241	0.261

Tableau (2.6): Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure (2.15).

La figure (2.15) représente la variation du profil de surface du ressaut sur le canal non rectangulaire pour l'ouverture **10.5 cm**. La figure (2.15) montre que les points expérimentaux se présentent sous forme de quatre (04) nuages de points distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée du débit révélant ainsi l'influence de celui-ci sur le profil de surface du ressaut.

D'autre part, l'analyse de la figure (2.15), montre que les points de mesures s'ajustent pour chaque valeur de débit autour d'une courbe d'une équation du deuxième degré et suivent la forme: $h_2 = a \cdot Q^2 + b \cdot Q + c$.

Pour les ressauts hydrauliques formés pour tous les débits **32 l/s, 33 l/s, 34 l/s et 35 l/s**, on observe que la hauteur de la surface libre reste presque stable de **1.5 m** jusqu'au pied du ressaut (**2 m**), la hauteur de l'eau augmente brusquement à **2 m**.

Pour les débits **32 l/s** et **33 l/s**, le premier pique a été marqué à **2.5 m**, le deuxième à **3 m**, puis la stabilisation à partir de **3.25 m** et pour le reste du canal.

Pour le débit **34 l/s**, un seul pique a été marqué à **2.5 m**, puis la stabilisation à partir de **2.75 m** et pour le reste du canal.

Pour le débit **35 l/s**, un premier pique a été marqué à **2.25 m**, le deuxième à **3 m**, puis la stabilisation à partir de **3.25 m** pour le reste du canal.

Nos mesures montrent que pour une même valeur de position "**x**", la hauteur d'eau augmente lorsque **Q** augmente ; on constate ainsi que le débit influe sur le profil de surface du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique.

II.4 Conclusion :

A travers ce chapitre nous avons étudié et analysé les résultats expérimentaux le profil de surface du ressaut hydraulique en canal trapézoïdale asymétrique.

En premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie pendant les essais. Passant en second temps aux résultats expérimentaux, quatre **(04)** débits ont été testés en six **(06)** ouverture **(8cm, 8.5cm, 9cm, 9.5cm, 10cm, 10.5cm)**. L'étude expérimentale s'intéressée à la variation de profil de surface du ressaut hydraulique $f= h(x)$.

**Conclusion de la
deuxième partie**

Conclusion de la partie expérimentale :

On constate que pour toutes les ouvertures testées, les valeurs de la hauteur conjuguée initiale h_1 , augmente proportionnellement avec les valeurs du débit volume Q .

D'autre part, les points de mesures s'ajustent pour chaque valeur d'ouverture autour d'une courbe linéaire et suivent la forme: $h_1 = a \cdot Q + b$.

Par ailleurs, on constate que pour toutes les ouvertures testées, les valeurs de la hauteur conjuguée finale h_2 , augmente proportionnellement avec les valeurs du débit volume Q .

D'autre part, l'analyse des graphes, montre que les points de mesures s'ajustent pour chaque valeur d'ouverture autour d'une courbe linéaire et suivent la forme: $h_2 = a \cdot Q + b$.

Les graphes représentant la variation des profils de surface montrent que les points expérimentaux se présentent sous forme de quatre (04) courbes distincts correspondant chacun à une valeur bien déterminée du débit révélant ainsi l'influence de celui-ci sur le profil de surface du ressaut.

Nos mesures montrent que pour une même valeur de position "x", la hauteur d'eau augmente lorsque Q augmente ; on constate ainsi que le débit influe sur le profil de surface du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique.

D'autre part, l'analyse des figures montre que les points de mesures s'ajustent pour chaque valeur de débit autour d'une courbe d'une équation du deuxième degré et suivent la forme: $h_2 = a \cdot Q^2 + b \cdot Q + c$.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Notre étude présente une analyse expérimentale de profil de surface du ressaut hydraulique en canal trapézoïdale asymétrique avec convergent trapézoïdale. L'étude a pour but d'étudier et analyser expérimentalement le profil de surface du ressaut hydraulique. Cette étude se divise en deux grandes parties qui ont été nécessaires :

La première partie est la partie bibliographique qui se divise en trois chapitres :

Le premier chapitre aborde les principaux travaux entretenus dans un canal rectangulaire à savoir ; classique, contrôlé et forcé. A travers ce chapitre nous allons passerons en revue la classification de *Bradley et Peterka (1957)*, les études de *Hager et Sinniger (1986-1989)* ; *Hager et Bremen (1989)* et *Hager et al (1990)*, sur les différentes caractéristiques du ressaut classique. Ensuite, les travaux de *Forster et Skrinde (1950)* et de *Achour, Debabeche et Sedira, (2002)* sur le ressaut contrôlé par seuil (*Siad, 2018*), et les travaux du *Rand (1957)* concernant le ressaut hydraulique forcé par seuil.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'analyse théorique et expérimentale par (*Silvester,1964*) et (*Wanoschek et Hager,1989*), sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique, ainsi que l'approche présentée par (*Alberto José et Rodriguez-Diaz,1954*) et (*Hubert Chanson,2017*) sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de profil de la surface du ressaut hydraulique évoluant dans différents canaux. Nous exposerons les travaux effectués sur le profil de surface dans différents canaux, à savoir, ceux de (*Debabeche, 2003*) ; (*Debabeche et Achour, 2000*) ; (*Hager et Wanosch, 1987*) ; et (*Zaid, 2015*).

La deuxième partie est la partie expérimentale elle a été divisée en deux chapitre, le premier a été consacré à la description du modèle expérimentale, qui a servi de base à l'étude expérimental de profil de surface du ressaut en canal trapézoïdale asymétrique avec le convergent trapézoïdale.

Nous avons abordé également dans ce chapitre, l'appareillage utilisé pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique. Nous avons présenté la technique de mesure des débits par étalonnage, tout ça à l'aide de débitmètre à diaphragme, mesure des hauteurs de la surface libre par l'instrument « limnmètre ».

Le deuxième chapitre a été consacré à la procédure expérimentale et à la description des essais et analyser et interpréter les résultats expérimentale obtenus.

Références bibliographiques

Les références bibliographiques

- Achour, B., Debabeche, M., & Sedira, N. (2002).** CONTROL OF HYDRAULIC JUMP BY SILL IN RECTANGULAR CHANNEL. *LARHYSS Journal*, N°.01, 73-85.
- Ancer, S. E. (2018).** *Le ressaut hydraulique forcé de type A dans un canal trapézoïdal à base rectangulaire*. Mémoire de master, département de génie civil et d'hydraulique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie.
- Ancey, C. (2018).** Ecoulement à surface libre. *Hydraulique à surface libre " Ressaut hydraulique"*, Version 16.1, 124. Note de cours, Lausanne, Suisse.
- BenMalek, A. (2012).** *Etude du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal*. Mémoire de magister, département de génie civil et d'hydraulique, Université de Mohamed Khider de Biskra, Algérie.
- Berchet, A. (2014).** *Modélisation par des méthodes lagrangiennes du transport sédimentaire induit par les mascarets*. DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS, École Doctorale de Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique et Aéronautique, Université de Poitiers, Français.
- Bradley, J. N., & Peterka, A. (1957).** The hydraulic design of stilling basins: hydraulic jumps on a horizontal apron (basin i). *Journal of the hydraulics division*, 83(5), 1-24.
- Bremen, R., Hager, W., & Kawagoshi, N. (1990).** Classical hydraulic jump: length of roller. *Journal of hydraulic Research*, 28(5), 519-608.
- Bretz, N. V., & Hager, W. (1988).** Sill-controlled stilling basin, the international symposium. 273-280.
- Bretz, N.-V. (1988).** *Ressaut hydraulique forcé par seuil*. Lausanne, Département de génie civil, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Carlier, M. (1980).** *Hydraulique générale et appliquée* (éd. Eyrolles). paris, France.
- Carvalho, R. F., Debabeche, M., & Hafnaoui, M. (2018).** Modélisation numérique de l'impact des paramètres hydrauliques et numériques sur la localisation du ressaut hydraulique. *Courrier du Savoir – N°25*, 61-70.
- Chanson, H., Kiri, U., & Leng, X. (2017).** Positive Surge Propagation in a Non-Rectangular Asymmetric Channel.

- Daoudi, O. A. (2016).** *Le ressaut hydraulique forcé de type A en canal rectangulaire de forme composé.* Mémoire de Master, département de génie civil et d'hydraulique, Université Mohamed khider de Biskra, Algérie.
- Debabeche, M. (2003).** *Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques.* Thèse de doctorat d'état, département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Debabeche, M., Ghomri, A., & Kateb, S. (2006).** ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRIANGULAIRE A PAROIS RUGUEUSES. *Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°05, 187-196.*
- Debabeche, M., Ghomri, A., & Kateb, S. (2017-2018).** EXPERIMENTAL STUDY OF THE HYDRAULIC JUMP IN A HYDRAULIC JUMP IN A SLOPED RECTANGULAR CHANNEL. *Journal of Fundamental and Applied Sciences, 10(1), 216-225.*
- Dégoutte, G. (2014).** Ecoulements rapidement variés "Ressaut hydraulique". *Polycopié "TRAITÉ D'HYDRAULIQUE À SURFACE LIBRE"* (p. 33).
- Flamant, A. (1900).** *Hydraulique* (éd. 2nd considérablement augmentée). Paris, France.
- Hadj Azzem, H. (2016).** *Le ressaut hydraulique controlé par seuil en canal rectangulaire de forme composée.* Mémoire de master, département de génie civil et d'hydraulique, Université de Mohamed Khider de Biskra, Algérie.
- Hager, W. H., & Sinniger, R. (1989).** *Constructions hydrauliques* (éd. 1ère). Presses polytechniques Romande: Lausanne, France.
- Hager, W. H., & Wanoschek, R. (1987).** Hydraulic jump in Triangular Channel. *Journal of hydraulic research, 25(5), 549-564.*
- Kateb, S. (2014).** *Etude théorique expérimentale de quelques types de ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal.* Doctorat en science, département de génie civil et d'hydraulique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie.
- Khebli, A. (2019).** *Etude expérimentale de l'effet de seuil mince sur les caractéristiques de ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique a convergent triangulaire.* Mémoire de master, département de génie civil et d'hydraulique, Université de Mohamed Khider de Biskra, Algérie.

- Khenouche, A. (2016).** *L'élaboration du profil de surface généralisé pour le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire.* Mémoire de Master, département de génie civil et d'hydraulique, Université Mohamed khider de Biskra, Algérie.
- Kourim, A. (2019).** *Etude expérimentale des longueurs caractéristiques et du profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique a convergent triangulaire.* Mémoire de master, département de génie civil et d'hydraulique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie.
- Lagacé, R. (2011).** Ressaut hydraulique. *Notion d'hydraulique en milieu rural*, 201. Cours GAE--3005, Département des sols et de génie agroalimentaire, Université de Laval.
- Lencastre, A. (1996).** Mouvement brusquement varié - Ressaut hydraulique-. *Hydraulique générale* (éd. Eyrolles, p. 210). Paris.
- Mahamdioua, S. (2016).** *L'effet de la compacité du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince sur le rapport des hauteurs conjuguées en un canal rectangulaire.* Mémoire de master, département de génie civil et d'hydraulique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie.
- Medakene, R., & Bakki, A. (2018).** *Approche théorique de l'effet de la rugosité sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans les canaux prismatique (Rectangulaire, triangulaire, trapézoïdale).* Mémoire de master académique, département de génie civil et d'hydraulique, Université Kasdi Merbah de Ouargla, Algérie.
- Merazga, Y. (2018).** *Etude expérimentale des longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdale asymétrique.* Mémoire de Master, département de génie civil et hydraulique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie.
- Meziani, M. (2018).** *Etude expérimentale de L'effet de la compacité sur le profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique.* Mémoire de master, département de génie civil et d'hydraulique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie.
- Moumni, H., & Nagoudi, D. (2018).** *Contribution à l'étude expérimentale de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal.* Mémoire de master, département de génie civil et d'hydraulique, Université Chehid Hama Lakhdar El-Oued, Algérie.
- Rahmani, s. (2019).** *Etude expérimentale du rendement du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal asymétrique a convergent rectangulaire.* Mémoire de Master, département de génie civil et d'hydraulique, Université Mohamed khider de Biskra, Algérie.

- Rand, W. (1957).** Section of mathematics and engineering: An approche to generalized desing of stilling basins. *Transaction of the New York Academy of science*, 20(2 serie II), 173-191.
- Richard, g. (2013).** *Elaboration d'un modèle d'écoulement turbulents en faible profondeur: application au ressaut hydraulique et aux trains de rouleaux.* Thèse de doctorat en mécanique et physique des fluides, Institut Universitaire des Systèmes termiques industriels, Université d'Aix-Marseille, France.
- Rodriguez-Diaz, A. J. (1954).** *The hydraulic jump in a non-rectangular open channel.* Doctoral dissertation, Georgia Institue of Technology.
- Sallem, F. (2013-2014).** Polycopié de cours "Hydraulique des écoulements à surface libre". Département de génie rural.
- Siad, R. (2018).** *Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal brusquement.* Thèse de doctorat, département de génie civil et d'hydraulique, Université Mohamed khider de Biskra, Algérie.
- Zaid, Z. (2015).** *Effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal.* Mémoire de magister, département de génie civil et d'hydraulique, Université Mohmed Khider de Biskra, Algérie.