

*République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieure Et De La
Recherche Scientifique*

Université Echahid Hamma Lakhdar Del-Oued

Faculté De Technologie

Département d'hydraulique et de génie civil



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydraulique

Spécialité : Conception et Diagnostic des systèmes d'AEP et
d'assainissement

Thème :

***Analyse d'une approche semi théorique du ressaut hydraulique
développé dans un canal rectangulaire de section composée
avec lit majeur et mineur rugueux et avec pente nulle***

Encadré par :

**** Dr. KHATER Ibtisem***

Présenté par :

**** BELKACEMI Ali***

Co- Encadré :

**** Pr. GHOMRI Ali***

**** Dr. BESSER Djamel***

Le jury :

<i>Dr. Zaid Zaid</i>	<i>M.CA</i>	<i>Président</i>
<i>Dr. KHATER Ibtisem</i>	<i>M.CA</i>	<i>Encadré</i>
<i>Pr. GHOMRI Ali</i>	<i>M.CA</i>	<i>Co- Encadré</i>
<i>Dr. Meziani Assia</i>	<i>M.CA</i>	<i>Examineur</i>

2025/2026

Remerciements

D'abord je remercie le Dieu le tout puissant qui nous a donné

La volonté, le Courage et la patience pour bien

Mener ce travail.

*Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mon
encadreur, Dr. KHALIL Ibidem, ainsi qu'à mes
Co-encadreur, Pr. GHOMRI Ali et Dr. BESSER Djamel,
pour leur entière disponibilité, la pertinence de leurs conseils
et leur patience tout au long de l'élaboration de ce mémoire.*

*Mes remerciements s'adressent également aux membres du
jury qui ont bien voulu examiner avec soin le travail présenté
dans ce mémoire.*

*Enfin, j'exprime ma gratitude à toutes celles et ceux qui ont
contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à ma chère mère,
À mon cher père, pour tous ce qui ont fait pour moi,
Et pour leurs sacrifices et leur soutien durant ma vie.*

À mes chers frères,

À toute ma famille

الملخص:

تهدف هذه الأطروحة إلى التحليل من الناحية النظرية، ظاهرة القفزة الهيدروليكية المتكوّنة داخل قناة مستطيلة ذات مقطع مركّب، يتميز بوجود سرير رئيسي وثنائي خشن وبنحدر صفري. يتمثل الهدف المركزي لهذا البحث في دراسة تأثير خشونة السريرين الرئيسيين والثانوي على خصائص القفزة الهيدروليكية. ومن خلال مقارنة نظرية مدعومة بمعطيات تجريبية، تم التوصل إلى علاقة من الشكل: $f(Y, Fr, Cr, \beta, \tau)$ وذلك عبر تطبيق معادلة كمية الحركة بين مقطعي القفزة (المنبع والمصب). كما أن الارتباط القائم بين النتائج التجريبية وتلك المستخلصة من المقاربة النظرية اللابعديّة $Y_{théo}$ ، التي تتغير مع كل من عدد فرويد (Fr) ومعامل المقاومة (Cr)، أظهر خطأ نسبياً لا يتجاوز في الغالب 5%. هذا الاستنتاج يؤكد صلاحية وموثوقية العلاقة شبه-النظرية المقترحة في تصميم أحواض التهدئة.

الكلمات المفتاحية : القفزة الهيدروليكية ، قناة مستطيلة مركّبة، عدد فرويد، خشونة السرير الرئيسيين والثانوي للقناة، الميل الصفري، حوض التهدئة

Abstract:

This thesis aims to analyze, from a theoretical perspective, the hydraulic jump developing in a rectangular channel with a composite section, characterized by rough main and secondary beds and a zero slope. The central objective of this research is to study the effect of bed roughness on the characteristics of the hydraulic jump. Through a theoretical approach supported by experimental data, a relation of the form $f(Y, Fr, Cr, \beta, \tau)$, was obtained by applying the momentum equation between the upstream and downstream sections of the jump. Moreover, the correlation established between the experimental data and those derived from the dimensionless theoretical approach Y_{theo} , which varies with Fr and Cr , reveals a relative error generally less than 5%. This finding confirms the validity and reliability of the semi-theoretical relation for the design of stilling basins.

Keywords: Hydraulic jump, composite rectangular channel, Froude number, major and minor bed roughness, zero slope, stilling basin.

Résumé :

Cette thèse vise à analyser, sur les plans théorique, le ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire à section composée, caractérisé par un lit majeur et mineur rugueux et une pente nulle. L'objectif central de cette recherche est d'étudier l'effet de la rugosité du lit majeur et mineur sur les caractéristiques du ressaut. À travers une approche théorique appuyée par des données expérimentales, une relation de la forme $f(Y, Fr, Cr, \beta, \tau)$ obtenue par l'application de l'équation de quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut. Par ailleurs, la corrélation établie entre les données expérimentales et celles issues de l'approche théorique adimensionnelle $Y_{théo}$, dont elle varie avec Fr et Cr , révèle une erreur relative généralement inférieure à 5%. Ce constat atteste de la validité et de la fiabilité de la relation semi-théorique pour le dimensionnement des bassins de dissipation.

Mots clés : Ressaut hydraulique, canal rectangulaire composée, nombre de Froude, rugosité du lit majeur et mineur du canal, pente nulle, bassin de dissipation.

Sommaire

REMERCIEMENTS	I
DÉDICACE	II
RÉSUMÉ :	III
SOMMAIRE	IV
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX	VIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
Chapitre I	4
Notions fondamentales sur le ressaut hydraulique	4
I.1. Introduction :	5
I.2. Définition De L'écoulement A Surface Libre :	5
I.3. TYPES DE CANAUX :	5
I.3.1. Canaux prismatiques et non prismatiques :	5
I.3.2. Canaux à limites rigides et mobiles :	5
I.4. Classification Des Écoulements :	6
I.4.1. Écoulements stationnaires et non stationnaires :	6
I.4.2. Écoulements uniformes et non uniformes :	6
I.4.3. Écoulements à variation progressive et à variation rapide :	6
I.4.4. Écoulement à débit variable spatialement :	6
I.5. Régimes D'écoulement :	7
I.5.1. Le nombre de Froude :	7
I.5.2. Le nombre de Reynolds :	8
I.6. Le Ressaut Hydraulique :	8
I.6.1. Définition :	8
I.6.2. Ressaut hydraulique classique	9
I.6.3. Classification de ressaut :	10
I.6.4. Les paramètres hydrauliques du ressaut :	11
I.6.4.1. Les hauteurs conjuguées du ressaut :	11
I.6.4.2. Longueurs caractéristiques du ressaut :	12
I.6.4.2.1. Longueur du rouleau :	12
I.6.4.2.2. Longueur du ressaut :	12
I.7. Historique Du Ressaut Hydraulique	13
I.7.1. Les Pionniers (XVe XIXe Siècle) :	13
I.7.2. Fondements Modernes (Début du XXe Siècle Seconde Guerre Mondiale):	13
I.7.3. L'Âge d'Or et la Classification (Années 1950-1980)	14
I.7.4 Recherches Contemporaines (récents) :	14
I.8. Conclusion :	15

Sommaire

Chapitre II:	30
Étude expérimentale de leffet de la section composée sur le ressaut hydraulique	30
II.1. Introduction	31
II.2. Approche Riguet Et Debabeche :	31
II.2.1. La problématique :	31
II.2.2. Évaluation des essais expérimentaux	32
II.2.3. Résultats obtenus par l'expérimentation:	33
II.2.3.1. Le rapport (Y) des hauteurs conjuguées:	33
II.2.3.2. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 :	33
II.2.3.3. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface par rapport au nombre de Froude F_1 :	34
II.2.3.4. L'efficacité du rendement (η) du ressaut hydraulique :	35
II.3. Conclusion :	36
Chapitre III	37
Description et fonctionnement du modèle expérimental	37
III.1 Introduction	38
III.2 Description du canal expérimental utilisé dans les expériences du ressaut hydraulique	38
III.3 Limnimètre pour la mesure du niveau deau :	41
III.4 Description des Parois de Contrôle et de la Hauteur d'Ouverture en Amont dans l'Expérimentation du Ressaut Hydraulique	42
III.5 Procédure de préparation des tapis rugueux :	43
III.6. Protocole d'étude expérimentale :	44
III.7 Conclusion	45
Chapitre IV	47
Étude semi-théorique du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire composé et lits rugueux	47
IV.1. Introduction :	48
IV.2. Analyse Théorique :	48
IV.3 Protocole d'étude expérimentale :	51
IV.4 Conclusion	59
 CONCLUSION GÉNÉRALE	 51
 CONCLUSION GÉNÉRALE	 61
 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 62
 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 63

Liste des figures

FIGURE I.1 : SCHÉMA D'UN RESSAUT HYDRAULIQUE	8
FIGURE I.2 : LE RESSAUT HYDRAULIQUE DANS LA NATURE.	9
FIGURE I.3 : LE RESSAUT HYDRAULIQUE DANS LE LABORATOIRE	9
FIGURE I.4 : CLASSIFICATION DES RESSAUTS	11
FIGURE I.5: RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE.	11
FIGURE II.1 : SCHÉMA DE DÉFINITION DU RESSAUT CONTRÔLÉ PAR SEUIL CONTINU À PAROI MINCE EN CANAL RECTANGULAIRE DE SECTION COMPOSÉE.	31
FIGURE II.2 : LE CANAL AYANT SERVI À L'EXPÉRIMENTATION.	32
FIGURE II.3 : RAPPORT DES HAUTEURS CONJUGUÉES y PAR RAPPORT AU NOMBRE DE FROUDE F_1.	33
FIGURE II.4 : RAPPORT DES HAUTEURS CONJUGUÉES y PAR RAPPORT AU NOMBRE DE FROUDE F_1.	34
FIGURE II.5 : RREPRÉSENTE UN GRAPHIQUE DE LA VARIATION DE LA LONGUEUR RELATIVE DU ROULEAU DE SURFACE LR/H_1 DU RESSAUT HYDRAULIQUE PAR RAPPORT AU NOMBRE DE FROUDE F_1.	35
FIGURE II.6 : REPRÉSENTATION DU L'EFFICACITÉ (H) PAR RAPPORT AU NOMBRE DE FROUDE F_1.	36
FIGURE III.1: PHOTO DU CANAL D'EXPÉRIMENTATION AU LABORATOIRE.	38
FIGURE III.2: LA POMPE UTILISÉE POUR GÉNÉRER LE DÉBIT	39
FIGURE III.3 : BRAS DE RÉGLAGE DE PENTE EXPÉRIMENTALE.	39
FIGURE III.4: BASSIN D'ACCUMULATION DANS LE CANAL EXPÉRIMENTAL.	40
FIGURE III.5: DÉBITMÈTRE D'EAU DANS LE CANAL EXPÉRIMENTAL.	40
FIGURE III.6: DÉVERSOIR RECTANGULAIRE INSÉRÉ DANS LE CANAL EXPÉRIMENTAL.	41

FIGURE III.7: LE LIMNIMÈTRE UTILISÉ POUR MESURER LA HAUTEUR D'EAU DANS LE CANAL EXPÉRIMENTAL.	42
FIGURE III.8 : PAROIS MINCES DE CONTRÔLE POUR LA FORMATION DU RESSAUT HYDRAULIQUE.	43
FIGURE III.9: OUVERTURES H_1 DU CANAL UTILISÉ À L'ÉTUDE DU RESSAUT HYDRAULIQUE.	43
FIGURE III.10 : - 1. ADHÉSIF MITREAPEL UTILISÉ POUR LA FIXATION 2. APPLICATION DE L'ADHÉSIF SUR LE TAPIS RUGUEUX.	44
FIGURE III.11 :- 1. ADHÉSIF TEKASIL UTILISÉ POUR LA FIXATION 2. TAPIS RUGUEUX INSTALLÉ DANS LE CANAL EXPÉRIMENTAL.	44
FIGURE IV.1 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE D'UN RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ PAR UN SEUIL À PAROI MINCE.	49
FIGURE IV.2 : VARIATION DE L'EXPRESSION $F(Y)$ EN FONCTION DE F_1^2 POUR DIFFÉRENTES VALEURS DE RUGOSITÉ DES LITS.	52
FIGURE IV.3 : VARIATION DE CR EN FONCTION DE E/B.	53
FIGURE IV.4 : VARIATION DE $F(Y)$ PAR RAPPORT À $F^{12}(1 - 0.4166 (\epsilon/B)\beta)$	
$F^{12}(1 - 0.4166 (\epsilon/B)\beta)$.	53
FIGURE IV.5 : VARIATION DE $Y_{\text{EXPÉRIMENTAL}}$ PAR RAPPORT À	
$F^{12}(1 - 0.4166 (\epsilon/B)\beta)F^{12}(1 - 0.4166 (\epsilon/B)\beta)$.	54
FIGURE IV.6 : COMPARAISON ENTRE Y_{EXP} AVEC L'APPROCHE SEMI THÉORIQUE.	
$Y = 1.329F^{10.986}(1 - 0.4166 (\epsilon/B)\beta)^{1.430}$	
$Y = 1.329F^{10.986}(1 - 0.4166 (\epsilon/B)\beta)^{1.430}$	54

Liste des tableaux

<i>TABLEAU IV.1 : LES VALEURS DU CR</i>	52
<i>TABLEAU IV.2 : ERREURS RELATIVES ENTRE LES VALEURS CALCULÉES PAR L'ÉQUATION (IV.19) ET LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES.</i>	55

Introduction Générale

Introduction Générale

Lors des crues, les barrages doivent évacuer d'importants débits d'eau afin d'assurer la sécurité de l'ouvrage et de la vallée en aval. Cependant, la vitesse élevée de ces écoulements peut provoquer des dégradations et des catastrophes. Pour limiter ces effets, des dispositifs de dissipation d'énergie sont mis en place. Parmi eux, le ressaut hydraulique constitue la solution la plus économique et la plus efficace. Ce phénomène correspond au passage d'un régime torrentiel à un régime fluvial, permettant de réduire l'énergie cinétique de l'eau. (Baisser, D. 2026).

Léonard de Vinci, peintre et mathématicien de la Renaissance, fut le premier à décrire le ressaut hydraulique. Depuis le XVI^e siècle, cette observation a suscité un intérêt continu et a contribué au développement des sciences hydrauliques. Bien que plus de quatre siècles se soient écoulés, l'étude de ce phénomène et de ses effets connaît encore des avancées notables. Durant les soixante dernières années, l'évolution des connaissances et des méthodes d'analyse a permis d'en renouveler la compréhension, confirmant son importance actuelle sur les plans technique et économique (Hager & Li, 1992). En 1828, Bélanger établit le lien entre le ressaut hydraulique et le principe de la quantité de mouvement, relation ensuite validée par des travaux expérimentaux qui ont démontré le rôle essentiel de ce principe dans la régularisation des ressauts (Chen-Feng Li, 1995).

Le ressaut hydraulique se définit essentiellement par deux hauteurs conjuguées initiale et finale, par le nombre de Froude de l'écoulement incident, ainsi que par les longueurs du ressaut et du rouleau de surface. Toute variation des conditions en amont (débit, hauteurs, etc.) ou en aval (nature de l'obstacle, sa position, sa hauteur, etc.) peut engendrer des configurations différentes du ressaut.

Ce mémoire a pour objectif d'analyser, sur le plan théorique, le ressaut hydraulique contrôlé par une paroi mince, se développant dans un canal rectangulaire à section composée, doté d'un lit majeur et mineur rugueux et présentant une pente nulle. L'étude propose des formulations adimensionnelles mettant en relation les principales caractéristiques du ressaut et mettant en évidence l'influence de la rugosité imposée aux lits majeur et mineur sur son comportement.

Notre mémoire est partagée essentiellement en deux parties fondamentales :

- La première partie (chapitre I et chapitre II) de ce mémoire est consacrée à une étude bibliographique regroupant les généralités et les notions fondamentales relatives au ressaut hydraulique, ainsi qu'à une présentation des principaux travaux réalisés dans ce domaine, en particulier ceux portant sur le ressaut en canal rectangulaire de section composée. Cette

synthèse permettra de situer le cadre scientifique de l'étude et de mettre en évidence les limites des recherches antérieures.

- La seconde partie (chapitre III et chapitre IV) présente notre propre contribution, centrée sur l'approche théorique du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à section composée, muni de lits majeur et mineur rugueux et de pente nulle. Cette analyse vise à approfondir la compréhension du phénomène dans ce contexte spécifique.

Chapitre I

Notions fondamentales
sur le ressaut
hydraulique

I.1. Introduction :

L'hydraulique, est fondamentale dans la vie et au développement des sociétés, car elle permet la maîtrise et l'utilisation de la force des liquides pour accomplir des tâches essentielles. Elle s'intéresse notamment aux écoulements à surface libre, observés dans les canaux naturels et artificiels, dont la surface est soumise à la pression atmosphérique

Ce chapitre propose une vue d'ensemble sur les différents types de canaux, leurs caractéristiques et la classification des écoulements à surface libre, en introduisant les notions fondamentales nécessaires à leur compréhension. Cette base théorique servira ensuite à aborder plus spécifiquement certains phénomènes hydrauliques, tels que le ressaut hydraulique, en définissant les termes clés liés à ce sujet et en retraçant brièvement l'historique des recherches menées, afin de mieux cerner les résultats attendus par les hydrauliciens travaillant dans ce domaine.

I.2. Définition De L'écoulement A Surface Libre :

Un écoulement à surface libre est l'écoulement d'un fluide, généralement de l'eau, dans un espace ouvert en contact direct avec l'atmosphère, présentant une surface libre soumise à la pression atmosphérique. Ce type d'écoulement, que l'on retrouve dans les rivières, oueds, canaux ou autres zones humides, se caractérise par la présence de deux milieux non miscibles - un volume d'eau en partie inférieure et un volume d'air au-dessus - séparés par une interface bien définie. Sa dynamique est principalement gouvernée par la gravité, la pente du fond et la résistance des parois, et ses paramètres essentiels incluent la forme, la position et la vitesse de l'écoulement (Subramanya, 2009).

I.3. TYPES DE CANAUX :

I.3.1. Canaux prismatiques et non prismatiques :

Un canal prismatique se caractérise par une section transversale et une pente de fond constantes. Il est typique des ouvrages artificiels et adopte des formes géométriques standardisées telles que rectangulaire, trapézoïdale, triangulaire ou circulaire.

En revanche, un canal non prismatique présente des variations de forme, de dimensions et de pente, caractéristiques des milieux naturels soumis à des processus morpho dynamiques.

Cette distinction a un impact direct sur la modélisation des écoulements à surface libre, les hypothèses de simplification, ainsi que sur les équations de Saint-Venant utilisées pour la simulation hydraulique.

I.3.2. Canaux à limites rigides et mobiles :

Les canaux à ciel ouvert se divisent en deux catégories selon la nature de leurs parois :

- Canaux à limites rigides : Ils possèdent une géométrie constante, sans érosion ni dépôt, et se caractérisent par un seul degré de liberté (variation du niveau d'eau).
- Canaux à limites mobiles : Leur géométrie est variable, soumis à l'érosion et au transport de sédiments, avec quatre degrés de liberté (niveau d'eau, largeur, pente, profil).

I.4. Classification Des Écoulements :

I.4.1. Écoulements stationnaires et non stationnaires :

Un écoulement est considéré comme stationnaire lorsque ses paramètres hydrauliques, tels que la profondeur ou le débit à une section donnée, demeurent constants dans le temps. À l'inverse, toute variation temporelle de ces paramètres définit un écoulement non stationnaire.

I.4.2. Écoulements uniformes et non uniformes :

Un écoulement est dit uniforme lorsque ses paramètres hydrauliques, tels que la profondeur d'eau, la vitesse ou le débit, restent constants le long d'un canal à section ouverte. Dans ce cas, la surface libre est parallèle au fond du canal et la section transversale est identique sur toute la longueur.

En pratique, un écoulement uniforme instationnaire est presque inexistant ; ainsi, l'expression « écoulement uniforme » désigne généralement un régime uniforme stationnaire.

À l'opposé, un écoulement non uniforme (variable) se caractérise par des variations de ses paramètres. Cela peut se produire dans un canal à section variable ou dans un canal à section constante lorsque la vitesse change le long du parcours. Un écoulement non uniforme peut être soit stationnaire (paramètres constants dans le temps mais variables dans l'espace), soit non stationnaire (paramètres variables dans le temps et dans l'espace).

I.4.3. Écoulements à variation progressive et à variation rapide :

Un écoulement à variation progressive présente une variation lente de la profondeur, avec une courbure modérée des lignes de courant. Les frottements y jouent un rôle majeur. Exemples : relèvement du niveau d'eau en amont d'un barrage ou baisse progressive après rupture de berge (stationnaire) ; propagation d'une crue (non stationnaire).

Un écoulement à variation rapide se caractérise par des variations importantes de profondeur sur de courtes distances et une forte courbure des lignes de courant. Les frottements y sont négligeables et le phénomène est localisé. Exemples : ressaut hydraulique en aval d'un déversoir.

I.4.4. Écoulement à débit variable spatialement :

Les écoulements à débit variable généralisé (GVF) et régulier (RVF) supposent qu'il n'y a aucun apport ni retrait d'eau, le volume restant constant. En RVF, le débit est uniforme sur toute la longueur.

Si un apport ou un retrait se produit, on parle d'écoulement à débit variable spatialement (SVF), qui peut être :

- Stationnaire : débit variant dans l'espace mais constant dans le temps (ex. : surverse d'un barrage latéral).
- Non stationnaire : débit variant dans l'espace et le temps (ex. : ruissellement de pluie).

I.5. Régimes D'écoulement :

L'écoulement d'un fluide réel en canal ouvert résulte de l'action combinée des forces d'inertie, de gravité et de frottement (viscosité et rugosité). L'analyse de cet écoulement repose sur des équations de mouvement réduites qui introduisent des coefficients et des nombres adimensionnels :

I.5.1. Le nombre de Froude :

C'est un nombre sans dimension qui caractérise, dans un écoulement, l'importance relative des forces d'inertie par rapport aux forces de gravité. Il s'exprime comme le rapport entre une vitesse caractéristique du fluide et la vitesse de propagation des ondes de gravité sur la surface libre

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

V : vitesse moyenne du fluide (m/s)

G : accélération de la pesanteur ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$)

L : longueur caractéristique, généralement la profondeur hydraulique D en écoulement à surface libre

Le nombre de Froude permet de distinguer trois états fondamentaux de l'écoulement à surface libre

- *Surcritique (fluvial) ($Fr < 1$)*
- *Critique ($Fr = 1$)*
- *Supercritique (torrentiel) ($Fr > 1$)*

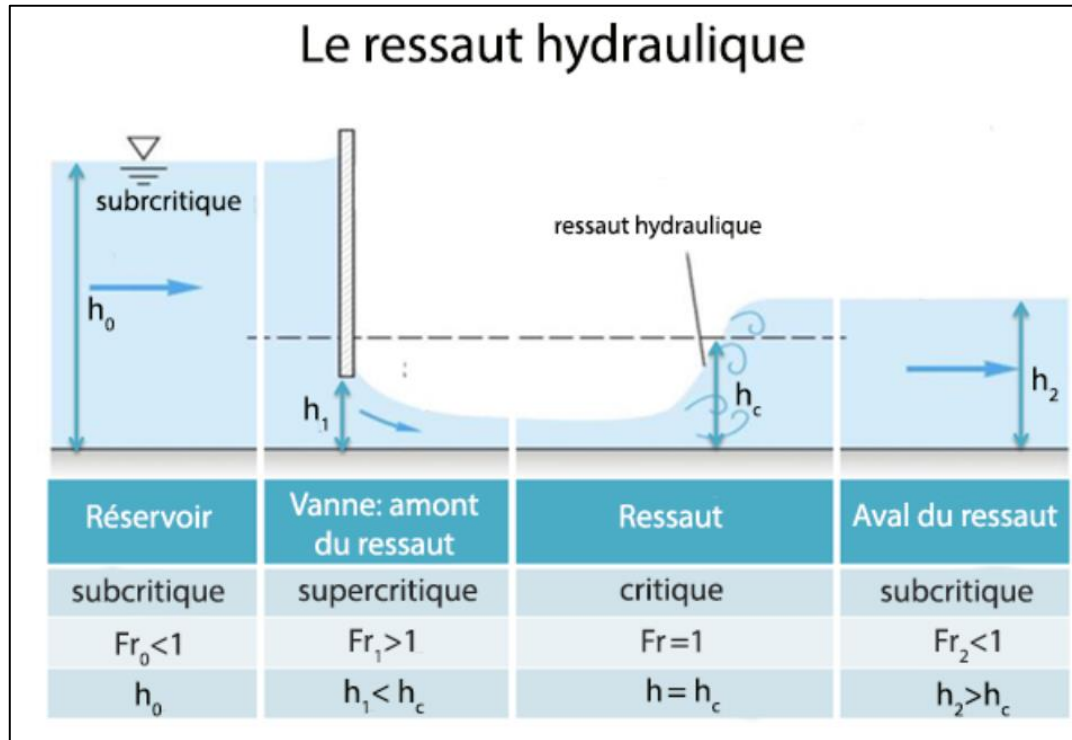


Figure I.1 : Schéma d'un ressaut hydraulique

I.5.2. Le nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension qui exprime le rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses dans un fluide en mouvement.

Selon la valeur de Re , on distingue trois régimes d'écoulement :

Laminaire : $Re < 2\,000$ (effets visqueux dominants)

- Transitoire : $2\,000 \leq Re \leq 4\,000$ (instabilités croissantes)
- Turbulent : $Re > 4\,000$ (effets inertiels dominants).

I.6. Le Ressaut Hydraulique :

I.6.1. Définition :

Un ressaut hydraulique est un phénomène d'écoulement complexe et une discontinuité de surface qui se produit lors du passage d'un écoulement supercritique à un écoulement subcritique en canal ouvert. Son apparition est influencée par de nombreuses structures hydrauliques, notamment les seuils, les déversoirs, les vannes, les piliers ou les bassins de tranquillisation. Ces structures augmentent la profondeur d'écoulement et permettent la transition de l'écoulement à travers le ressaut hydraulique. Cette transition implique un écoulement hautement turbulent, marqué par des turbulences à grande échelle, des ondes de

surface, une dissipation d'énergie et un entraînement d'air, avec des caractéristiques dissipatives importantes (Chanson, 2015).

Le ressaut hydraulique est décrit dans la littérature comme un phénomène qui se produit au moment de la transition entre un écoulement torrentiel et un écoulement fluvial. Il se produit lors d'une élévation abrupte du niveau de l'eau dans une petite région ou lors d'une perte importante de charge hydraulique localisée (Hager & Li, 1992).



Figure I.2 : le ressaut hydraulique dans la nature.



Figure I.3 : le ressaut hydraulique dans le laboratoire

I.6.2. Ressaut hydraulique classique

Le ressaut hydraulique est dit classique celui qui se forme dans un canal rectangulaire à section droite, présentant une pente nulle ou très faible. Ce type de ressaut constitue le profil de référence ayant servi de base aux études théoriques et expérimentales du phénomène.

Il se caractérise par : L_r : longueur du rouleau, L_j : longueur totale du ressaut, h_1 et h_2 : hauteurs conjuguées en amont et en aval.

Le rendement de dissipation d'énergie est évalué à partir du rapport entre la perte de charge provoquée par le ressaut et l'énergie initiale de l'écoulement.

Après sa formation, la torrentialité de l'écoulement en amont est définie par un nombre de Froude F_1 supérieur à 1, dépendant du débit et de la première hauteur conjuguée initiale h_1 .

Le comportement du ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement, utilisée pour établir la relation : $Y=h_2/h_1$ entre les hauteurs conjuguées, ainsi que le lien avec le nombre de Froude F_1 (Debabeche, M., 2003)

I.6.3. Classification de ressaut :

Le critère principal de classification est le nombre de Froude F_1 , déterminé à partir des conditions de l'amont. Ce nombre correspond au rapport entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation des ondes ou perturbations dans cet écoulement.

Pour $F_1 \leq 1$: le régime est lent ou critique, et aucun ressaut ne se forme.

Pour $1 < F_1 \leq 1,7$ d'après (Andersen, 1978) : la différence entre les profondeurs conjuguées en amont et en aval est très faible. Le ressaut se manifeste par de légères rides à la surface libre, visuellement proches de celles du régime critique. On parle alors de (figure I.4 a).

Selon la classification de (Bradley & Peterka, 1957), pour des valeurs de $F_1 > 1,7$, on distingue quatre formes classiques de ressaut :

Pré-ressaut ($1,7 < F_1 < 2,5$)

- ✓ Phénomène similaire au ressaut ondulé mais plus marqué.
- ✓ Apparition de petits tourbillons en surface.
- ✓ Surface libre globalement plane, distribution des vitesses régulière.
- ✓ Rendement énergétique très faible. (Figure I.4 b)

Ressaut oscillant ($2,5 < F_1 < 4,5$)

- ✓ Écoulement pulsatoire.
- ✓ Turbulence maximale localisée soit près du fond, soit à la surface. (Figure I.4 c)

Ressaut stable ($4,5 < F_1 < 9$)

- ✓ Ressaut bien formé et localisé.
- ✓ Souvent utilisé dans les bassins de dissipation d'énergie pour son rendement élevé (45 % à 70 %). (Figure I.4 d)

Ressaut agité ou clapoteux ($F_1 > 9$)

- ✓ Présence de masses d'eau qui roulent sous la surface au début du ressaut, retombant ensuite sur le courant rapide amont.
- ✓ Mouvement intermittent provoquant de nouvelles ondulations en aval.
- ✓ Surface libre très irrégulière. (Figure I.4 e)

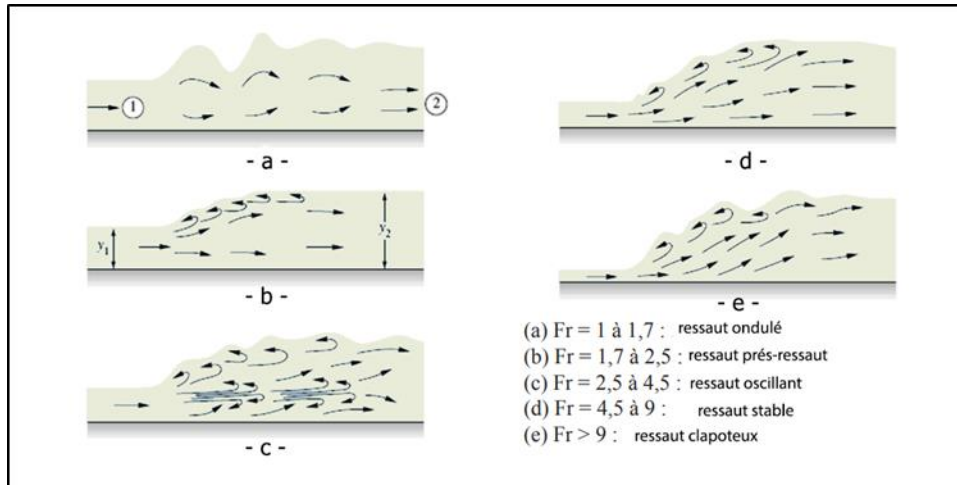


Figure I.4 : Classification des ressauts

I.6.4. Les paramètres hydrauliques du ressaut :

I.6.4.1. Les hauteurs conjuguées du ressaut :

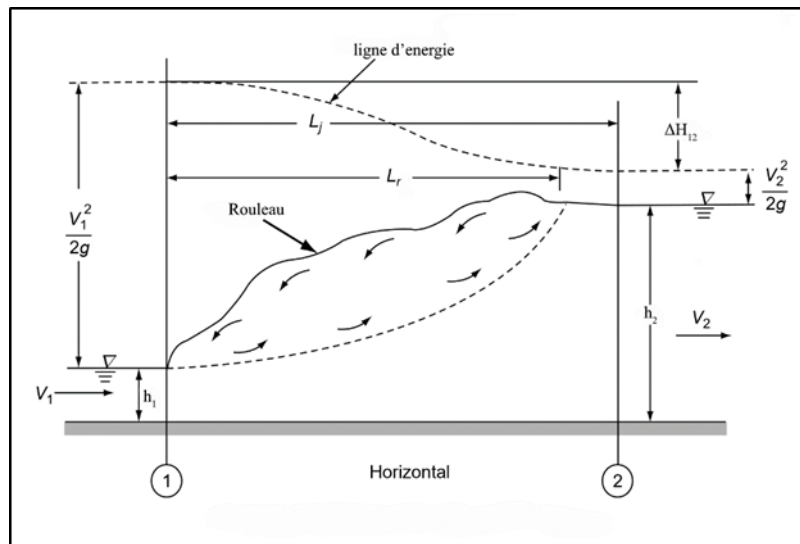


Figure I.5: Ressaut hydraulique classique.

Les hauteurs conjuguées désignent les hauteurs d'eau h_1 et h_2 , mesurées respectivement en amont et en aval d'un ressaut hydraulique (figure I.5).

Pour un canal rectangulaire, la relation entre ces deux hauteurs s'établit en appliquant l'équation de la quantité de mouvement à un volume de contrôle compris entre les sections 1 et 2 (figure I.5).

Cette démarche conduit à l'expression, qui permet de déterminer l'une des hauteurs conjuguées (h_1 ou h_2) dès lors que l'autre est connue.

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gb^2h_1^3}$$

Et sachant que $V_1 = Q/A_1 V_1 = Q/A_1$ et $A_1 = b h_1 A_1 = b h_1$

L'équation de (Belanger, 1828) liant le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut au nombre de Froude F_1

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

(Hager et al., 1990) , (Hager & Sinniger, 1985) ont proposé une formule approchée qui s'applique lorsque le nombre de Froude F_1 est supérieur à 2

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

I.6.4.2. Longueurs caractéristiques du ressaut :

Les dimensions caractéristiques du ressaut hydraulique, à savoir la longueur du rouleau (L_r) et la longueur totale (L_j), ne peuvent être déterminées que par des méthodes expérimentales.

I.6.4.2.1. Longueur du rouleau :

Le rouleau représente une zone de recirculation du fluide, où l'écoulement à la surface se dirige vers l'amont. Par conséquent, son extrémité aval est définie par le point où la vitesse horizontale de la surface devient nulle (Hager et al., 1990). La relation expérimentale suivante, dérivée de leurs mesures, permet de calculer la longueur (L_r) :

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

$$\lambda_r^* = -12 + 100 \tanh\left(\frac{F_1}{12,5}\right) \text{ pour } 0.1 < w = \frac{h_1}{b} < 0.7$$

- $\lambda_r^* = \frac{L_r^*}{h_1} \lambda_r = \frac{L_r^*}{h_1}$: longueur relative du rouleau dépend du nombre de Froude F_1
- $w = \frac{h_1}{b} w = \frac{h_1}{b}$: rapport d'aspect
- $\tanh$: désigne la tangente hyperbolique.

Les auteurs ont proposé une relation simplifiée pour les nombres de Froude compris entre 2,5 et 8.

$$\frac{L_r^*}{h_1} = 8F_1 - 12 \text{ pour } 2,5 < F_1 < 8$$

I.6.4.2.2. Longueur du ressaut :

La seconde longueur caractéristique est celle du ressaut, (L_j). Plusieurs formules existent pour localiser sa section finale, dont une relation proposée par Hager et al. (1990).

$$\frac{Lj^*}{h_1} = 220 \tanh \left[\frac{(F_1 - 1)}{22} \right]$$

Selon Hager et al. (1990), la longueur relative moyenne Lj/h_2 prend une valeur constante de 6 pour la plage pratique $4 < Fr_1 < 12$, comme l'indique sa variation en fonction du nombre de Froude amont (Fr_1). Cette valeur est encore acceptée aujourd'hui.

$$\frac{Lj^*}{h_2} = 6$$

I.7. Historique Du Ressaut Hydraulique

L'étude du ressaut hydraulique, un phénomène fondamental en mécanique des fluides, s'est développée au fil des siècles. Son histoire peut être divisée en plusieurs grandes périodes.

I.7.1. Les Pionniers (XVe XIXe Siècle) :

Les premières observations et analyses ont été réalisées par de grands noms des sciences :

- Léonard de Vinci (1452-1519) : Premier à décrire et à esquisser le phénomène de manière expérimentale (De Padova & Mossa, 2021).
- Giovanni Battista Venturi (1746-1822) : Observe l'utilité du ressaut pour récupérer de la charge hydraulique en irrigation (Venturi, 1797).
- George Bidone (1781-1839) : Considéré comme le « père » de l'étude systématique du ressaut, il fut le premier à l'analyser de manière détaillée en laboratoire (Bidone, G, 1819).
- Jean-Baptiste Belanger (1789-1874) : Applique le principe de la quantité de mouvement et établit la première formulation théorique pour le calcul des hauteurs conjuguées (équation de Bélanger) (Belanger, 1828).
- Jacques Antoine Charles Bresse (1822-1883) : Élabore la théorie de la dissipation d'énergie à travers le ressaut (Bresse, 1860).
- Mansfield Merriman (1848-1925) : Établit une des premières expressions empiriques pour les hauteurs conjuguées basées sur des essais en laboratoire (De Padova & Mossa, 2021).

I.7.2. Fondements Modernes (Début du XXe Siècle Seconde Guerre Mondiale) :

Cette période est marquée par la quantification des paramètres du ressaut (longueur, hauteurs, dissipation) et l'introduction du nombre de Froude comme paramètre principal.

- Gibson : Détermine expérimentalement les hauteurs conjuguées et un facteur de correction de vitesse pour des nombres de Froude allant jusqu'à 8,6 (Hager & Castro-Orgaz, 2020).
- Kennison : Utilise l'équation de l'énergie pour présenter les hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude sur un diagramme adimensionnel, une première (De Padova & Mossa, 2021).
- Stevens (1925) : Décrit la dissipation d'énergie.

- Safranez (1927-1933) : Un chercheur européen qui réalise de nombreuses études, propose des diagrammes adimensionnels, une relation empirique pour une large gamme de (Fr) , et une formule pour la puissance dissipée et la longueur du rouleau (Safranez, K., 1927).
- Bakhmeteff & Matzke (1936) : Intègrent le carré du nombre de Froude (facteur d'écoulement cinétique) dans une théorie cohérente du ressaut.
- Citrini (1939) : Synthétise dans sa thèse l'ensemble des connaissances sur le ressaut à la veille de la guerre.

I.7.3. L'Âge d'Or et la Classification (Années 1950-1980)

Les recherches se diversifient avec l'étude des bassins de dissipation, des ressauts forcés et de l'influence de la géométrie.

- Bradley & Peterka (1957) : Leurs travaux à l'USBR permettent de déterminer la longueur du ressaut et de classer ses formes (ressaut oscillant, etc.) pour le dimensionnement des bassins.
- Chow (1959) : Dans son ouvrage fondamental "Open-Channel Hydraulics", il consacre un chapitre complet et clair au ressaut hydraulique.
- Rajaratnam (1965) : Un des grands contributeurs modernes, il étudie le ressaut sur fond rugueux, trace de nouveaux diagrammes adimensionnels pour le profil de surface et analyse divers types de ressauts.
- Analyse des écoulements : Les études se penchent sur la turbulence (Resch & Leutheusser, 1971), les pressions dynamiques (Abdul Khader & Elango, 1974).

Études sur des configurations spécifiques :

- Ressaut contrôlé par une marche (positive ou négative) : Forster & Skrinde (1950) initient les études, suivis par Moore & Morgan (1959), Sharp, J. J. (1974), et Hager et al. (1985, 1986, 1987), qui analysent de manière exhaustive le ressaut dans ces configurations et dans des canaux triangulaires.
- Ressaut forcé par des blocs et seuils dentés : Les études de Harleman, D.R.F. (1959), Pillai, N. S. & Unny, T. E. (1964), Rand (1965), et Basco, D. R. (1971) visent à optimiser la forme et la position des blocs pour maximiser la dissipation et minimiser l'érosion.
- Ressaut forcé par un seuil continu : Forster & Skrinde (1950), Shukry (1957), et surtout Rand (années 1960-70) qui classifie le phénomène. Les travaux se poursuivent sur la répartition des vitesses (Rajaratnam & Murahari, 1971)

I.7.4 Recherches Contemporaines (récents) :

Les recherches récentes se focalisent sur des géométries complexes et des effets spécifiques.

- (Achour et al., 2002) : Ressaut sur seuil mince en canal rectangulaire lisse (deux configurations).
- (Debabeche & Achour, 2007): Influence des seuils sur ressaut en canal triangulaire.

- (Kateb, S., 2006) : Ressaut en canal triangulaire rugueux.
- (Ghomri, A., 2012) : Effet de la rugosité du fond en canal profilé en « U ».
- (Riguet, F., 2021) : Ressaut en canal rectangulaire de forme composée.
- (Djamaa, W., 2022) : Ressaut en canal rectangulaire de forme composée lit mineur rugueux.
- (Lacheheb, S., 2023) : Ressaut en canal rectangulaire de forme composée lit majeur rugueux.
- (Nouacer, B., 2023) : Ressaut en canal rectangulaire rugueux avec pente.
- (Brahimi, A., 2024) : Effet de la rugosité du fond en canal rectangulaire.
- (Besser, D., 2026) : Ressaut en canal rectangulaire composée lit majeur rugueux avec pente positive.
- (Khechiba, H., 2026) : Ressaut en canal rectangulaire composée lit majeur rugueux Et lit mineur rugueux avec pente nulle.

I.8. Conclusion :

Ce chapitre a présenté une introduction aux généralités de l'écoulement à surface libre. La définition du ressaut hydraulique et ses caractéristiques fondamentales, à savoir : la hauteur initiale, la hauteur finale, la longueur totale et la longueur du rouleau de surface. Il a ensuite été établi que le ressaut hydraulique obéit à l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections amont et aval, en négligeant toutes les pertes de charge autres que celles engendrées par le ressaut lui-même, en s'appuyant sur les fondements théoriques établis par Bélanger. Enfin, un historique bref a retracé les origines de son étude et mis en lumière les contributions de ses principaux pionniers.

Chapitre II :

*Étude expérimentale de
l'effet de la section
composée sur le
ressaut hydraulique*

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé et forcé dans un canal rectangulaire de section composée. Il présente la problématique de la formation du ressaut sous différentes conditions, décrit la méthodologie expérimentale adoptée et expose les principaux résultats relatifs aux hauteurs conjuguées, aux longueurs caractéristiques et au rendement énergétique.

II.2. Approche Riguet Et Debabeche :

II.2.1. La problématique :

La modification des conditions amont et celles en aval conduit à aboutir à diverses configurations de ressaut hydraulique. Le ressaut hydraulique classique se produit sur un canal rectangulaire sans pente, et il est considéré comme contrôlé lorsque sa formation dépend de la présence d'un obstacle en aval du flux. Il est appelé forcé lorsqu'il est généré de part et d'autre de l'obstacle. Le ressaut hydraulique peut se développer dans des canaux prismatiques ou non prismatiques à fonds lisses ou rugueux.

En effet, la hauteur h_1 restant fixe, une augmentation du débit se traduit à la fois par un déplacement vers l'aval du ressaut et par une augmentation de sa longueur de roulement de surface L_r . Pour cela s'ajoute une augmentation de la distance Δx sur laquelle s'étend le ressaut. Pour le ramener à sa position initiale à environ 5 cm de la sortie du convergent, il faut augmenter la hauteur de seuil s . Pour chaque valeur du nombre de Froude F_1 correspondent les longueurs L_j et L_r ainsi que les hauteurs h_2 et s (voir l'illustré dans la figure (II.1)).

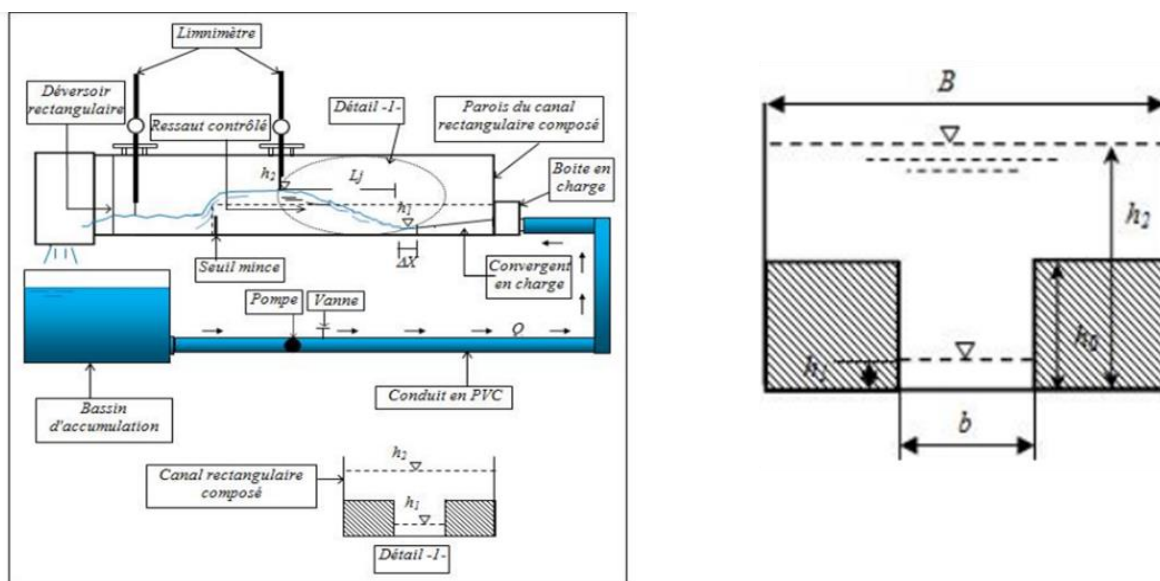


Figure II.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince en canal rectangulaire de section composée.

II.2.2. Évaluation des essais expérimentaux

Des mesures expérimentales de plusieurs paramètres ont conduit à des résultats. Ces paramètres sont : le débit volumique Q ; h_1 (hauteur initiale) ; h_2 (la hauteur finale) et s (hauteur du seuil) À partir de ces paramètres, plusieurs produits adimensionnels ont été créés, y compris le nombre de Froude F_1 et le rapport $Y = h_2/h_1$. Défini le nombre de Froude F_1 est comme suit :

$$F_1 = \frac{Q}{\sqrt{b^2 \cdot h_1^3 g}} \quad F_1 = \frac{Q}{\sqrt{b^2 \cdot h_1^3 g}} \quad (II.1)$$

Pour obtenir une configuration du ressaut contrôlé, pour une hauteur initiale h_1 et une position x de seuil fixes :

- Nous mesurons la hauteur déversant H_d .
- Calculons le débit volume correspondant en utilisant la relation du débitmètre rectangulaire (Hachemi 2006) :

$$Q = 0,3794 \cdot B \sqrt{2g} \beta (1 + 0,16496 \beta^{2,0716})^{3/2} h_d^{3/2}$$
$$Q = 0,3794 \cdot B \sqrt{2g} \beta (1 + 0,16496 \beta^{2,0716})^{3/2} h_d^{3/2} \quad (II.2)$$

- Q : le débit.
- $\beta = b/B$: le rapport de l'élargissement.
- $\tau = h_1/h$: Rapport des hauteurs.
- B = Largeur du lit majeur.
- b = Largeur du lit mineur.
- Le calcul du nombre de Froude F_1 et la mesure de la hauteur finale (h_2) du ressaut.



Figure II.2 : Le canal ayant servi à l'expérimentation.

II.2.3. Résultats obtenus par l'expérimentation :

II.2.3.1. Le rapport (Y) des hauteurs conjuguées :

Déterminé le rapport des hauteurs conjuguées ($Y = h_2 / h_1$) qui est le rapport de la hauteur final h_2 par la hauteur initiale h_1 . Le graphique suivant illustre des données expérimentales montrant clairement le rapport (Y) variant en fonction du F_1 , en considérant cinq tailles d'ouverture différentes ($h_1 = 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 ; 4$) pour les deux lits dans le canal composé.

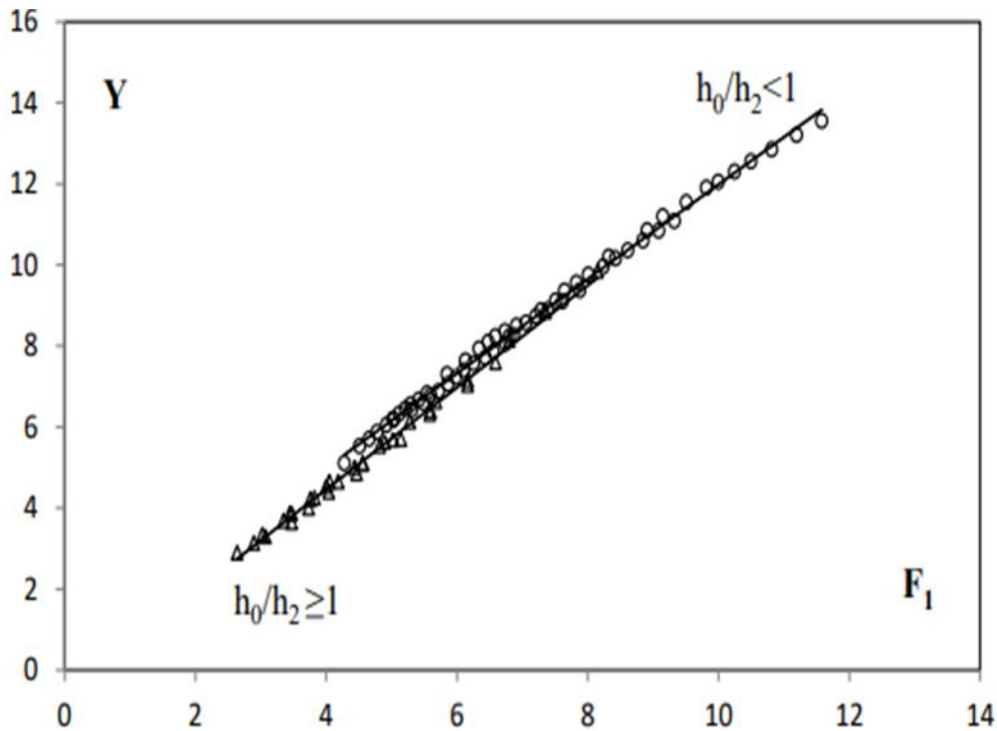


Figure II.3 : Rapport des hauteurs conjuguées Y par rapport au nombre de Froude F_1 .

(□ □) Les données expérimentales pour le lit majeur.

(□) Les données expérimentales pour le lit mineur.

(—) Courbes d'ajustement.

La courbe représente les changements du rapport Y par rapport du nombre de Froude. En examinant attentivement les résultats qu'il est possible de réaliser un ajustement linéaire pour chaque valeur de h_0/h_2 en utilisant l'équation $Y = a F_1 + b$. Ainsi, la relation entre le nombre de Froude F_1 et le rapport Y des hauteurs conjuguées peut être exprimée sous cette forme :

Pour $h_0/h_2 \geq 1$: $2.64 < F_1 < 8.14$ $Y = 1.258 F_1 - 0.573$

Pour $h_0/h_2 < 1$: $4.27 < F_1 < 11.58$ $Y = 1.165 F_1 + 0.328$

III.2.3.2. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 :

L_j est la distance entre amont et Laval du ressaut hydraulique. L'objectif principal de cette étude était de mesurer précisément L_j/h_1 pour une gamme testée, celle-ci est présenté dans la Figure (II.4).

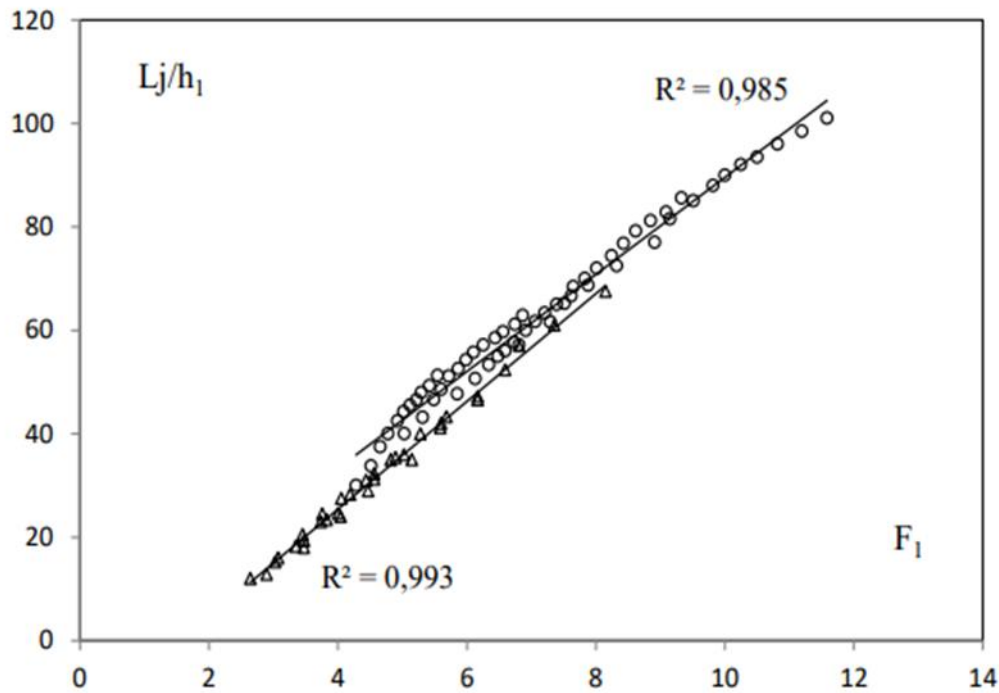


Figure II.4 : Rapport des hauteurs conjuguées Y par rapport au nombre de Froude F_1 .

□ □) Les données expérimentales pour le lit majeur.

□ □) Les données expérimentales pour le lit mineur.

(—) Courbes d'ajustement.

Pour un nombre de Froude fixe, la longueur relative L_j/h_1 d'un ressaut hydraulique dans le lit majeur est plus grande que son homologue dans le lit mineur, ceci est montré dans la figure (II.4).

II.2.3.3. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface par rapport au nombre de Froude F_1 :

L_r est défini comme la distance entre la section amont du ressaut hydraulique et la section aval de son rouleau de surface. Dans la figure (II.5), on peut voir comment cette longueur relative varie avec le nombre de Froude (F_1).

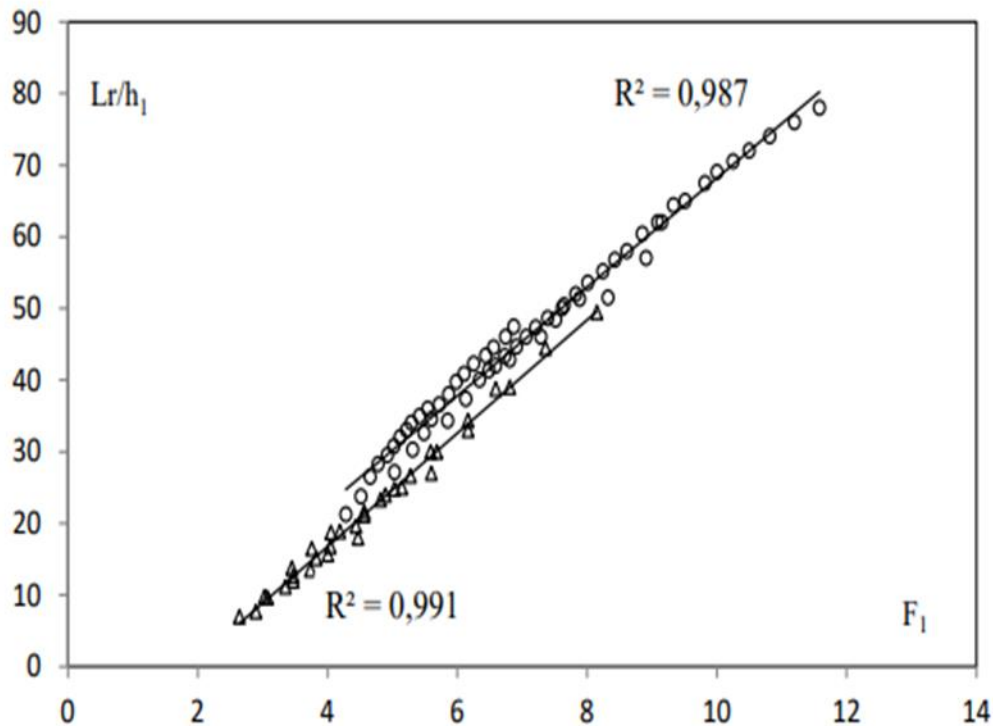


Figure II.5 : Représente un graphique de la variation de la longueur relative du rouleau de surface Lr/h_1 du ressaut hydraulique par rapport au nombre de Froude F_1 .

(|) Les points de mesure expérimentaux pour le lit majeur.

(⊗) Les points de mesure expérimentaux pour le lit mineur.

(—) Courbes d'ajustement.

La corrélation entre la longueur Lr/h_1 et le nombre de Froude F_1 peut être exprimée sous cette forme :

Pour $h_0/h_2 \geq 1$: $Lr/h_1 = 7,907 F_1 - 14,85$ $R^2 = 0,991$

Pour $h_0/h_2 < 1$: $Lr/h_1 = 7,599 F_1 - 7,788$ $R^2 = 0,987$

La figure (II.5) montre que le lit mineur a un rouleau de surface compact inférieur à celui au lit majeur développé dans la section composée.

II.2.3.4. L'efficacité du rendement (η) du ressaut hydraulique :

Compte tenu de la relation (I.10), il est possible de calculer le rendement (η). Les résultats obtenus sont affichés sur la figure (II.6).

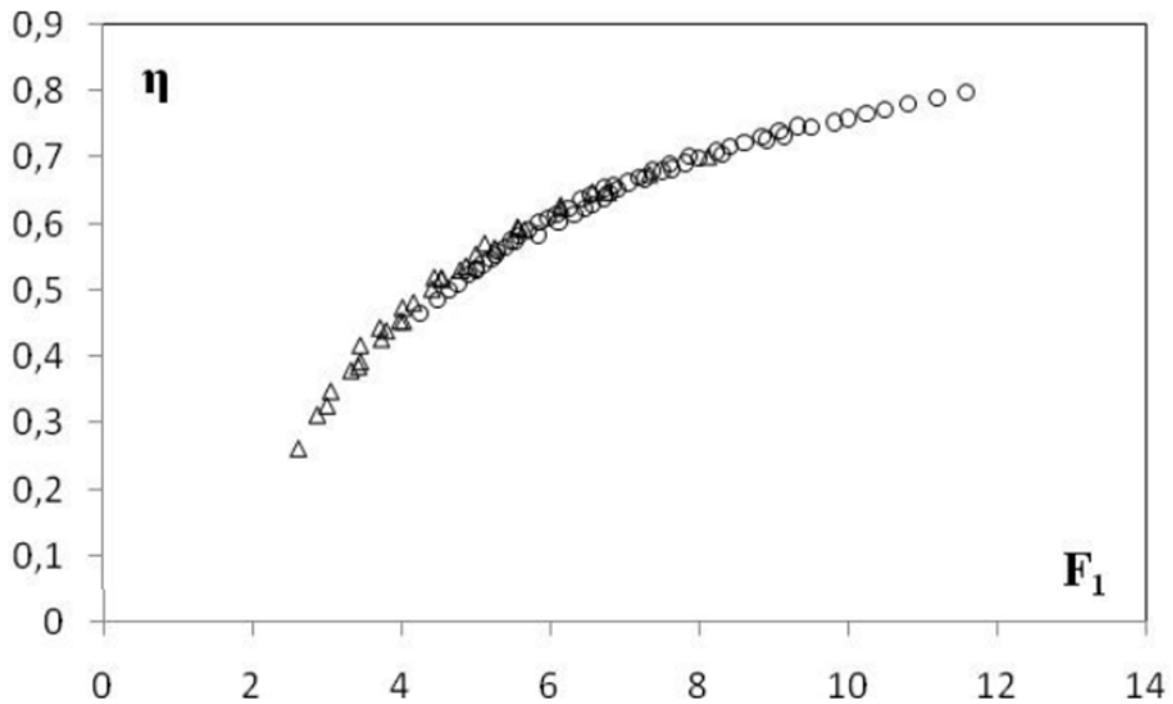


Figure II.6 : Représentation de l'efficacité (η) par rapport au nombre de Froude F_1 .

(|) indique les mesures expérimentales dans le lit majeur.

(⊗) indique les mesures expérimentales dans le lit mineur.

Le graphique (II.6) représente la relation entre l'efficacité (η) et (F_1) pour les deux lits d'un canal composé. Il montre que l'efficacité s'accroît avec une hausse du (F_1), comme on le constate pour les mesures dans le lit majeur qui sont légèrement inférieures à celles du lit mineur pour des valeurs de F_1 comprises entre 4 et 6. De plus, tous les points de mesure convergent au-delà d'une valeur de F_1 égale à 6 pour former un nuage unique des points donnés.

II.3. Conclusion :

Les résultats d'une étude expérimentale menée au laboratoire « LARHYSS » sur un ressaut hydraulique qui se produit dans un canal rectangulaire de section composée ont montré que le rapport Y des hauteurs conjuguées augmente avec le nombre de Froude F_1 . Pour un nombre de Froude fixé, le rapport Y est plus important en lit majeur qu'en lit mineur. La longueur relative L_j/h_1 et L_r/h_1 varient également avec F_1 , avec des relations expérimentales adimensionnelles telles que $L_r/h_1 = 7,907 F_1 - 14,85$ ($R^2 = 0,991$) pour $h_0/h_2 \geq 1$. L'efficacité η du ressaut s'accroît avec F_1 . Deux relations expérimentales adimensionnelles ont été développées pour dimensionner les ouvrages hydrauliques, notamment les bassins d'amortissement. L'étude a permis d'estimer les longueurs caractéristiques du ressaut pour chaque lit et confirme que le ressaut réduit davantage ses caractéristiques en lit mineur.

Chapitre III

*Description et
fonctionnement du
modèle expérimental*

III.1 Introduction

Ce chapitre vise à exposer tous les instruments et le Protocole expérimental qui gèrent les caractéristiques du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur et mineur rugueux et pente nulle. On va présenter essentiellement le protocole expérimental, incluant la description du canal rectangulaire à section composée, ainsi que des appareils et instruments utilisés pour mesurer les caractéristiques du ressaut hydraulique.

III.2 Description du canal expérimental utilisé dans les expériences du ressaut hydraulique

L'étude expérimentale consiste à investiguer les ressauts hydrauliques à l'aide d'un canal hydraulique de 10 m de longueur et 0,5 m de profondeur avec une section rectangulaire installé au Laboratoire d'exploitation et valorisation des ressources naturelles en zones arides de l'Université de Ouargla. Le canal, orienté horizontalement avec une pente nulle, présente une dimension de 4 m de longueur et de hauteur 15,5 cm avec des parois en plexiglas transparent pour visualiser clairement l'écoulement. La section composée se compose d'un lit mineur (largeur 14,4 cm) et d'un lit majeur (largeur 25 cm).



Figure III.1: Photo du canal d'expérimentation au Laboratoire.

La pompe centrifuge transfère l'eau du bassin d'accumulation vers le canal expérimental par l'intermédiaire des conduites d'écoulement. Elle peut fournir un débit maximal de 50 L/s à travers une conduite de 150 mm de diamètre, alimentant une boîte métallique fermée munie d'une plaque à orifice, ce qui permet de générer un écoulement adapté à la formation du ressaut hydraulique. Le fonctionnement repose sur la force centrifuge, qui crée la pression nécessaire, tandis que le levier de commande offre la possibilité d'ajuster le débit afin d'analyser l'influence de cette variable sur le ressaut hydraulique dans diverses conditions.



Figure III.2: La pompe utilisée pour générer le débit

Le bras de réglage du canal expérimental permet de modifier l'inclinaison de la structure. Cette fonctionnalité offre la possibilité d'analyser l'influence de la pente sur la vitesse d'écoulement, la profondeur de l'eau et la formation du ressaut hydraulique, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des phénomènes hydrauliques dans des conditions variées.



Figure III.3 : Bras de réglage de pente expérimentale.

Un bassin d'accumulation est un réservoir utilisé dans canal expérimental pour stocker l'eau avant qu'elle ne soit pompée dans le système. Il contrôle du débit et assure une alimentation continue du pompage.



Figure III.4: Bassin d'accumulation dans le canal expérimental.

Débitmètre d'eau, utilisé dans le canal expérimental pour mesurer avec précision le volume d'eau refoulé dans le système.



Figure III.5: Débitmètre d'eau dans le canal expérimental.

Le déversoir rectangulaire du canal expérimental est utilisé pour contrôler et mesurer le débit. Il est installé à l'intérieur du canal pour créer une différence de niveau d'eau, permettant de calculer le débit.

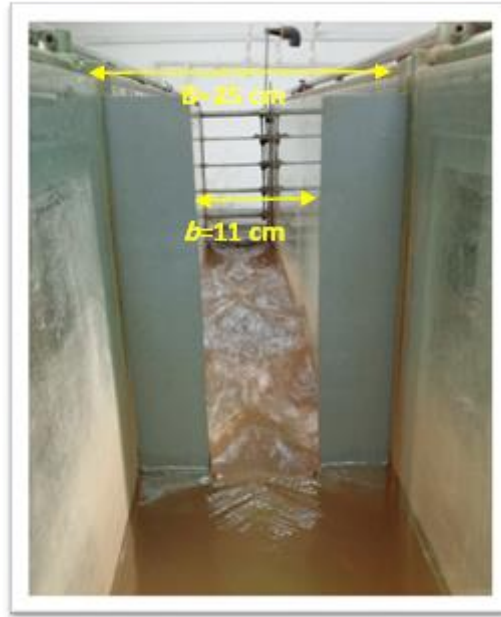


Figure III.6: Déversoir rectangulaire inséré dans le canal expérimental.

Lorsque le débit traverse le déversoir, la hauteur de l'eau écoulée d_{est} mesurée à l'aide d'un limnimètre. Le calcul est basé sur la relation empirique présentée par Hachémite Rachad (2007). Où d_{est} inséré dans l'équation pour calculer directement le flux, à condition que le rapport d'élargissement β soit inférieur à 0,45.

La relation empirique par Hachémite Rached (2007) est ci-contre :

$$Q = 0,3794B\sqrt{2g\beta(1 + 0,16496\beta^{2,0716})^{3/2}h_{\text{dev}}^{3/2}}$$

Où :

Q : Débit en (m^3/s).

B : Largeur du canal (m).

β : Rapport de forme : 0,44.

h_{dev} : Hauteur de la lame déversant en (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2).

Cette relation est applicable lorsque $\beta = b/B < 0,45$.

III.3 Limnimètre pour la mesure du niveau d'eau :

Le limnimètre est un instrument destiné à mesurer la hauteur d'eau dans le canal expérimental. Installé sur le bord du canal, il permet de suivre avec précision les variations du niveau d'écoulement, notamment après la formation du ressaut hydraulique.

La procédure de mesure consiste à ajuster la base de l'appareil de manière à ce que la pointe du capteur affleure la surface de l'eau. La lecture initiale est effectuée sur la règle graduée, au niveau situé juste au-dessus du zéro du vernier. Ensuite, on identifie la graduation du vernier qui coïncide parfaitement avec l'une des marques de la règle. La valeur

correspondante est ajoutée à la lecture de base, ce qui permet d'obtenir la profondeur de l'eau avec une grande précision.

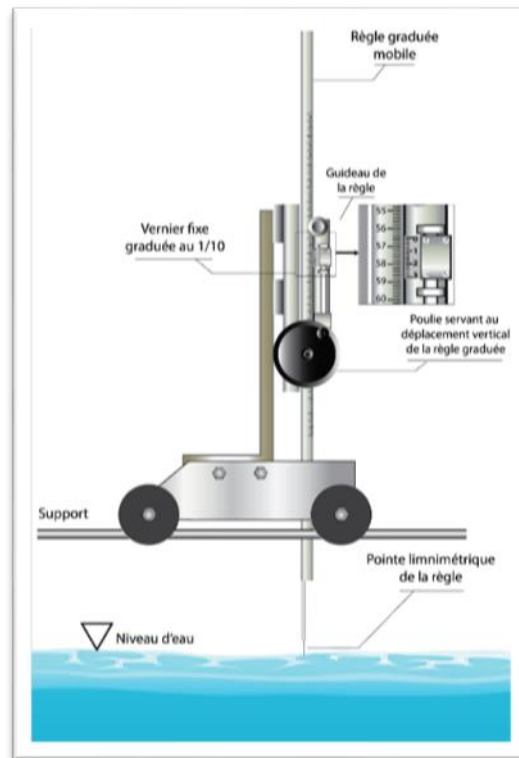


Figure III.7: Le limnimètre utilisé pour mesurer la hauteur d'eau dans le canal expérimental.

III.4 Description des Parois de Contrôle et de la Hauteur d'ouverture en Amont dans l'expérimentation du Ressaut Hydraulique

Les essais expérimentaux menés en laboratoire ont porté sur l'étude des écoulements brusques générés et contrôlés dans un canal de section composée avec lit mineur et majeur rugueux. L'étude a également inclus la conception et l'évaluation de parois de contrôle de hauteurs variées, allant de 2,5 cm à 21 cm (Photographie I.9), destinées à former et contrôler le ressaut hydraulique. Un large éventail de nombres de Froude a été exploré ($2 < F_1 < 9$), mettant en évidence les paramètres influençant la formation et l'évolution du ressaut. Ces seuils spécifiques, élaborés en laboratoire, jouent un rôle important dans la compréhension des mécanismes de dissipation d'énergie.



Figure III.8 : Parois minces de contrôle pour la formation du ressaut hydraulique.

Les essais ont été menés en faisant varier la hauteur d'ouverture de la section amont (h_1) selon quatre configurations distinctes : 2,5 cm ; 3,0 cm ; 3,5 cm et 4,0 cm. Afin d'explorer les caractéristiques hydrodynamiques du phénomène dans des conditions variées.

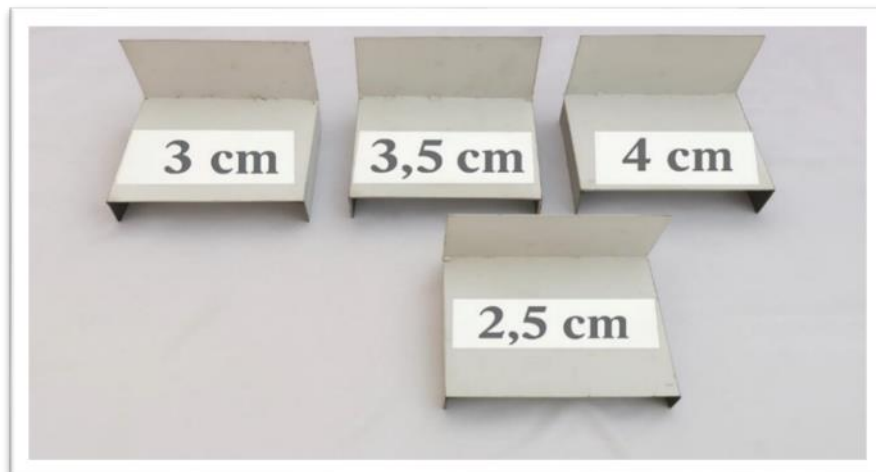


Figure III.9: Ouvertures h_1 du canal utilisé à l'étude du ressaut hydraulique.

III.5 Procédure de préparation des tapis rugueux :

Quatre types de tapis différents rugueux ont été conçus, chacun caractérisé par une rugosité équivalente spécifique ($\varepsilon = 6$ mm, $\varepsilon = 8$ mm, $\varepsilon = 10$ mm, $\varepsilon = 12$ mm), ont été préparés pour s'adapter à la configuration composée du canal. La dimension se compose d'un tapis de 4 m x 14,4 cm, ainsi que de deux tapis supérieurs de 4 m x 5,3 cm pour chacun. L'installation finale se compose d'un tapis de 4 m x 14,4 cm, ainsi que de deux tapis supérieurs de 4 m x 5,3 cm pour chacun. Des granulés de plastique ont été collés sur ces tapis à l'aide de fil à pêche, et fixés avec de la colle Mitreapel (AC 500 et CA 130), assurant ainsi une fixation solide.

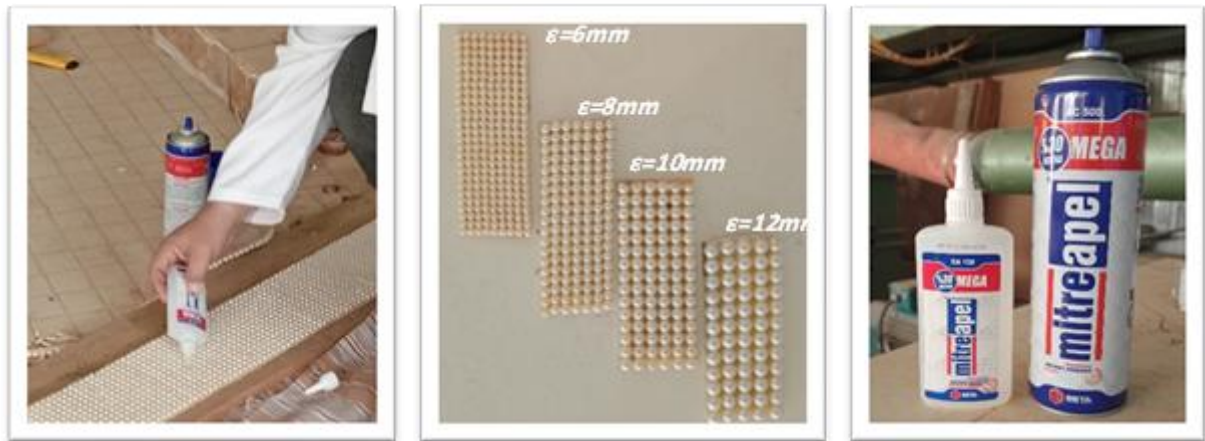


Figure III.10 : - 1. Adhésif Mitreapel utilisé pour la fixation | 2. Application de l'adhésif sur le tapis rugueux.

Un adhésif TKK Tekasil Universal a été utilisé pour installer les tapis rugueux. Cet adhésif se caractérise par son excellente adhérence. Ces propriétés spécifiques rendent les tapis rugueux rigidement fixés dans le canal composé.



Figure III.11 :- 1. Adhésif Tekasil utilisé pour la fixation | 2. Tapis rugueux installé dans le canal expérimental.

III.6. Protocol d'étude expérimentale :

Cette étude expérimentale se concentre sur l'analyse du ressaut hydraulique contrôlé par des parois minces au sein d'un canal rectangulaire composé, constitué d'un lit mineur et d'un lit majeur rugueux. Les différentes hauteurs de parois minces, variant de 2,5 cm à 21 cm, ont été examinées en adoptant quatre hauteurs initiales du niveau d'écoulement à l'entrée, à savoir 2,5, 3, 3,5 et 4 cm. Au cours des expériences, une large gamme de nombres de Froude initiaux F_1 a été déterminée, s'étendant de 2 à 9.

La paroi mince est placée dans le canal en travers de l'écoulement provoque des modifications dans les caractéristiques de l'écoulement, entraînant la formation d'un ressaut

hydraulique dont les propriétés varient en fonction de la hauteur de l'écoulement et de la géométrie du canal. Plusieurs variables hydrauliques et géométriques ont été mesurées, parmi lesquelles le débit volumique Q , la profondeur initiale h_1 , la profondeur finale h_2 , et la longueur finale du ressaut L_j . Lorsqu'une paroi mince est installée à l'extrémité du canal, toute augmentation du débit Q entraîne la formation d'un ressaut hydraulique. La relation entre Q et h_1 permet de calculer le nombre de Froude initial F_1 . Avec l'augmentation de F_1 , la position du ressaut se déplace vers l'aval et sa longueur augmente. À chaque valeur de F_1 correspond une longueur spécifique L_j du ressaut et une hauteur h_2 déterminée.

Plusieurs propriétés du ressaut développé par les parois minces ont été analysées, telles que : la profondeur initiale h_1 , la profondeur finale h_2 , la longueur de la zone de tourbillons L_r . Des paramètres adimensionnels ont été utilisés selon les relations suivantes :

F_1 : Nombre de Froude de l'écoulement.

$Y = h_2/h_1$: Rapport entre la profondeur finale et la profondeur initiale.

$S = s/h_1$: Rapport entre la hauteur de la paroi mince et la profondeur initiale.

Ces paramètres aident à comprendre le comportement du ressaut hydraulique causé par la présence de parois minces à l'intérieur d'un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur et lit majeur rugueux, et contribuent également à l'analyse de l'impact de la rugosité sur les caractéristiques de l'écoulement.

III.7 Conclusion

Cette étude présente de manière détaillée le dispositif expérimental ainsi que les méthodes de mesure mises en œuvre pour l'analyse du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à section composée. Les principaux éléments sont les suivants :

Canal expérimental : un canal de 10 m de longueur et 0,5 m de profondeur, doté de parois transparentes pour faciliter l'observation de l'écoulement, comprenant une section d'essai de 4 m.

Système de pompage : une pompe centrifuge assure la circulation de l'eau et la formation du ressaut hydraulique, avec réglage du débit par vannes de contrôle.

Instruments de mesure : un débitmètre, un déversoir rectangulaire pour quantifier le débit, et une jauge limnométrique pour suivre les niveaux d'eau en amont et en aval du ressaut.

Réglage du canal : un dispositif d'ajustement de la pente permet d'étudier l'influence de l'inclinaison sur l'écoulement, complété par des réservoirs de collecte assurant un pompage continu.

Préparation de surfaces rugueuses : différentes rugosités ont été préparées à l'aide d'adhésifs appliqués sur les parois internes du canal afin d'analyser leur impact sur le comportement de l'écoulement.

Cette étude présente de manière détaillée le dispositif expérimental et les méthodes de mesure pour l'analyse du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à section composée avec lits rugueux ($\varepsilon = 6$ à 12 mm) et pente nulle. Le canal expérimental (10 m de longueur, section composée : lit mineur 14,4 cm, lit majeur 25 cm) est équipé d'une pompe, d'un débitmètre, d'un déversoir rectangulaire et d'un limnimètre. Les parois minces de contrôle (hauteurs 2,5 à 21 cm) et les tapis rugueux préparés avec adhésifs ont permis d'explorer une large gamme de $F1$ ($2 < F1 < 9$) et de hauteurs initiales $h1$ (2,5 à 4 cm). Ce protocole a fourni les données nécessaires pour l'analyse semi-théorique du chapitre suivant.

Chapitre IV

Étude semi-théorique du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire composé et lits rugueux

IV.1. Introduction :

Ce chapitre analyse l'influence de la rugosité imposée aux lits sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans des canaux rectangulaires à section composée. Une approche semi-théorique, fondée sur des relations adimensionnelles, a été développée en intégrant des paramètres essentiels tels que le nombre de Froude, le coefficient de résistance, le rapport d'élargissement, le facteur de forme et le rapport de profondeurs conjuguées. Cette méthodologie, issue de l'application de la théorie d'Euler entre deux sections du ressaut, permet de prédire le rapport de profondeurs conjuguées à partir du débit et des valeurs de rugosité absolue testées. Les validations expérimentales confirment la fiabilité et la précision du modèle proposé, démontrant sa pertinence pour l'estimation du ressaut hydraulique sous diverses conditions de rugosité.

IV.2. Analyse Théorique :

La Figure (IV.1) illustre un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil dans un canal rectangulaire composé des lits rugueux à pente nulle. Un seuil dénuyé est placé à l'extrémité aval du canal afin d'élever la ligne d'eau en aval. Les hauteurs conjuguées h_1 et h_2 correspondent respectivement aux sections initiale et finale du ressaut. L'écoulement est en régime torrentiel en amont et fluvial en aval. En utilisant la théorie d'Euler. La fonction adimensionnelle à développer s'exprime par $f(Y, Fr, Cr, \beta, \tau) = 0$, où : Y représente le rapport des profondeurs d'écoulement (h_2/h_1), Fr est le nombre de Froude amont, $\tau = h_1/h$ désigne le rapport de forme, $\beta = b/B$ est le rapport d'élargissement du canal, et Cr est le paramètre de résistance prenant en compte les effets de rugosité.

En considérant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Distribution hydrostatique des pressions dans les sections amont et aval ;
- Frottements négligeables entre les particules d'eau et les parois du canal ;
- Pente variable du canal ;
- Résistance de l'air négligeable, avec un écoulement permanent.

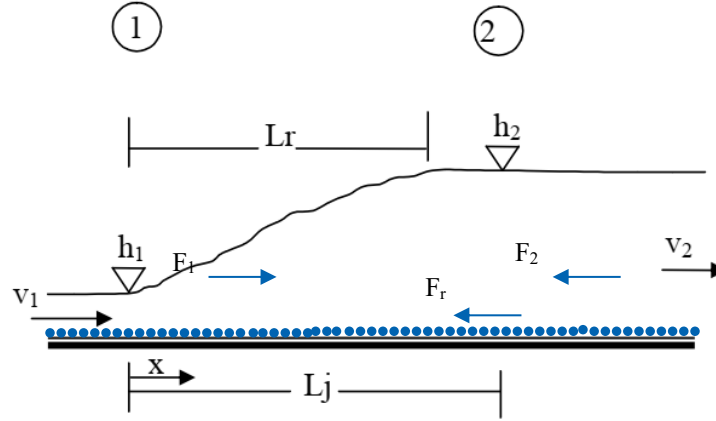


Figure IV.1 : Représentation schématique d'un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince.

L'équilibre des quantités de mouvement entre les sections initiale (amont) et finale (aval) du ressaut hydraulique s'écrit :

$$\rho Q v_2 - \rho Q v_1 = f_1 - f_2 - f_r \quad (IV.1)$$

$$\rho Q (v_2 - v_1) = f_1 - f_2 - f_r \quad (IV.2)$$

On a : $v_1 = \frac{Q}{A_1} v_1 = \frac{Q}{A_1}$; $v_2 = \frac{Q}{A_2} v_2 = \frac{Q}{A_2}$

L'équation de la quantité de mouvement peut être décrite comme suit :

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = f_1 - f_2 - f_r \quad (IV.3)$$

- f_1 et f_2 sont respectivement les forces de pression s'exerçant sur les sections amont et aval du ressaut :

$$f_1 = P_1 A_1 \quad f_1 = P_1 A_1 \quad (IV.4)$$

$$f_2 = P_2 A_2 \quad f_2 = P_2 A_2 \quad (IV.5)$$

- f_r : La résistance provoquée par la rugosité imposée au lits majeur et mineur du canal, dont l'expression s'écrit comme suit :

$$f_r = C \rho g L_j \left(\frac{v_1^2}{2g} \right) \cdot p \quad (IV.6)$$

Où:

g : L'accélération gravitationnelle (m/s²);

L_j : La longueur du ressaut hydraulique (m) ;

C : Le coefficient dû à la rugosité imposée () ;

p : Le périmètre mouillé rugueux du canal ($p=B$)(m) ;

γ : La masse spécifique de l'eau (Kg/m³),

Q : Le débit spécifique (m³/s).

- A_1 et A_2 : sont les sections initiale et finale :

$$A_1 = bh_1 \text{ et } A_2 = B(h_2 - h) + bh$$

Les forces vectorielles f_1 et f_2 sont respectivement définies comme suit :

$$f_1 = \bar{\omega} \left(\frac{h_1}{2} \right) bh_1 \quad f_1 = \bar{\omega} \left(\frac{h_1}{2} \right) bh_1 \quad (IV.7)$$

$$f_2 = \bar{\omega}(h_2 - h/2)bh + \bar{\omega}[(h_2 - h)/2]B(h_2 - h)$$

$$f_2 = \bar{\omega}(h_2 - h/2)bh + \bar{\omega}[(h_2 - h)/2]B(h_2 - h) \quad (IV.8)$$

En substituant les expressions des surfaces et des forces, l'équation (IV.9) peut s'écrire de la manière suivante :

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{bh_1} - \frac{1}{B(h_2 - h) + bh} \right) = -\bar{\omega} \left(\frac{h_1}{2} \right) bh_1 + \bar{\omega} \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) bh + \bar{\omega} \left[\frac{(h_2 - h)}{2} \right] B(h_2 - h) + C\rho g Lj \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) (B)$$

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{bh_1} - \frac{1}{B(h_2 - h) + bh} \right) = -\bar{\omega} \left(\frac{h_1}{2} \right) bh_1 + \bar{\omega} \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) bh + \bar{\omega} \left[\frac{(h_2 - h)}{2} \right] B(h_2 - h) + C\rho g Lj \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) (B)$$

(IV.9)

En multipliant les deux côtés de l'équation (IV.9) par $(1/\omega)$, nous obtenons le résultat suivant :

$$\frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{bh_1} - \frac{1}{B(h_2 - h) + bh} \right) = -\left(\frac{h_1}{2} \right) bh_1 + \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) bh + \left[\frac{(h_2 - h)}{2} \right] B(h_2 - h) + CLj \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) (B)$$

$$\frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{bh_1} - \frac{1}{B(h_2 - h) + bh} \right) = -\left(\frac{h_1}{2} \right) bh_1 + \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) bh + \left[\frac{(h_2 - h)}{2} \right] B(h_2 - h) + CLj \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) (B)$$

(IV.10)

Les deux membres de l'équation (IV.10) sont multipliés par $(1/bh_1^2)$ on obtient ce qui suit :

$$\frac{Q^2}{bg h_1^2} \left(\frac{1}{bh_1} - \frac{1}{B(h_2 - h) + bh} \right) = -\left(\frac{h_1}{2} \right) \frac{bh_1}{bh_1^2} + \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) \frac{bh}{bh_1^2} + \left[\frac{(h_2 - h)}{2} \right] B(h_2 - h) \frac{1}{bh_1^2} + CLj \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) (B) \frac{1}{bh_1^2}$$

$$\frac{Q^2}{bg h_1^2} \left(\frac{1}{bh_1} - \frac{1}{B(h_2 - h) + bh} \right) = -\left(\frac{h_1}{2} \right) \frac{bh_1}{bh_1^2} + \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) \frac{bh}{bh_1^2} + \left[\frac{(h_2 - h)}{2} \right] B(h_2 - h) \frac{1}{bh_1^2} + CLj \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) (B) \frac{1}{bh_1^2}$$

(IV.11)

$$\text{Où : } F_1 = \frac{Q}{\sqrt{b^2 h_1^3 g}} ; \beta = \frac{b}{B} ; Y = \frac{h_2}{h_1} ; \tau = h_1 / h ; C_r = \frac{L_j C}{h_1}$$

En substituant les expressions, l'équation (IV.12) peut s'écrire comme suite :

$$2F_1^2 \left(1 - \frac{\beta}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \right) = -1 + \left(\frac{2Y}{\tau} - \frac{1}{\tau^2} \right) + \left[\frac{\tau^2 Y^2}{\beta \tau^2} - \frac{2Y\tau}{\beta \tau^2} + \frac{1}{\beta \tau^2} \right] + 2CL_j \left(\frac{Q^2}{2gb^2 h_1^2} \right) (B) \frac{1}{bh_1^2}$$

$$2F_1^2 \left(1 - \frac{\beta}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \right) = -1 + \left(\frac{2Y}{\tau} - \frac{1}{\tau^2} \right) + \left[\frac{\tau^2 Y^2}{\beta \tau^2} - \frac{2Y\tau}{\beta \tau^2} + \frac{1}{\beta \tau^2} \right] + 2CL_j \left(\frac{Q^2}{2gb^2 h_1^2} \right) (B) \frac{1}{bh_1^2}$$

(IV.12)

On a :

$$\frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} + \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta} = \left(\frac{2Y}{\tau} - \frac{1}{\tau^2} \right) + \left[\frac{\tau^2 Y^2}{\beta \tau^2} - \frac{2Y\tau}{\beta \tau^2} + \frac{1}{\beta \tau^2} \right]$$

$$\frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} + \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta} = \left(\frac{2Y}{\tau} - \frac{1}{\tau^2} \right) + \left[\frac{\tau^2 Y^2}{\beta \tau^2} - \frac{2Y\tau}{\beta \tau^2} + \frac{1}{\beta \tau^2} \right] \quad \text{(IV.13)}$$

Si nous substituons l'équation (II.12) à l'équation (II.13), nous obtenons l'équation suivante :

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

(IV.14)

La relation établie est semi-théorique car le coefficient de résistance, C_r , ne peut être déterminé que par des mesures expérimentales. Si C_r est égal à zéro, cela correspond à l'approche décrite par Khattaoui et Achour (2012) :

$$F_1^2 \left(-1 + \frac{\beta}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \right) = \frac{1 - \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} - \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta}}{2} \quad F_1^2 \left(-1 + \frac{\beta}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \right) = \frac{1 - \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} - \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta}}{2} \quad \text{(IV.15)}$$

IV.3 Protocol d'étude expérimentale :

Cette section évalue le coefficient de frottement C_r par des expériences en laboratoire. L'étude vise à comprendre comment C_r varie en fonction du nombre de Froude (Fr) et de la rugosité de surface ε . La relation semi-théorique (IV.14), initialement introduite, est ici testée expérimentalement. Cette relation est donnée par l'équation (IV.14) :

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

(IV.14)

Cette équation décrit la relation entre Cr , le nombre de Froude (Fr) et les paramètres adimensionnels β , γ et τ . Pour faciliter l'analyse expérimentale, nous définissons l'expression $f(Y)$ comme suit :

$$f(Y) = F_1^2 \left(1 - \frac{C_r}{\beta}\right) \quad (IV.15)$$

On substitue cette équation (IV.15) avec la relation (IV.16), on obtient :

$$f(Y) = \frac{-1 + \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} + \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta}}{2} + \frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \quad (IV.16)$$

La variation de la fonction $f(Y)$ en fonction de F_1^2 a été examinée pour quatre valeurs de rugosité : $\varepsilon = 06 \text{ mm}$, $\varepsilon = 08 \text{ mm}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$ et $\varepsilon = 12 \text{ mm}$. Ces valeurs correspondent à différents tapis rugueux du lit majeur et mineur, influençant directement le coefficient de frottement Cr .

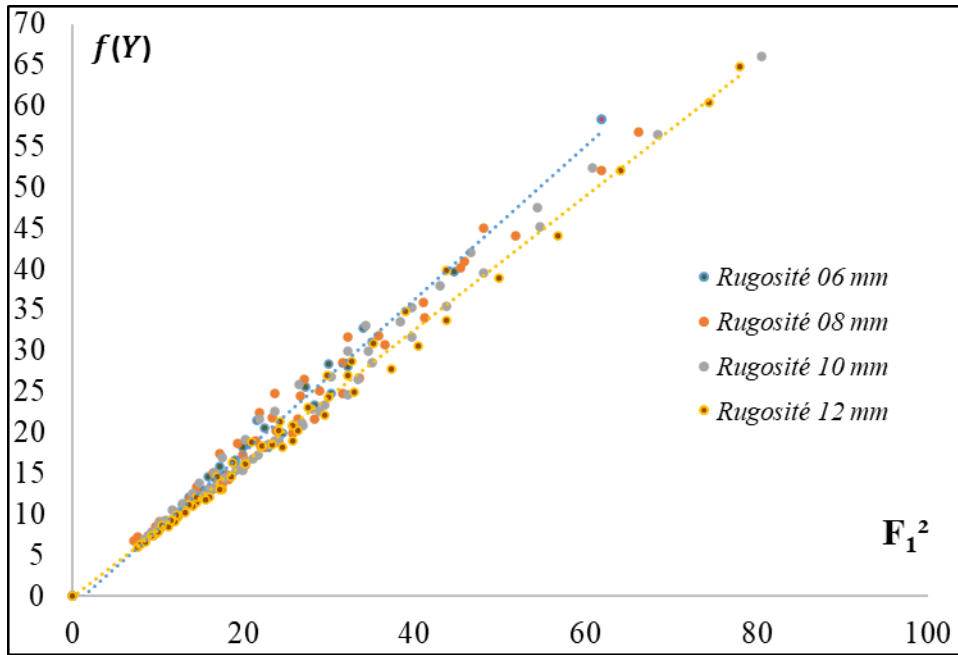


Figure IV.2 : Variation de l'expression $f(Y)$ en fonction de F_1^2 pour différentes valeurs de rugosité des lits.

Cette figure met en évidence quatre allures distinctes, chacune correspondant à une rugosité déterminée. L'analyse approfondie des données expérimentales relatives au ressaut hydraulique révèle que la répartition des points pour ces différentes allures peut être représentée avec une grande précision par une relation linéaire. Celle-ci s'exprime mathématiquement par l'équation suivante :

$$F_1^2 T = \frac{-1 + \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} + \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta}}{2} + \frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \quad (II.17)$$

Dans cette équation, le paramètre « T » est défini comme le facteur $(1 - \frac{C_r}{\beta} 1 - \frac{C_r}{\beta})$.

Un résumé des coefficients Cr dans le tableau 2.1.

Tableau IV.1 : Les valeurs du Cr

Rugosité (mm)	Rugosité relative (ε/B)	Paramètre (Cr)	R ²
6	0.024	0,0688	0.9835
8	0.032	0,0792	0.9804
10	0.04	0,0924	0.9886
12	0.048	0,1095	0.9892
0 (lisse)	0	0	1

À partir des données présentées dans le tableau, il apparaît que le coefficient de frottement Cr croît avec la rugosité relative (ε/B). L'analyse statistique de corrélation entre les valeurs appariées (ε/B , Cr) met en évidence une relation linéaire, exprimée par l'équation suivante : $Cr = 0.4166 (\varepsilon/B)$ Cette dépendance linéaire est illustrée graphiquement à la figure (IV.3), qui offre une représentation explicite de la variation du paramètre Cr en fonction de la rugosité relative (ε/B).

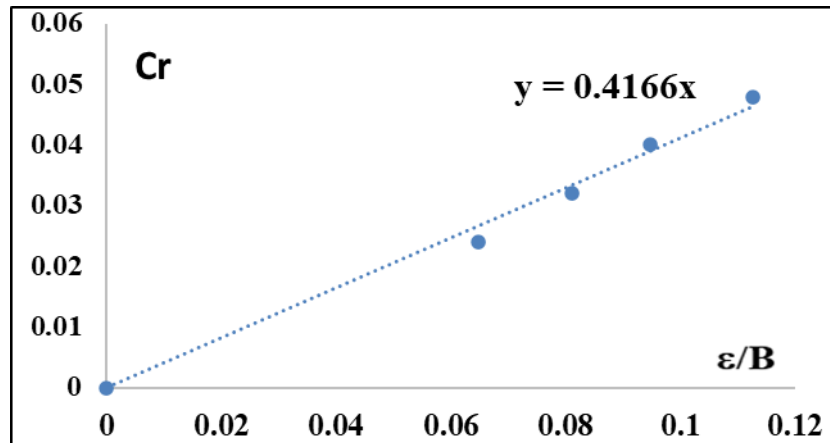


Figure IV.3 : Variation de Cr en fonction de ε/B .

En substituant l'expression de Cr dans l'équation (IV.18). L'équation semi-théorique se transforme comme suit :

$$F_1^2 \left(1 - \frac{0.4166 (\frac{\varepsilon}{B})}{\beta} \right) = \frac{-1 + \frac{(2Y - \frac{1}{\tau}) + (\frac{Y - \frac{1}{\tau}}{\beta})^2}{2}}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} + \frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}}$$

$$F_1^2 \left(1 - \frac{0.4166 (\frac{\varepsilon}{B})}{\beta} \right) = \frac{-1 + \frac{(2Y - \frac{1}{\tau}) + (\frac{Y - \frac{1}{\tau}}{\beta})^2}{2}}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} + \frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \quad (IV.18)$$

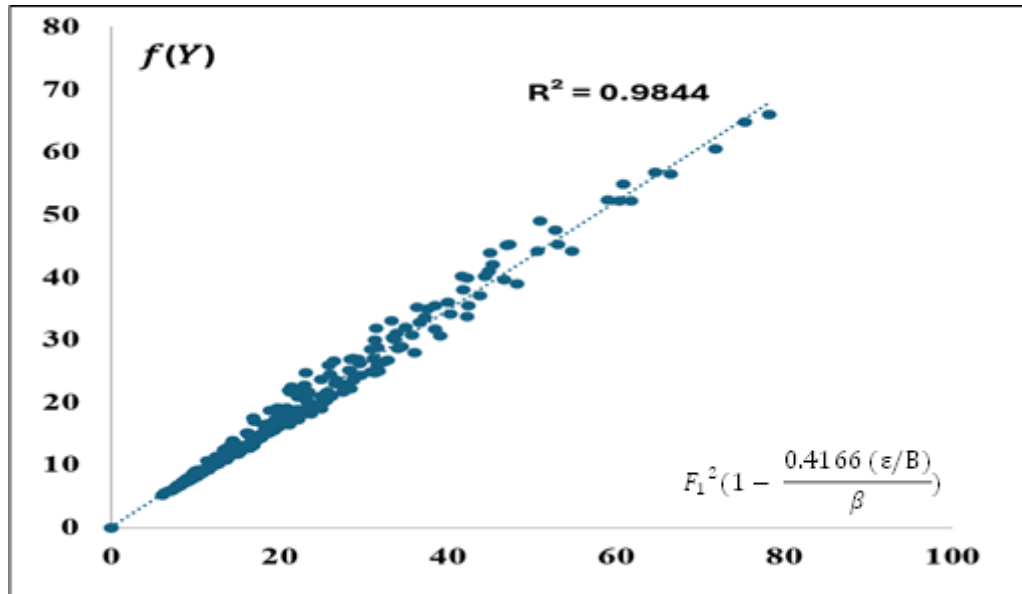


Figure IV.4 : Variation de $f(Y)$ par rapport à $F_1^2(1 - \frac{0.4166(\epsilon/B)}{\beta})$.

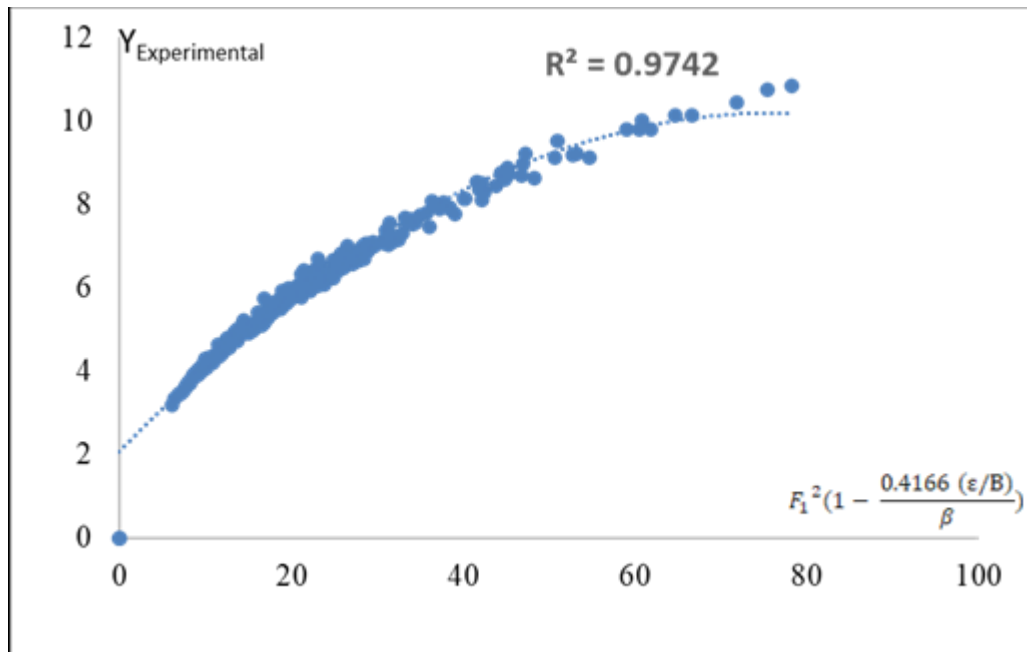


Figure IV.5 : Variation de Y expérimental par rapport à $F_1^2(1 - \frac{0.4166(\epsilon/B)}{\beta})$.

Une expression fonctionnelle générale est proposée sous la forme :

$$Y = aF_1^m \left(1 - \frac{0.4166 (\varepsilon/B)}{\beta}\right)^n Y = aF_1^m \left(1 - \frac{0.4166 (\varepsilon/B)}{\beta}\right)^n$$
 Les paramètres (a, m, n) ont été ajustés par régression non linéaire sur la base des données expérimentales, en recourant à la méthode des moindres carrés. Cette procédure a permis d'obtenir l'équation finale, présentée ci-après :

$$Y = 1.329 F_1^{0.986} \left(1 - \frac{0.4166 (\varepsilon/B)}{\beta}\right)^{1.430} Y = 1.329 F_1^{0.986} \left(1 - \frac{0.4166 (\varepsilon/B)}{\beta}\right)^{1.430}$$

(IV.19)

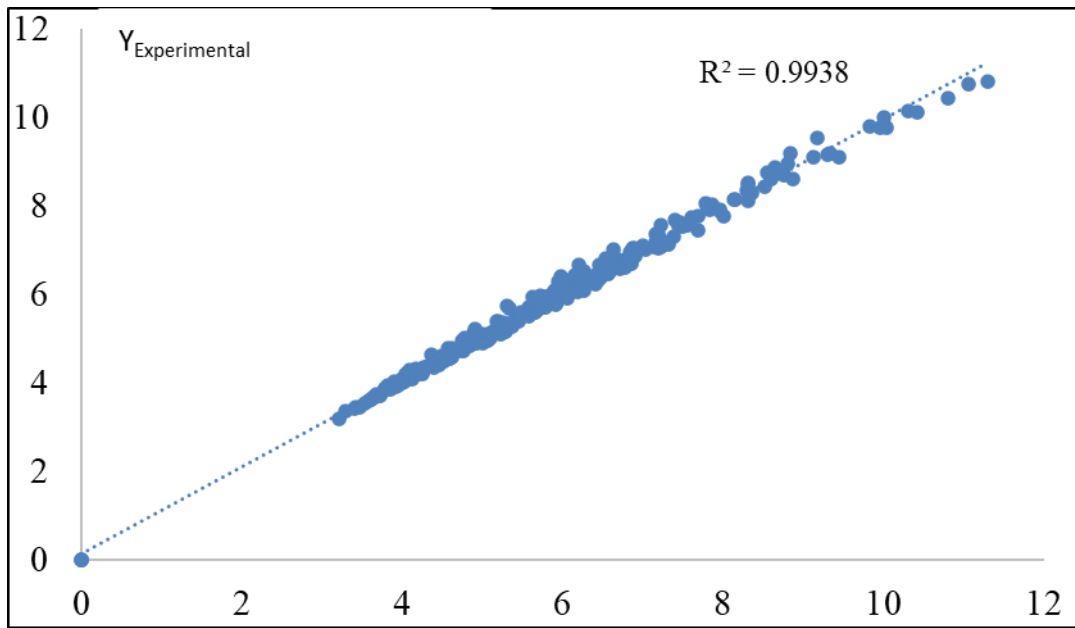


Figure IV.6 : Comparaison entre Y_{exp} avec l'approche semi théorique.

$$Y = 1.329 F_1^{0.986} \left(1 - \frac{0.4166 (\varepsilon/B)}{\beta}\right)^{1.430}$$

La figure IV.6 illustre la comparaison entre les valeurs expérimentales (Y expérimental) et le modèle mathématique issu d'une équation empirique. L'alignement étroit des points de données sur la courbe de tendance traduit une forte concordance entre les résultats de l'approche semi-théorique et les observations expérimentales.

Le Tableau IV.2, expose les erreurs relatives entre les résultats issus de l'équation semi-théorique (IV.14) et les données expérimentales. L'analyse de ce tableau montre que les erreurs relatives majoritairement inférieures à 5 %, confirmant ainsi la fiabilité de la méthode utilisée et la cohérence des mesures expérimentales réalisées au laboratoire.

Tableau IV.2 : Erreurs relatives entre les valeurs calculées par l'équation (IV.19) et les données expérimentales.

Y_{exp}	Y_{app}	$\Delta Y/Y$ (%)	Y_{exp}	Y_{app}	$\Delta Y/Y$ (%)
-----------	-----------	------------------	-----------	-----------	------------------

5.50	5.50	0.04	5.80	5.90	-1.64
5.72	5.78	-1.06	6.08	6.18	-1.70
6.00	6.07	-1.13	6.20	6.26	-0.90
6.10	6.14	-0.66	6.38	6.48	-1.50
6.32	6.36	-0.63	6.62	6.77	-2.30
6.80	6.81	-0.08	7.06	7.15	-1.27
7.00	7.03	-0.45	7.30	7.38	-1.08
7.20	7.26	-0.84	7.78	7.69	1.18
7.56	7.57	-0.13	8.14	8.16	-0.25
8.00	7.80	2.45	8.74	8.56	2.05
8.44	8.52	-0.96	9.10	9.13	-0.34
9.20	8.85	3.85	9.78	9.97	-1.91
9.52	9.18	3.62	10.14	10.31	-1.65
10.00	10.01	-0.15	4.97	4.95	0.43
4.90	4.91	-0.26	5.00	5.06	-1.16
5.07	5.03	0.81	5.20	5.23	-0.56
5.20	5.20	0.06	5.30	5.34	-0.83
5.33	5.37	-0.68	5.40	5.46	-1.11
5.47	5.43	0.71	5.70	5.75	-0.93
5.63	5.60	0.53	6.07	5.99	1.25
5.83	5.78	0.90	6.33	6.23	1.61
6.13	6.08	0.87	6.53	6.54	-0.06
6.53	6.26	4.16	6.97	6.85	1.71
6.77	6.69	1.09	7.37	7.16	2.77
7.10	7.01	1.32	7.73	7.61	1.58
7.57	7.45	1.50	8.13	8.13	-0.01
8.07	7.78	3.58	8.60	8.60	-0.01
8.53	8.31	2.66	8.97	8.80	1.82
8.87	8.64	2.53	4.20	4.21	-0.21
4.09	4.00	2.07	4.34	4.30	0.97
4.34	4.28	1.56	4.50	4.53	-0.73
4.39	4.37	0.41	4.76	4.67	1.74
4.53	4.51	0.46	5.01	5.06	-0.87
4.70	4.65	1.08	5.16	5.20	-0.92
4.77	4.74	0.56	5.44	5.45	-0.16
4.89	4.84	0.93	5.81	5.70	1.93
4.91	4.94	-0.46	6.07	5.91	2.74
5.14	5.13	0.22	6.44	6.16	4.35
5.34	5.33	0.27	6.76	6.58	2.60
5.71	5.58	2.38	7.00	6.63	5.23
5.97	5.83	2.34	7.56	7.23	4.38
6.31	6.09	3.58	3.73	3.68	1.15

Tableau IV.2 : Erreurs relatives entre les valeurs calculées par l'équation (IV.19) et les données expérimentales.

6.66	6.45	3.05	3.88	3.80	1.99
7.03	6.88	2.11	3.90	3.88	0.63
3.65	3.62	0.73	3.93	3.95	-0.73
3.68	3.66	0.37	4.08	4.07	0.07
3.85	3.86	-0.13	4.10	4.11	-0.29
4.00	3.97	0.68	4.23	4.19	0.79
4.03	4.01	0.31	4.50	4.47	0.57
4.18	4.09	1.99	4.70	4.64	1.30
4.28	4.25	0.54	4.85	4.76	1.79
4.40	4.37	0.60	5.13	4.89	4.61
4.60	4.50	2.26	5.40	5.19	3.96
4.78	4.62	3.25	5.75	5.32	7.56
4.95	4.74	4.15	5.93	5.62	5.14
5.10	5.00	2.01	6.40	5.98	6.63
5.35	5.25	1.79	6.68	6.20	7.10
5.60	5.60	-0.06	6.30	5.95	5.61
5.90	5.74	2.78	6.43	6.17	3.95
6.33	5.96	5.78	6.80	6.54	3.88
5.00	5.10	-2.03	5.76	5.91	-2.59
5.28	5.38	-1.81	5.92	6.05	-2.23
5.50	5.58	-1.53	6.08	6.27	-3.09
5.70	5.72	-0.44	6.22	6.41	-3.11
6.04	6.08	-0.68	6.42	6.49	-1.03
6.24	6.23	0.23	6.70	6.86	-2.33
6.52	6.59	-1.10	7.08	7.23	-2.15
6.88	6.89	-0.13	7.44	7.69	-3.38
7.04	7.19	-2.14	7.76	8.00	-3.13
7.52	7.50	0.31	8.10	8.32	-2.70
7.88	7.96	-1.06	8.62	8.88	-3.02
8.28	8.36	-0.96	9.10	9.45	-3.89
8.68	8.76	-0.93	9.78	10.04	-2.64
9.20	9.33	-1.46	10.42	10.81	-3.71
9.80	9.83	-0.35	10.74	11.07	-3.05
10.12	10.43	-3.05	4.40	4.46	-1.33
10.82	11.30	-4.40	4.57	4.62	-1.20
4.47	4.48	-0.30	4.83	4.84	-0.18
4.53	4.59	-1.23	4.97	5.07	-1.99
4.73	4.75	-0.44	5.10	5.24	-2.66
4.90	4.92	-0.43	5.17	5.29	-2.43

Tableau IV.2 : Erreurs relatives entre les valeurs calculées par l'équation (IV.19) et les données expérimentales.

5.00	5.03	-0.67	5.60	5.64	-0.69
5.10	5.09	0.19	5.80	5.81	-0.25
5.30	5.32	-0.34	6.10	6.11	-0.19
5.50	5.49	0.16	6.43	6.41	0.31
5.60	5.67	-1.18	6.87	6.91	-0.57
5.83	5.84	-0.16	7.20	7.16	0.61
6.10	6.08	0.31	7.63	7.47	2.10
6.47	6.57	-1.55	8.03	7.86	2.16
6.67	6.81	-2.22	8.50	8.32	2.13
7.13	7.32	-2.59	4.07	4.12	-1.26
7.53	7.45	1.16	4.20	4.26	-1.41
7.90	7.83	0.85	4.34	4.40	-1.24
8.33	8.29	0.49	4.56	4.58	-0.55
8.70	8.63	0.85	4.71	4.77	-1.19
9.17	9.31	-1.52	4.74	4.77	-0.59
3.67	3.65	0.49	4.90	5.01	-2.23
3.84	3.79	1.51	5.13	5.25	-2.40
3.91	3.92	-0.09	5.41	5.45	-0.63
4.06	4.01	1.22	5.64	5.70	-0.96
4.16	4.14	0.34	5.99	5.95	0.60
4.26	4.23	0.54	6.24	6.21	0.59
4.41	4.37	0.96	6.59	6.62	-0.56
4.57	4.60	-0.73	7.04	6.89	2.20
4.87	4.84	0.61	7.24	7.21	0.45
4.97	4.94	0.69	3.45	3.42	0.84
5.09	5.08	0.07	3.53	3.53	-0.24
5.10	5.08	0.35	3.63	3.61	0.45
5.17	5.23	-1.10	3.70	3.72	-0.62
5.53	5.57	-0.83	3.90	3.88	0.59
5.81	5.93	-1.95	4.00	3.99	0.16
6.06	6.18	-2.10	4.03	4.03	-0.19
6.31	6.44	-2.06	4.23	4.11	2.69
6.57	6.71	-2.08	4.38	4.31	1.47
7.03	6.97	0.76	4.48	4.43	0.98
7.37	7.19	2.45	4.75	4.68	1.55
7.69	7.41	3.60	4.90	4.84	1.19
7.91	7.96	-0.62	5.33	5.22	1.95
3.18	3.22	-1.29	5.60	5.48	2.16
3.35	3.29	1.81	5.95	5.79	2.77

Tableau IV.2 : Erreurs relatives entre les valeurs calculées par l'équation (IV.19) et les données expérimentales.

3.43	3.40	0.72	6.28	6.23	0.69
3.45	3.48	-0.73	9.80	9.71	0.92
3.60	3.59	0.32	10.30	10.25	0.52
3.70	3.70	-0.07	10.80	10.79	0.08
3.83	3.78	1.19	11.55	11.35	1.76
3.93	3.82	2.72	12.05	11.91	1.16
4.20	4.05	3.51	6.05	5.86	3.07
4.30	4.09	4.84	6.95	7.17	-3.20
4.33	4.17	3.55	7.15	7.17	-0.31
4.63	4.37	5.47	7.50	7.66	-2.13
4.78	4.58	4.18	7.80	7.96	-2.01
5.00	4.78	4.36	8.00	7.96	0.54
5.20	4.91	5.63	8.15	8.36	-2.56
5.40	5.20	3.63	8.65	8.66	-0.17
5.68	5.33	6.03	9.00	8.77	2.58
5.98	5.72	4.18	9.50	9.18	3.34
3.68	3.90	-5.85	4.63	4.86	-5.04
4.08	4.28	-4.92	4.74	4.96	-4.56
4.24	4.48	-5.62	4.91	5.11	-3.91
4.48	4.61	-2.93	5.09	5.26	-3.34
4.64	4.75	-2.28	5.26	5.36	-1.87
4.84	4.81	0.55	5.37	5.61	-4.40
5.16	5.16	0.08	5.60	5.71	-1.96
5.40	5.37	0.64	6.26	6.12	2.13
5.56	5.51	0.96	6.54	6.39	2.37
5.92	6.16	-3.98	6.86	6.93	-1.00
6.24	6.45	-3.39	7.17	7.20	-0.39
6.40	6.75	-5.50	7.66	7.87	-2.80
6.64	6.98	-5.12	2.73	2.93	-7.39
6.96	7.37	-5.83	4.23	4.07	3.66
5.86	5.97	-1.89	4.33	4.19	3.09
7.68	7.37	4.09	4.40	4.19	4.74
8.12	7.76	4.46	4.15	3.95	4.80
8.36	8.16	2.43	5.10	5.33	-4.52
8.96	8.56	4.44	5.20	5.33	-2.51
9.40	8.97	4.53	5.43	5.62	-3.53
9.96	9.39	5.70	5.60	5.62	-0.44
3.08	3.04	1.30	5.70	5.86	-2.88
3.25	3.29	-1.36	5.80	6.05	-4.24

Tableau IV.2 : Erreurs relatives entre les valeurs calculées par l'équation (IV.19) et les données expérimentales.

3.35	3.37	-0.58	6.10	6.05	0.89
3.50	3.48	0.48	6.37	6.35	0.22
3.73	3.68	1.33	6.70	6.60	1.47
3.83	3.79	0.84	7.20	6.85	4.82
3.95	3.87	1.99	7.57	7.37	2.65

IV.4 Conclusion

Cette étude met en évidence l'influence significative de la rugosité du lit sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans les canaux rectangulaires composés. Les résultats expérimentaux montrent qu'une augmentation de la rugosité entraîne une diminution du rapport des profondeurs conjuguées.

Un modèle adimensionnel semi-théorique a été élaboré à partir des équations d'Euler appliquées entre deux sections d'un ressaut bien développé. Ce modèle intègre des paramètres hydrauliques essentiels — le nombre de Froude incident, le coefficient de résistance Cr , le rapport d'élargissement et la rugosité absolue — permettant une prédiction précise du rapport de profondeur conjuguée. La validation expérimentale confirme la fiabilité de l'approche proposée et met en évidence l'effet perceptible des variations de rugosité sur le comportement du ressaut hydraulique. Les résultats obtenus en laboratoire offrent ainsi une base pratique pour l'optimisation et le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, en particulier dans les dispositifs de dissipation d'énergie.

Cette étude met en évidence l'influence significative de la rugosité du lit (ε/B de 0 à 0,048) sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans les canaux rectangulaires composés. Les résultats expérimentaux montrent qu'une augmentation de la rugosité entraîne une diminution du rapport des profondeurs conjuguées Y . Un modèle adimensionnel semi-théorique $f(Y, Fr, Cr, \beta, \tau) = 0$ a été élaboré à partir de l'équation de quantité de mouvement, intégrant $Cr = 0.4166 (\varepsilon/B)$. La validation confirme une erreur relative généralement inférieure à 5 % entre Y_{exp} et $Y_{théo}$. Les résultats offrent une base pratique pour l'optimisation des bassins de dissipation d'énergie.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette thèse vise à analyser, sur les plans théorique, le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée, doté des lits majeur et mineur rugueux et d'une pente nulle.

La thèse se scinde en deux axes complémentaires. Le premier axe, d'ordre bibliographique, regroupant les généralités et les notions fondamentales relatives au ressaut hydraulique, suivies d'une présentation des principaux travaux réalisés dans le domaine, notamment ceux portant sur le ressaut en canal rectangulaire de section composée. Le second axe expose notre contribution, fondé sur une étude théorique du ressaut hydraulique se développant dans le canal considéré. Cette double approche a permis d'identifier les mécanismes gouvernant la transition du régime torrentiel au régime fluvial et d'enrichir les connaissances existantes sur la dynamique des écoulements brusquement variés.

* Le premier axe de la synthèse bibliographique est articulé en deux chapitres de référence, considérés comme indispensables à l'établissement du cadre théorique de cette recherche :

- Le premier chapitre est consacré à l'exposé des généralités et des concepts fondamentaux relatifs au ressaut hydraulique. Ce chapitre présente les différents types de canaux et leurs caractéristiques. Il explique comment classer les écoulements à surface libre et introduit les notions de base nécessaires pour les comprendre. Cette base théorique prépare l'étude de phénomènes hydrauliques particuliers, comme le ressaut hydraulique. On y définit les termes essentiels et on rappelle brièvement l'évolution des recherches dans ce domaine, afin de mieux comprendre les résultats attendus par les spécialistes.

- Le second chapitre est consacré à l'examen détaillé des travaux menés par (Riguet et Debabeche 2023) sur le ressaut hydraulique contrôlé et forcé dans un canal rectangulaire de section composée. Il présente la problématique de la formation du ressaut sous différentes conditions, décrit la méthodologie expérimentale adoptée et expose les principaux résultats relatifs aux hauteurs conjuguées, aux longueurs caractéristiques et au rendement énergétique.

* Le deuxième axe de notre travail a été consacrée à notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire de section composée, caractérisé par un lit majeur et mineur rugueux et une pente nulle. Cette partie est structurée en deux chapitres distincts :

- Le troisième chapitre présente le banc expérimental illustré par des photographies, ainsi que la procédure d'utilisation des instruments destinés à mesurer les caractéristiques du ressaut hydraulique. Le débit volumique est estimé à l'aide d'un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle et de contraction latérale, conformément à la méthode de (Hachémite Rached, 2006). L'écoulement brusquement varié, assurant le passage du régime torrentiel au régime tranquille,

Conclusion générale

est généré par des parois (seuils) de contrôle disposé en travers du canal. Enfin, le chapitre décrit de manière synthétique la méthode de préparation et de conception des différents tapis rugueux imposés au lits majeur et mineur.

- Dans le quatrième chapitre, une démarche théorique et expérimentale a été conduite pour étudier la relation semi-théorique décrivant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée, avec lit majeur et mineur rugueux et pente nulle. Sur le plan théorique, un développement rigoureux a conduit à l'expression implicite $f(Y, Fr, Cr, \beta, \tau) = 0$, obtenue par l'application de l'équation de quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut. Cette approche confirme la cohérence du modèle proposé. Sur le plan expérimental. Par ailleurs, la corrélation établie entre les données expérimentales et celles issues de l'approche théorique adimensionnelle $Y_{théo}$, dont elle varie avec Fr et Cr , révèle une erreur relative généralement inférieure à 5 %. Ce constat atteste de la validité et de la fiabilité de la relation semi-théorique (IV.14). Au total, ces résultats confirment la puissance scientifique du modèle présenté.

Finalement, on peut conclure que ce type du ressaut hydraulique étudié présente un effet réducteur aux caractéristiques hydrauliques pour les lits rugueux.

Avec recommandation aux étudiants chercheurs futurs de continuer les travaux soient théoriques ou expérimentaux pour ce type de canal et d'autres canaux prismatiques ou non prismatiques, dans le but d'aboutir à des approches empiriques utilisables au dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

1. Abdul Khader, M. H., & Elango, K. (1974). **Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump**. *Journal of Hydraulic Research*, 12(4), 469489. [<https://doi.org/10.1080/00221687409499725>]
2. Achour, B., Sedira, N., & Debabeche, M. (2002). **Ressaut contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire**. *LARHYSS Journal*, 1(1), 7385.
3. Andersen, V. M. (1978). **Undular Hydraulic Jump**. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(8), 11851188. [<https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005048>]
4. Bakhmeteff, B. A., & Matzke, A. E. (1936). **The Hydraulic Jump in Terms of Dynamic Similarity**. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 101(1), 630647. [<https://doi.org/10.1061/TACEAT.0004708>]
5. Basco, D. R. (1971). **Energy Dissipation in Forced Hydraulic Jumps**. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 97(Hy 11), 18251844.
6. Belanger, J. B. (1828). **Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes**. Chez Carilian-Goeury.
7. Besser, D. (2026). **Etude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux et pente positive** [Thèse de doctorat]. Université Hamma Lakhdar, El Oued.
8. Bidone, G. (1819). **Observations on the Height of the Hydraulic Jump**. *Royal Academy of Science of Turin*, 2180.
9. Bradley, J. N., & Peterka, A. J. (1957). **Hydraulic Design of Stilling Basins: Hydraulic Jumps on a Horizontal Apron (Basin I)**. *Journal of the Hydraulics Division*, 83(5), 14011424. [<https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000126>]
10. Brahimi, A. (2024). **Etude Théorique Et Expérimentale De leffet De La Rugosité Sur Le Ressaut Hydraulique Evoluant Dans Un Canal Rectangulaire** [Thèse de doctorat]. Université Kasdi Merbah Ouargla.
11. Bresse, J. A. C. (1860). **Cours de mécanique appliquée**. Mallet-Bachelier.
12. Chanson, H. (2015). **Energy dissipation in hydraulic structures**. CRC Press/Taylor & Francis Group.
13. Citrini, D. (1939). **Il salto di Bidone**. *LEnergia Elettrica*, 16(6), 441465.
14. Chow, V. T. (1959). **Open Channel Hydraulics**. McGraw Hill Book Co. Inc.
15. Debabeche, M. (2003). **Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques** [Thèse de doctorat état]. Université de Biskra.

16. Debabeche, M., & Achour, B. (2007). **Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel**. *Journal of Hydraulic Research*, 45, 135139.
17. De Padova, D., & Mossa, M. (2021). **Hydraulic Jump: A Brief History and Research Challenges**. *Water*, 13(13). [<https://doi.org/10.3390/w13131733>]
18. Djamaa, W. (2022). **Contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux** [Thèse de doctorat]. Université Kasdi Merbah Ouargla.
19. Forster, J. W., & Skrinde, R. A. (1950). **Closure to Forster and Skrinde on Hydraulic Jump**. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 115(1), 10071022. [<https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006340>]
20. Ghomri, A. (2012). **Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à parois rugueuses** [Thèse de doctorat]. Université de Biskra. [<http://thesis.univ-biskra.dz/2230/7/Chapitre%2003.pdf>]
21. Graf, W. H., & Altinakar, M. S. (2000). **Hydraulique fluviale : Écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple**. EPFL Press.
22. Hachemi Rachedi, L. (2006). **Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale** [Mémoire de magister]. Université de Biskra. [<http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/1102>]
23. Hager, W. H., & Li, D. (1992). **Sill-controlled energy dissipator**. *Journal of Hydraulic Research*, 30(2), 165181. [<https://doi.org/10.1080/00221689209498932>]
24. Hager, W. H., Bremen, R., & Kawagoshi, N. (1990). **Classical hydraulic jump: Length of roller**. *Journal of Hydraulic Research*, 28(5), 591608. [<https://doi.org/10.1080/00221689009499048>]
25. Hager, W. H., & Sinniger, R. (1985). **Flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise**. *Journal of Hydraulic Research*, 23(2), 101113. [<https://doi.org/10.1080/00221688509499359>]
26. Hager, W. H., & Castro-Orgaz, O. (2020). **Alfred Aimé Flamant: Hydraulician and Textbook Author**. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(7), 02520002. [[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001758](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001758)]
27. Harleman, D. R. F. (1959). **Discussion of Turbulence characteristics of the hydraulic jump**. *Trans. ASCE*, 124.
28. Kateb, S. (2006). **Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire à parois rugueuses** [Thèse]. [<http://archives.univ-biskra.dz:80/handle/123456789/24434>]
29. Khechiba, H. (2026). **Etude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur et mineur rugueux et pente nulle** [Thèse de doctorat]. Université Hamma Lakhdar, El Oued.

30. Lacheheb, S. (2023). **Contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux** [Thèse de doctorat]. Université Kasdi Merbah Ouargla.
31. Moore, W. L., & Morgan, C. W. (1959). **Hydraulic Jump at An Abrupt Drop**. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 124(1), 507516. [<https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007723>]
32. Narayanan, R., & Schizas, L. S. (1980). **Force on Sill of Forced Jump**. *Journal of the Hydraulics Division*, 106(7), 11591172. [<https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005460>]
33. Nouacer, B. (2023). **Contribution à l'étude théorique et expérimentale de ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire incliné à fond rugueux** [Thèse de doctorat]. Université Kasdi Merbah Ouargla.
34. Pillai, N. S., & Unny, T. E. (1964). **Forced Hydraulic Jump with Roughened Beds**. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 90(Hy 6).
35. Rajaratnam, N. (1965). **Hydraulic Jump in horizontal conduit**. *Water Power*, 17, 8083.
36. Rajaratnam, N., & Murahari, V. (1971). **A Contribution To Forced Hydraulic Jumps**. *Journal of Hydraulic Research*. [<https://doi.org/10.1080/00221687109500347>]
37. Rand, W. (1965). **Flow Over a Vertical Sill in an Open Channel**. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(4), 97121. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001297>