

République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté Des Sciences Appliquées

Département De Génie Civil Et Hydraulique

Année 2023/2024



N° d'enregistrement :

/004/2024/

THESE

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat

Sciences en Hydraulique

**Etude Théorique Et Expérimentale De l'effet De La Rugosité Sur Le Ressaut
Hydraulique Evoluant Dans Un Canal Rectangulaire**

Présenté et soutenue publiquement

Par :

Abdelouahed BRAHIMI

Le 02/05/2024

Devant le jury composé de :

Kais BAOUIA	Professeur	Université K.M Ouargla	Président de jury
Samir KATEB	Professeur	Université K.M Ouargla	Promoteur
Ali GHOMRI	Professeur	Université H.L El Oued	Examineur
Salim KHECHANA	Professeur	Université H.L El Oued	Examineur
Oussama DERDOUS	MCA	Université K.M Ouargla	Examineur
Tayeb BOULMAIZ	MCA	Université de Ghardaïa	Examineur

Remerciements

*Je tiens à remercier Monsieur **KATEB Samir** pour sa disponibilité et sa patience dans le suivi et la promotion de ce modeste travail.*

*Je présent, également, mes vifs remerciements à l'ensemble des **enseignants** du département hydraulique et génie civile, pour leur service et conseil dans l'objectif de réussir notre travail.*

*Je remercie les membres de jury et aussi, toutes les personnes qui ont participé près ou loin à la réussite de notre projet de plus particulièrement Monsieur **HADJOU DJ Ali** lors volontés et lors aides.*

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*À mes très chers grands parents, et
à mon père et ma mère qui m'ont
toujours encouragé et assisté depuis
ma tendre enfance -que Dieu les
bénisse et les protège -, ainsi qu'à
mes frères et sœurs, et mon marié et
spécialement mon fils **Mouhamed
Ghait** tous mes familles et mes
amis.*

Sommaire

Liste des figures	
Liste des photos	
Liste des tableaux	
Principales notations	
Résumé	
Introduction générale.....	2
Première partie : Recherche Bibliographique	
Introduction à la première partie	5
Chapitre I : Généralités sur le ressaut hydraulique.....	6
I.1. Introduction	6
I.2. Ecoulement à surface libre	6
I.2.1. Définition	6
I.2.2. Types.....	6
I.3. Définition le Nombre de Froude	7
I.4. Définition le ressaut hydraulique	8
I.5. Description du phénomène.....	8
I.6. Apparition des ressauts.....	8
I.7. Caractéristiques du ressaut hydraulique	9
I.7.1. Hauteurs conjuguées	10
I.7.2. Longueur du ressaut.....	10
I.7.3. Longueur du rouleau	11
I.7.4. Dissipation d'énergie.....	12
I.8. Classification des ressauts	12
I.8.1. Ressaut ondulé	12
I.8.2. Le Pré-ressaut ou le ressaut faible.....	12
I.8.3. Le ressaut de transition ou oscillatoire.....	13
I.8.4. Le ressaut stable ou établie	13
I.8.5. Le ressaut agité (Fort)	14
I.9. Historique du ressaut hydraulique.....	14
I.10. Conclusion.....	18
Chapitre II : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire	19
II.1. Introduction	19

II.2.	Ressaut hydraulique classique.....	19
II.2.1.	Equation de Belanger (1841)	19
II.2.2.	Les essais expérimentaux de Hager et al	21
II.3.	Ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince.....	22
II.3.1.	Approche de Forster et Skrinde (1950).....	22
II.3.2.	Approche d'Achour, Sedira et Debabeche (2002).....	23
II.4.	Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à fond rugueux.....	25
II.4.1.	Approche de Rajaratnam (1968).....	25
II.5.	Conclusion.....	26
	Chapitre III : Ressaut hydraulique en canal triangulaire.....	27
III.1.	Introduction	27
III.2.	Ressaut hydraulique classique.....	27
III.2.1.	Approche de Hager et Wanoschek (1987)	27
III.3.	Ressaut hydraulique contrôlé par seuil.....	30
III.3.1.	Approche de Debabeche et Achour (2001).....	30
III.4.	Ressaut hydraulique contrôlé par seuil aux parois rugueuses	33
III.4.1.	Approche de de Kateb (2006)	33
III.4.1.1.	Développement de l'approche théorique.....	33
III.4.1.2.	L'essai expérimental	34
III.5.	Conclusion.....	35
	Chapitre IV : Ressaut hydraulique en canal profilé en U à fond rugueux	36
IV.1.	Introduction	36
IV.2.	Analyse théorique.....	36
IV.3.	Description des essais.....	37
IV.4.	Résultats expérimentaux	38
IV.4.1.	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude ...	38
IV.4.2.	Longueur relative du ressaut en fonction de nombre du Froude.....	39
IV.4.3.	Longueur relative du rouleau du surface aval en fonction du nombre de Froude .	39
IV.4.4.	Rendement du ressaut hydraulique	40
IV.5.	Conclusion.....	41
	Conclusion à la première partie.....	42
	<i>Deuxième partie : Etude expérimentale</i>	
	Introduction à la deuxième partie	43
	Chapitre I : Méthodes et matériels	44
I.1.	Introduction	44

I.2.	Position du problème.....	44
I.3.	Dispositif expérimental	44
I.4.	Les mesures à effectuer	50
I.4.1.	Mesure des profondeurs	50
I.4.2.	Mesure des longueurs	51
I.4.3.	Mesure du débit.....	51
I.5.	Mode de préparation de la rugosité	53
I.6.	Procédure expérimentale	54
I.7.	Mode expérimental.....	55
I.8.	Conclusion.....	56
	Chapitre II : Résultats et discussions	57
II.1.	Introduction	57
II.2.	Ressaut hydraulique à fond rugueux	57
II.2.1.	Rapport des hauteurs conjuguées (Y)	57
II.2.2.	Longueur relative du ressaut (L_j/h_1).....	61
II.2.3.	Longueur relative du rouleau (L_r/h_1).....	64
II.2.4.	Rendement du ressaut hydraulique	68
II.3.	Ressaut hydraulique aux parois rugueuses	69
II.3.1.	Rapport des hauteurs conjuguées (Y)	69
II.3.2.	Longueur relative du ressaut (L_j/h_1).....	72
II.3.3.	Longueur relative du rouleau (L_r/h_1).....	76
II.3.4.	Rendement du ressaut hydraulique	79
II.4.	Comparaison analytique des résultats	80
II.4.1.	Rapport des hauteurs conjuguées (Y)	80
II.4.2.	Longueur relative du ressaut (L_j/h_1).....	81
II.4.3.	Longueur relative du rouleau (L_r/h_1).....	82
II.4.4.	Rendement du ressaut hydraulique	83
II.5.	Exemple d'application.....	83
II.5.1.	Ressaut à fond rugueux	84
II.5.2.	Ressaut aux parois rugueuses.....	84
II.6.	Conclusion.....	85
	Conclusion à la deuxième partie	86
	<i>Troisième partie : Approche théorique</i>	
	Introduction à la troisième partie	87
	Chapitre I : Développement théorique.....	88

I.1.	Introduction	88
I.2.	Analyse théorique.....	88
I.3.	Conclusion.....	93
Chapitre II : Analyse expérimentale de l'équation théorique.....		94
II.1.	Introduction	94
II.2.	Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le coefficient de résistance et le nombre de Froude.....	94
II.3.	Relation entre le coefficient de résistance et la rugosité relative	95
II.4.	Conclusion.....	98
Conclusion à la troisième partie		99
Conclusion générale		100
Références bibliographiques		103

Liste des figures

Première partie : Recherche Bibliographique

Chapitre I : Généralités sur le ressaut hydraulique

Figure 1. 1 : Indentification du régime d'écoulement en fonction du nombre de Froude.	7
Figure 1. 2 : Schéma descriptif d'emplacement des hauteurs conjuguées.	10
Figure 1. 3 : Schéma descriptif d'emplacement de la longueur du ressaut.	11
Figure 1. 4 : Schéma descriptif d'emplacement de la longueur du rouleau.	11
Figure 1. 5 : Ressaut ondulé.	12
Figure 1. 6 : Faible ressaut ou pré-ressaut.	13
Figure 1. 7 : Ressaut oscillatoire ou transition.	13
Figure 1. 8 : Le ressaut stable ou établie.	14
Figure 1. 9 : Le ressaut agité (Fort).	14

Chapitre II : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

Figure 2. 1 : Dessiner explicative du ressaut classique dans un canal rectangulaire.	19
Figure 2. 2 : Approche de Forster et Skrinde (1950).	22
Figure 2. 3 : Relation entre la hauteur relative et le nombre du Froude d'écoulement incident (Approche Forster et Skinde 1950).	23
Figure 2. 4 : Dessiner explicative d'approche d'Achour, Sedira et Debabeche (2002).	24
Figure 2. 5 : Approche de Rajaratnam (1968).	25
Figure 2. 6 : Graphique expérimentale élaboré par Rajaratnam.	26

Chapitre III : Ressaut Hydraulique En Canal Triangulaire

Figure 3.1 : Dessiner explicative du ressaut classique dans un canal triangulaire.	27
Figure 3.2 : Nombre de Froude amont du ressaut en fonction de la longueur du rouleau relative selon Hager et Wanoschek (1987).	29
Figure 3. 3 : Nombre de Froude amont du ressaut en fonction de la longueur du ressaut relative selon Hager et Wanoschek (1987).	29
Figure 3. 4 : Schéma de définition du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire.	30
Figure 3. 5 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le nombre du Froude. Points expérimentaux pour $m = 1$: (○) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince, (●) ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse, (Δ) : ressaut forcé par seuil à paroi mince et (...) ressaut classique.	31
Figure 3. 6 : Relation entre la hauteur relative du seuil et le nombre du Froude.	31
Figure 3. 7 : Relation entre le nombre du Froude et la longueur du bassin.	32
Figure 3. 8 : Dessiner explicative d'approche de Kateb (2006).	33
Figure 3. 9 : Relation entre de paramètre des hauteurs conjuguées et le nombre du Froude. Pour quatre valeurs de la rugosité.	34
Figure 3. 10 : Relation entre le nombre du Froude et la longueur du ressaut.	35

Chapitre IV : Ressaut hydraulique en canal profilé en U

Figure 4. 1 : Dessiner explicative d'approche de Ghamri (2012).....	36
Figure 4. 2 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le nombre du Froude. Pour les quatre valeurs de ε : (\square) 4,30mm ; (Δ) 5,63mm ; (o) 7,14mm et (x) 9,11mm.....	38
Figure 4. 3 : Relation entre le nombre du Froude et la longueur du ressaut. Pour quatre valeurs de la rugosité (ε) : (Δ) 4,30mm ; (\diamond) 5,63mm ; (o) 7,14mm et (x) 9,11mm.....	39
Figure 4. 4 : Relation entre le nombre du Froude et la longueur relative de rouleau. Pour les différentes rugosités testées. ε (mm) : (o) 4,30mm (\square) 5,63 (Δ) 7,14 (o) 9,11mm.....	40
Figure 4. 5 : Relation entre le rendement du ressaut et le nombre du Froude. Pour les rugosités relatives suivantes (ε/D) : (\diamond) 0,0175 ; (\square) 0,0229 et (Δ) 0,0291.....	41

Deuxième partie : Etude expérimentale

Chapitre I : Méthodes et matériels

Figure 1. 1 : Modèle du canal utilisé.....	45
Figure 1. 2 : Dessiner explicative de la limnimétrie.....	50
Figure 1. 3 : Variation de débit mesuré par le déversoir (Qd) et par le compteur d'eau (Qc).....	53

Chapitre II Traitement des résultats expérimentaux

Figure 2. 1 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le nombre du Froude, dans le cas à fond rugueux. (—) Courbes d'ajustements.....	58
Figure 2. 2 : Relation entre le coefficient (a) et la rugosité relative (ε/b).....	59
Figure 2. 3 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées (Y) et la fonction de $\Phi(Fr_1, (\varepsilon/b))$. (—) Première bissectrice d'équation $Y = (1,2288 - 4,2188 (\varepsilon/b)) Fr_1$	60
Figure 2. 4 : Relation entre la longueur du ressaut relative et le nombre du Froude, dans le cas à fond rugueux. (—) Courbes d'ajustements.....	61
Figure 2. 5 : Relation entre le coefficient (n) et la rugosité relative (ε/b).....	63
Figure 2. 6 : Relation entre la longueur du ressaut relative et la fonction de $\Psi(Fr_1, (\varepsilon/b))$. (—) Première bissectrice d'équation $L_j/h_1 = (9,2873 - 33,5 (\varepsilon/b)) Fr_1$	63
Figure 2. 7 : Relation entre la longueur du rouleau relative et le nombre du Froude, dans le cas à fond rugueux. (—) Courbes d'ajustements.....	65
Figure 2. 8 : Relation entre le coefficient (c) et la rugosité relative (ε/b).....	66
Figure 2. 9 : Relation entre la longueur du rouleau relative et la fonction de $\zeta(Fr_1, (\varepsilon/b))$. (—) Première bissectrice d'équation $L_r/h_1 = (7,2918 - 21,75 (\varepsilon/b)) Fr_1$	67
Figure 2. 10 : Relation entre le rendement et le nombre de Froude, dans le cas à fond rugueux.....	68
Figure 2. 11 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude, dans le cas aux parois rugueuses. (—) Courbes d'ajustements.....	69
Figure 2. 12 : Relation entre le coefficient (d) et la fonction de la rugosité relative (ε/b).....	70
Figure 2. 13 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et la fonction de $\mathfrak{D}(Fr_1, (\varepsilon/b))$. (—) Première bissectrice d'équation $Y = (0,976 - 4,125 (\varepsilon/b)) Fr_1$	71
Figure 2. 14 : Relation entre la longueur du ressaut relative et le nombre de Froude, dans le cas aux parois rugueuses. (—) Courbes d'ajustements.....	73
Figure 2. 15 : Relation entre le coefficient (e) et la rugosité relative (ε/b).....	74
Figure 2. 16 : Relation entre la longueur du ressaut relative et la fonction de $\Theta(Fr_1, (\varepsilon/b))$. (—) Première bissectrice d'équation $L_j/h_1 = (6,391 - 37,25 (\varepsilon/b)) Fr_1$	75
Figure 2. 17 : Relation entre la longueur du rouleau relative et le nombre de Froude, dans le cas aux parois rugueuses. (—) Courbes d'ajustements.....	76
Figure 2. 18 : Relation entre le coefficient (k) et la rugosité relative (ε/b).....	77
Figure 2. 19 : Relation entre la longueur du rouleau relative et la fonction de $\beta(Fr_1, (\varepsilon/b))$. (—) Première bissectrice d'équation $L_r/h_1 = (5,196 - 31,625 (\varepsilon/b)) Fr_1$	78

Figure 2. 20 : Relation entre le rendement du ressaut et le nombre de Froude, dans le cas aux parois rugueuses.....	79
Figure 2. 21 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude, dans les cas testés.....	80
Figure 2. 22 : Relation entre la longueur du ressaut relative et le nombre de Froude, dans les cas testés.....	81
Figure 2. 23 : Relation entre la longueur du rouleau relative et le nombre de Froude, dans les cas testés.....	82
Figure 2. 24 : Relation entre le rendement du ressaut et le nombre de Froude, dans les cas testés.....	83

Troisième partie : Approche théorique

Chapitre I : Développement théorique

Figure 1. 1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par un seuil dans un canal rectangulaire aux parois rugueuses.....	89
---	----

Chapitre II : Analyse expérimentale de l'équation théorique

Figure 2. 1 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le terme $Fr_1^2 (1-C_R)$	94
Figure 2. 2 : Relation entre le terme $(1-C_R)$ de l'équation f_1 et même terme de l'équation f_2	95
Figure 2. 3 : Relation entre la fonction $f(Y)$ et le nombre de Froude au carré.....	96
Figure 2. 4 : Relation entre le coefficient (C_R) et la rugosité relative (ε/b)	97
Figure 2. 5 : Relation entre la fonction $f(Y)$ et la fonction de $\xi (\varepsilon, Fr_1)$	98

Liste des photos

Première partie : Recherche Bibliographique

Chapitre I : Généralités sur le ressaut hydraulique

Photo 1.1 : Ressaut hydraulique dans la nature.....	09
Photo 1.2 : Ressaut hydraulique obtenu à l'Université de Ouargla (Département de Hydraulique et Génie civile) par BRAHIMI Abdelouahed (2022)	09

Deuxième partie : Etude expérimentale

Chapitre I : Méthodes et matériels

Photo 1.1 : Canal d'essai.....	45
Photo 1.2 : Bassin d'alimentation et d'accumulation.....	46
Photo 1.3 : Pompe d'essai du dispositif.....	46
Photo 1.4 : Vanne de réglage.....	47
Photo 1.5 : Compteur d'eau.....	47
Photo 1.6 : Convergeant.....	48
Photo 1.7 : Vanne murale.....	48
Photo 1.8 : Seuils minces testés.....	49
Photo 1.9 : Vanne à déplacement verticale.....	49
Photo1.10 : Limnimétrie.....	50
Photo1.11 : Déversoir rectangulaire.....	51
Photo1.12 : Boules utilisant.....	53
Photo1.13 : Constriction des tapis rugueuse.....	54
Photo1.14 : Canal aux parois rugueuses.....	54
Photo1.15 : Ressaut hydraulique évoluant dans un canal aux parois rugueuses.....	55

Liste des tableaux

Deuxième partie : Etude expérimentale

Chapitre I : Méthodes et matériels

Tableau 1. 1 : Regroupe les mesures effectuées sur le déversoir et le compteur d'eau.	52
--	----

Chapitre II Traitement des résultats expérimentaux

Tableau 2. 1 : Valeur de la pente (a) pour les différents droites d'ajustement.	58
Tableau 2. 2 : Valeurs expérimentales de dessiner de la fonction $Y = \Phi(Fr_1, (\epsilon/b))$	60
Tableau 2. 3 : Valeur de la pente (n) pour les différents droites d'ajustement.	62
Tableau 2. 4 : Valeurs expérimentales de dessiner de la fonction $L_j/h_1 = \Psi(Fr_1, (\epsilon/b))$	64
Tableau 2. 5 : Valeur de la pente (c) pour les différents droites d'ajustement.	66
Tableau 2. 6 : Valeurs expérimentales de dessiner de la fonction $L_r/h_1 = \zeta(Fr_1, (\epsilon/b))$	67
Tableau 2. 7 : Valeur de la pente (d) pour les différents droites d'ajustement.	70
Tableau 2. 8 : Valeurs expérimentales de dessiner de la fonction $Y = \vartheta(Fr_1, (\epsilon/b))$	72
Tableau 2. 9 : Valeur de la pente (e) pour les différents droites d'ajustement.	74
Tableau 2. 10 : Valeurs expérimentales de dessiner de la fonction $L_j/h_1 = \Theta(Fr_1, (\epsilon/b))$	75
Tableau 2. 11 : Valeur de la pente (k) pour les différents droites d'ajustement.	77
Tableau 2. 12 : Valeurs expérimentales de dessiner de la fonction $L_r/h_1 = \beta(Fr_1, (\epsilon/b))$	78
Tableau 2. 13 : Valeurs de coefficient (n).	80
Tableau 2. 14 : Valeurs de coefficient (m).	81
Tableau 2. 15 : Valeurs de coefficient (s).	82

Troisième partie : Approche théorique

Chapitre II : Analyse expérimentale de l'équation théorique

Tableau 2. 1 : Valeur ajusté du coefficient (C_R).	97
---	----

Principales notations

A	Aire d'une section	[m ²]
b	Largeur du canal	[m]
d, D	Diamètres	[m]
ε , k_e	Rugosité absolue des parois du canal	[mm]
ε/b	Rugosité relative	[-]
F	Force de pression	[N]
P	Pression hydrostatique	[Pascal]
F _R	Force de résistance	[N]
Fr ₁ , IF ₁	Nombre de Froude à l'amont du ressaut	[-]
g	Accélération de la pesanteur	[m.s ⁻²]
h	Profondeur d'écoulement	[m]
\bar{h} , h _G	Profondeur du centre de gravité de la section mouillée	[m]
h ₁	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h ₂	Hauteur finale du ressaut	[m]
H	Charge totale	[m]
ΔH	Perte de charge due au ressaut	[-]
L _r	Longueur du rouleau du ressaut hydraulique	[m]
L _r /h ₁	Longueur du rouleau relative	[-]
L _j	Longueur du ressaut hydraulique	[m]
L _j /h ₁	Longueur du ressaut relative	[-]
Q	Débit d'écoulement	[m ³ .s ⁻¹]
V	Vitesse d'écoulement	[m.s ⁻¹]
s	Hauteur du seuil	[m]
S	Hauteur relative du seuil	[-]
x	Position du seuil	[m]
X	Position relative du seuil	[-]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	[-]
$\bar{\omega}$	Poids spécifique du liquide	[N.m ⁻³]
ρ	Masse volumique du liquide	[kg.m ⁻³]
η	Rendement du ressaut	[-]

ملخص

يهتم هذا العمل البحثي على تحليل النظري والتجريبي للقفزة الهيدروليكية المتحكم فيها بسد ذو سمك رقيق في قناة مستطيلة ذات جدران خشنة، حيث تم اختبار مختلف العوامل الخشونة وهي: 6، 8، 10 و 12 ملم. وتم حصول على علاقة نظرية، ليس لها أبعاد، تربط بين مختلفة العناصر القفز، وتوضيح تأثير خشونة جدران القناة على القفز. وباستخدام القياسات التجريبية تم ضبط وتعديل العلاقة المشتقة من التطور نظري لمعادلة كمية حركة. أظهرت النتائج أن وجود الخشونة يؤثر إيجاباً على القفز من خلال تقصير وتبديد مزيد من طاقة، وقد تم اقتراح علاقة لهذا الغرض لتسهيل تحديد أبعاد حوض تخميد طاقة.

الكلمات المفتاحية: قفزة هيدروليكية، قناة مستطيلة، جدران خشنة، سد رقيق سماكة، حوض تخميد طاقة.

Résumé

Ce travail s'intéresse à l'analyse théorique et expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal rectangulaire aux parois rugueuses pour différentes rugosités testées à savoir $\varepsilon = 6, 8, 10$ et 12mm . Une relation théorique, en terme adimensionnel, liant les différents paramètres du ressaut, faisant apparaître l'effet de la rugosité des parois du canal, a été obtenue. Il est primordial d'ajuster à l'issue de cette expérimentation la relation qui est tirée par le développement théorique de l'équation de quantité de mouvement. Les résultats ont montré que la présence de la rugosité influence positivement sur le ressaut qui tendent à se raccourcir et à dissiper plus d'énergie, une relation a été proposé à cet effet pour faciliter le dimensionnement du bassin d'amortissement.

Mots clés : ressaut hydraulique, canal rectangulaire, parois rugueux, seuil mince, bassin de dissipation.

Abstract

This thesis conducts a theoretical and experimental analysis of the hydraulic jump controlled by a thin-walled threshold evolve in rectangular channel with rough walls for various tested roughnesses namely $\varepsilon = 6, 8, 10$ and 12mm . We obtained a theoretical relation, in dimensionless terms, linking the various parameters of the jump, showing the effect of the roughness of the walls of the channel. It is essential to adjust at the end of this experiment the relation, which is drawn by the theoretical development of the equation of the quantity of movement. The results showed that the presence of roughness positively influences the jumps, which tend to shorten and dissipate more energy, a relation was proposed for this purpose to facilitate the determination of the dimensions of the dissipation basin.

Keywords: hydraulic jump, rectangular channel, roughness of the walls, thin-walled threshold, dissipation basin.



Introduction générale

Introduction générale

Les écoulements dans les canaux et les cours d'eau ou bien à l'aval des évacuateurs de crues de barrage relèvent de ce domaine d'étude ainsi que des phénomènes tels que les fleurs de givres, les mascarets, les vagues côtières, les tsunamis les crues ou les ressauts.

Les chercheurs dans le domaine hydraulique observent au début du XVIIIème siècle un phénomène produit lors de changement de type d'un écoulement à surface libre caractériser par une vitesse plus forte vers un écoulement de faible vitesse. Cette phénomène attiré l'attention des hydrauliciens notamment au cours des cinquante dernières années, ils produisent plusieurs études de propriété théorique ou expérimentale.

Les applications pratiques peuvent concerner le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques ou encore la prévention des risques naturels. Ces ouvrages sont formes des bassins de réduction de la vitesse d'écoulement incident, leurs dimensionnements sont attachés à la figure exacte du canal transporté le ressaut.

Les études précédentes indiquent que ces écoulements reposent souvent sur l'approximation de l'eau peu profonde qui consiste dans la distinction de deux échelles spatiales, l'une longue, selon la direction générale de l'écoulement, que l'on notera (L), et l'autre courte, dans la direction orthogonale au fond, que l'on notera (H) et qui représente la profondeur caractéristique.

L'intérêt principale de certaines recherches est de déterminer les paramètres du ressaut hydraulique, qui permet d'indiquer le positionnement exact du ressaut, mais malheureusement jusqu'à présent n'existe aucune relation constante exploitable pour définir les caractéristiques de ce phénomène pour quelques configurations. La connaissance de la position du ressaut revêt d'un intérêt énorme, elle permet d'assurer la protection des sols et des berges de canal d'évacuation des crues contre la destruction.

D'autre part, on peut créer au laboratoire différentes configurations du ressaut hydraulique, par le changement des exigences au début du ressaut (profondeur d'eau initial, débit transporté...etc.) et en fin du ressaut (profondeur d'eau aval, l'inclinaison du canal, ça l'emplacement, propriété d'obstacle...etc.) (Debabeche et al, 2009). Le ressaut classique est considéré comme une référence pour toute étude dans ce domaine, il est généré dans un canal de

Introduction générale

l'angle d'inclination nulle et absence d'obstacle de contrôle (Hager, Bremen et Kawagoshi 1990).

La présence à aval de ressaut un seuil ou bien une marche est appelée un ressaut contrôlé (Hager et Bretz, 1988).

De nombreuses recherches ont déjà été consacrées au ressaut hydraulique, mais quelques aspects sont restés inexploités comme il ressort dans les études antérieures, particulièrement au type du ressaut évoluant en canal de forme rectangulaire aux parois rugueuses. Parmi les scientifiques étudient l'effet de la rugosité sur les caractéristiques du ressaut, sont évidemment celles de Rajaratnam (1968) traité la configuration du ressaut crée en canal rectangulaire à fond rugueux, Kateb (2006) évalué expérimentalement et théoriquement la position du ressaut en canal triangulaire aux parois rugueuses, Ghamir (2012) analysé l'influence de la rugosité à fond de canal parabolique (profilé en U).

Dans l'idée de combler cette lacune, on a ciblé deux buts essentiels, le premier est d'essayer de mieux comprendre et connaître le ressaut hydraulique se produit en canal aux parois rugueuses et contrôle par seuil à parois mince. Le deuxième objectif est d'établir une relation empirique entre des paramètres adimensionnels hydrauliques et géométriques traduites respectivement par les conditions amont et aval de l'écoulement et la nature de l'ouvrage de contrôle entre autres la hauteur en amont de l'ouvrage et le nombre de Froude et l'effet de la rugosité. Afin de dimensionner un bassin d'amortissement mieux économique par rapport la réalisation, aussi plus petit et compact.

Afin d'atteindre ces objectifs, notre travail organiser en trois parties :

La bibliographie est la première partie qui mettra en revue l'approche scientifique et théorique du phénomène. Quatre chapitres sont présentés dans cette partie. Au début nous avons définis les termes techniques utilisés dans notre recherche, pour rendre cette thèse plus facile à lire et permettre aux lecteurs de comprendre rapidement le sujet. Le chapitre suivant, nous avons synthésés les études précédents examinés le ressaut hydraulique produit en canal rectangulaire. Et puis nous avons alloué un chapitre pour parler en détail sur le phénomène du ressaut dans le canal triangulaire. Ensuite terminons la première partie par la présentation des recherches traitées le ressaut hydraulique déplacés dans un canal parabolique à fond rugueux.

Une deuxième partie qui traitera du protocole expérimental qui sera adopté ainsi que l'interprétation des résultats expérimentaux. Elle est scindée en deux. L'un exposé en détail les

Introduction générale

installations de modèle intéresser ainsi que les instruments de mesures utilisés, et présente également le protocole expérimental. Les principaux résultats obtenus au laboratoire hydraulique avec l'analyse sont rappelés au chapitre deux.

La dernière partie de ma thèse, comporte l'approche théorique. Elle sectionne en deux. Nous avons déterminé l'équation théorique adopter à la configuration du ressaut étudié aux parois rugueuses dans la première section. Et pour la deuxième, nous avons exploité les résultats expérimentaux obtenues pour ajouter l'équation trouver et définir la valeur du coefficient de résistance (C_R).

Le dernier paragraphe de cette recherche est la conclusion générale, à travers laquelle nous mentionnons les résultats auxquels nous sommes parvenus.



Première partie
Recherche
Bibliographique

Introduction à la première partie

La recherche bibliographique est indispensable et nécessaire pour réaliser une thèse, elle donne une vue générale et théorique sur la thématique cible dans notre problématique, et aussi présente les différentes productions et les approches scientifiques antérieurement réalisés par différents auteurs relatifs au notre sujet.

Dans le domaine hydraulique, la connaissance des paramètres du ressaut hydraulique a une valeur très importante, en effet, c'est grâce à cet emplacement que le constructeur déclare le dimensionnement du bassin de réduction d'énergie, pour garantir la protection les parois du canal d'évacuation des crues.

En effet, quatre chapitres nous avons proposés dans cette partie, qui sont les suivants :

Chapitre 01 : Généralités sur le ressaut hydraulique ;

Chapitre 02 : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire ;

Chapitre 03 : Ressaut hydraulique en canal triangulaire ;

Chapitre 04 : Ressaut hydraulique en canal profilé en U à fond rugueux.



Chapitre I :
Généralités
sur le ressaut
hydraulique

Chapitre I : Généralités sur le ressaut hydraulique

I.1. Introduction

Les termes présentés dans ce contexte permettent d'expliquer théoriquement le ressaut hydraulique, afin de mieux appréhender et comprendre ce phénomène. Pour ce faire, nous allons nous intéresser à la définition de quelques termes clés qui se rapportent à ma thèse.

Et aussi, nous élaborons un petit historique présentant les résultats attendus par les hydrauliciens qui travaillent dans ce domaine.

I.2. Ecoulement à surface libre

I.2.1. Définition

Les fluides transportent dans un lieu à ciel ouvert en contact avec l'atmosphère forment les écoulements à surface libre. Ce dernier ayant une difficulté pour identifier les caractéristiques d'écoulements à savoir : forme, position, vitesse...etc. Ce type d'écoulement est trouvé dans les grandes zones humides à savoir les rivières, les oueds, les canaux...etc.

I.2.2. Types

Les types d'écoulements à surface libre sont les suivants :

❖ Ecoulement uniforme et non-uniforme

Si les paramètres suivants tels que : la hauteur de lame d'eau, la vitesse, la section et l'inclinaison du canal sont même valeurs pour une longueur connue du canal, on dit écoulement uniforme, et par conséquent la ligne du radier et la surface d'eau et de charge sont parallèles.

L'écoulement non uniforme dans le cas les paramètres précédents sont variables dans l'espace.

❖ Ecoulement permanent et non-permanent

On dit l'écoulement est permanent, si la profondeur, la vitesse et le débit ne sont pas variés dans le temps et restent constantes dans une section du canal. Le contraire est non-permanent.

Il existe d'autres caractéristiques peuvent être trouvées pour les deux types :

Écoulement brusquement varié dans le cas des dimensions, des formes, de la rugosité, de la pente du canal change de manière rapide. Dans le cas contraire, on dit qu'il est graduellement varié.

I.3. Définition du Nombre de Froude

Abrévié par deux lettres (Fr), en vue générale, il représente la partie dynamique de la circulation du liquide dans des canaux et par définition théorique il est une valeur sans dimension, rapportée la vitesse d'écoulement du fluide sur la vitesse de propagation des ondes de surface.

Selon le nombre de Froude on peut classer trois types du régime d'écoulement, qui sont les suivants :

- Si (Fr) inférieure à 1, le régime fluvial ;
- Si (Fr) égale à 1, le régime critique ;
- Si (Fr) supérieure à 1, le régime torrentiel.

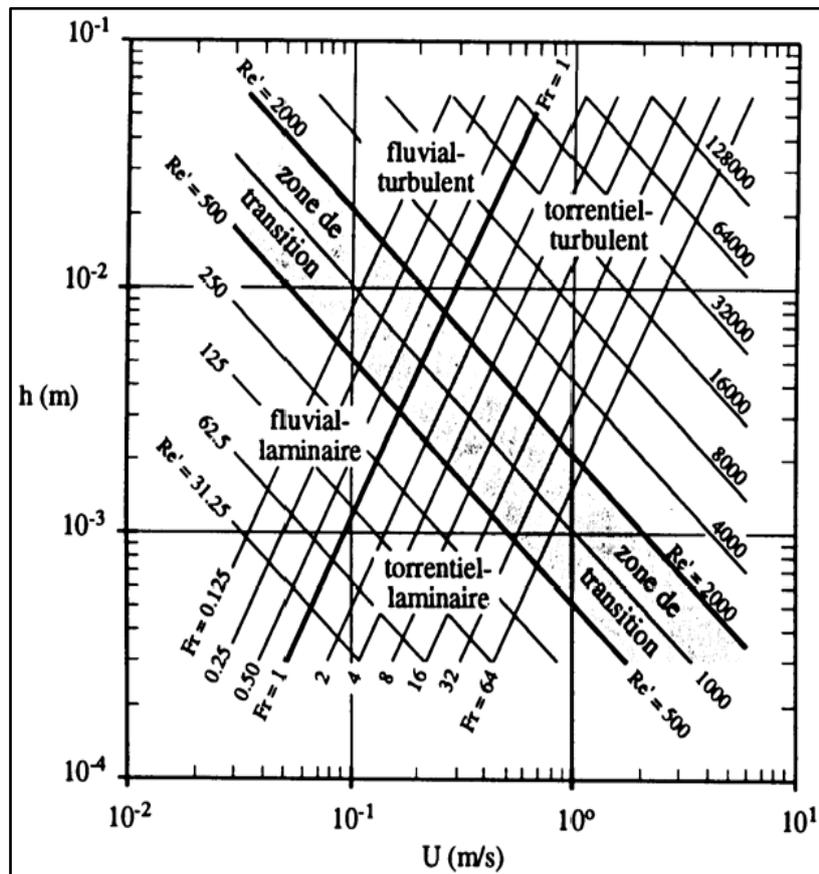


Figure 1. 1 : Identification du régime d'écoulement en fonction du nombre de Froude.

I.4. Définition le ressaut hydraulique

Il existe plusieurs définitions, parmi lesquels :

- ✚ L'écoulement permanent à surface libre brusquement varié caractéristique par un phénomène couramment s'appelle ressaut hydraulique observé lors de la transition du régime torrentiel (super critique c.à.d. la figure de la surface d'écoulement sous forme de rouleaux) au régime fluvial (sous critique c.à.d. on observe des ondes surfaciques faible et pratiquement libre). Ce passage crée une zone turbulente avec des boules d'air introduisent dans le fluide.
- ✚ Autre définition, le ressaut hydraulique est obtenu soit par l'écoulement sur une pente inclinée supérieure à la pente critique, soit par le passage d'un écoulement de fluide à partir d'un niveau moins par rapport à la « hauteur critique » à un haut niveau localisé au-dessus de la « hauteur critique », entre les deux états produisent une zone de fortes intensités de turbulence avec une surface libre brusque discontinuité figurent de rouleaux.

I.5. Description du phénomène

Sur l'action d'une perte de vitesse importante, la surface de liquide transporté s'élève brusquement, qui se traduit la transformation d'énergie cinétique en énergie potentielle et en turbulence, et par conséquence des pertes irréversibles de charge et les molécules de liquide s'empile sur lui-même à la manière d'une onde. Cette description a été expliquée par Frédéric Murzyn et Hubert Chanson en 2009.

I.6. Apparition des ressauts

De manières générales, nous peuvent trouver les ressauts hydrauliques :

- Dans la nature, par exemple :
 - Ils apparaissent fréquemment dans les rivières ou dans les torrents de montagne...etc.



Photo 1. 1 : Ressaut hydraulique dans la nature.

- Ils peuvent aussi se produire et recréer des ressauts hydrauliques en laboratoire par différentes formes, en respect des certaines conditions pour crée.



Photo 1. 2 : Ressaut hydraulique obtenu à l'Université de Ouargla (Département de Hydraulique et Génie civile) par BRAHIMI Abdelouahed (2022). L'eau s'écoule de droite à gauche. $Fr_1=12,6$; $h_1=2$ cm.

I.7. Paramètres du ressaut hydraulique

En générale, il y a quatre paramètres :

- ❖ Hauteurs conjuguées ;
- ❖ Longueur du ressaut ;
- ❖ Longueur du rouleau ;
- ❖ Rendement du ressaut.

I.7.1. Hauteurs conjuguées

Il existe deux hauteurs, la première hauteur conjuguée s'appelle la hauteur conjuguée en amont du ressaut se trouve au début du ressaut c'est à dire le niveau d'eau dans la section initiale, tandis que la deuxième hauteur conjuguée se nomme la hauteur conjuguée à l'aval du ressaut correspondant le niveau d'eau à la fin du ressaut ou bien la section finale.

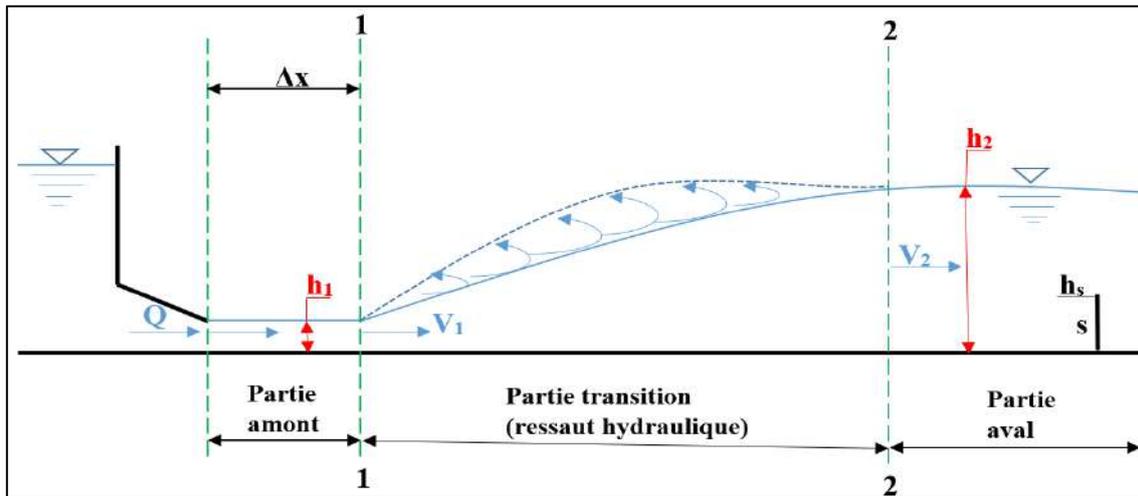


Figure 1. 2 : Schéma descriptif d'emplacement des hauteurs conjuguées.

I.7.2. Longueur du ressaut

La longueur du ressaut est définie comme la distance entre les deux hauteurs conjuguées en amont et aval c'est-à-dire entre au début et la fin du ressaut. La position au début du ressaut est relativement facile à reconnaître, par contre la fin du ressaut est très difficile à identifier. D'après Hager (1990), lorsque l'ébullition de surface est disparue, le niveau de turbulence diminue de manière significative indiquant la fin de la zone de dégazage, de toute évidence, la remonter de belles d'air à la surface indique la fin du ressaut. D'autre définition, Posey et Hsing (1938) dits que la fin du ressaut était confortable avec la diminution des grosses perturbations de la surface libre.

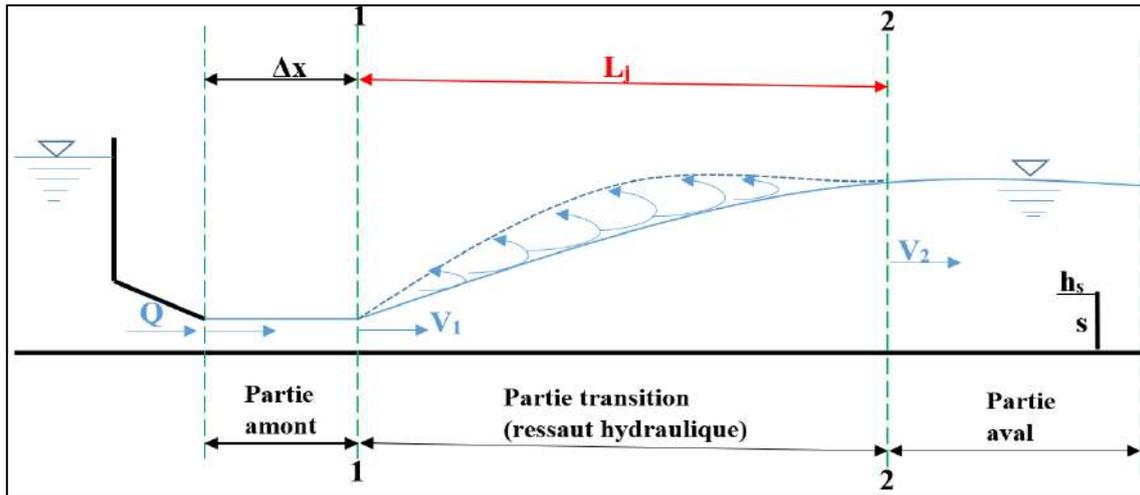


Figure 1.3 : Schéma descriptif d'emplacement de la longueur du ressaut.

I.7.3. Longueur du rouleau

L'entraînement d'air avec fortes intensités de turbulence permet de créer la formation d'un rouleau, c'est-à-dire une zone de recirculation du liquide de l'aval vers l'amont. En effet, Hager et al. (1990) a proposé à définir la fin du rouleau comme le point à la surface du liquide au la vitesse horizontale est nulle, en amont de ce point, le fluide remonte vers l'amont du ressaut. Pour le repérer expérimentalement, Hager et al. (1990) ont proposé de suivre les trajectoires des nombreuses bulles d'air qui sont entraînées dans un ressaut. Vers la fin du rouleau, ces bulles remontent quasiment à la verticale. Arrivées à la surface, elles repartent vers l'amont ou partent vers l'aval selon qu'elles arrivent d'un côté ou de l'autre de la fin du rouleau.

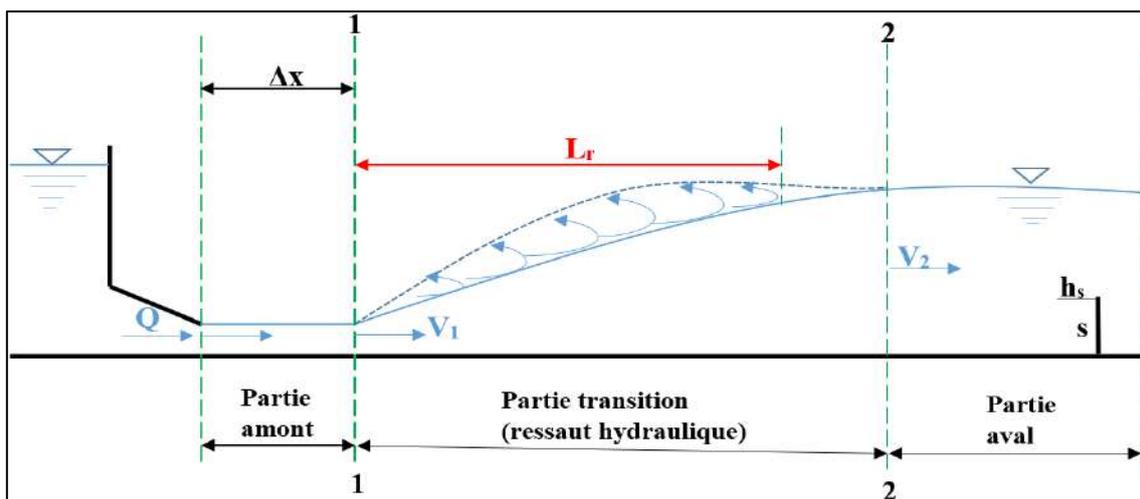


Figure 1.4 : Schéma descriptif d'emplacement de la longueur du rouleau.

I.7.4. Dissipation d'énergie

Le rendement du ressaut ou bien la capacité de dissipation d'énergie est définie comme l'aptitude de conversion d'énergie cinétique vers l'énergie potentielle.

En effet, l'écoulement entraine provoque une réduction d'énergie notable, c.ad, une gagner une grande profondeur d'eau grave a fort vitesse d'écoulement à amont.

I.8. Classification des ressauts

Nous distinguons cinq types du ressaut :

I.8.1. Ressaut ondulé

Selon Andersen (1998), on appelle un ressaut ondulé lorsque la hauteur aval sur la hauteur amont est très faible, qui se traduit la turbulence est faible, et donc la surface libre d'écoulement à l'aval légèrement rides, et par conséquent le nombre de Froude en trouver dans l'intervalle suivant : $1 < Fr_1 < 1,7$.

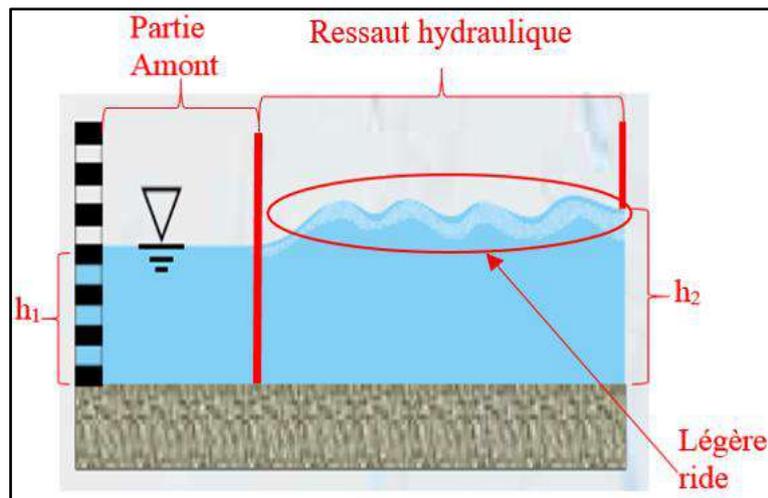


Figure 1. 5 : Ressaut ondulé.

I.8.2. Le Pré-ressaut ou le ressaut faible

Pour les valeurs de nombre de Froude varie entre 1,7 à 2,5, on remarque à la partie aval sur la surface libre d'écoulement de création de petites ondes, ces derniers s'augmente avec l'accroissement de la valeur de nombre de Froude (Fr_1) à l'amont.

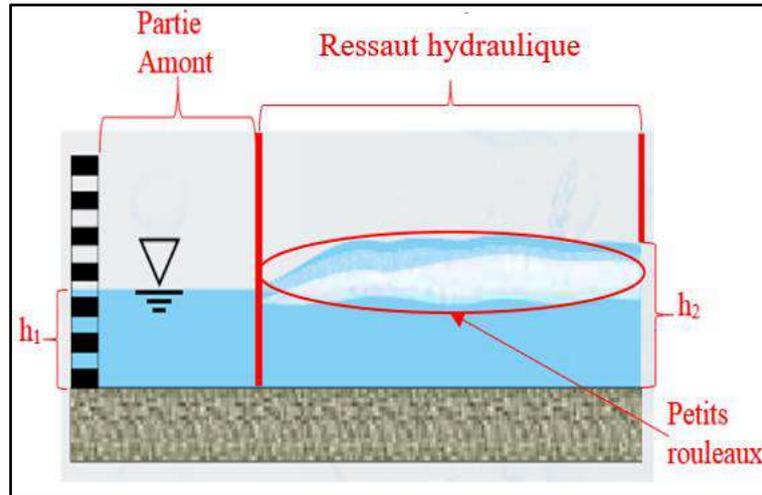


Figure 1. 6 : Faible ressaut ou pré-ressaut.

I.8.3. Le ressaut de transition ou oscillatoire

Ce type de ressaut crée dans l'intervalle $2,5 < Fr_1 < 4,5$, se présente sous forme de séries de grandes ondes à des temps variables. Ce type de ressaut provoque un 'impact négative sur les parois du canal.

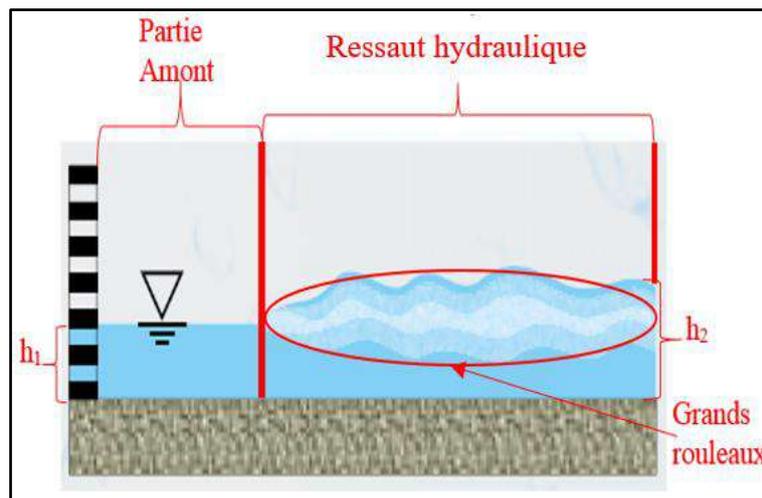


Figure 1. 7 : Ressaut oscillatoire ou transition.

I.8.4. Le ressaut stable ou établi

Il est remarqué dans l'intervalle $4,5 < Fr_1 < 9$, il considéré comme bassin de diminution de la vitesse d'écoulement à amont du ressaut, il peut d'atteindre des rendements élevés arrivé jusque 70%.

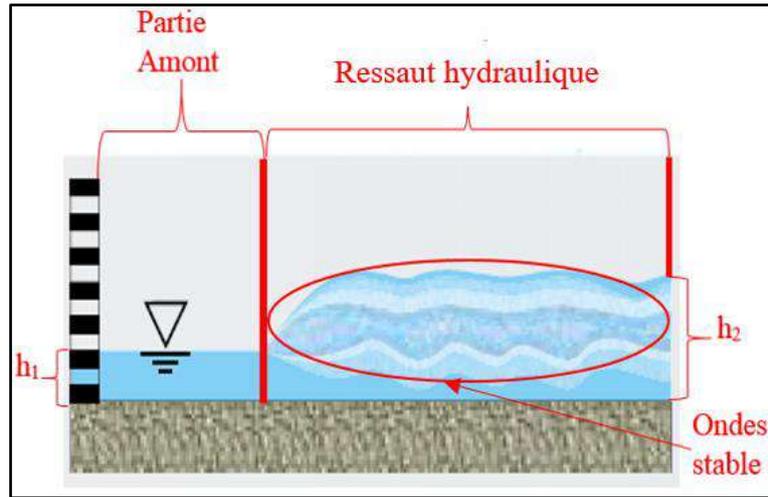


Figure 1. 8 : Le ressaut stable ou établi.

I.8.5. Le ressaut agité (Fort)

Il constate pour des nombres de Froude très grand c.à.d. supérieur à 9. Les vitesses amont relativement élevée par contre la profondeur est très faible. Il est caractérisé par une instabilité verticale tant qu'ils ne peuvent pas adhérer de manière cohérente.

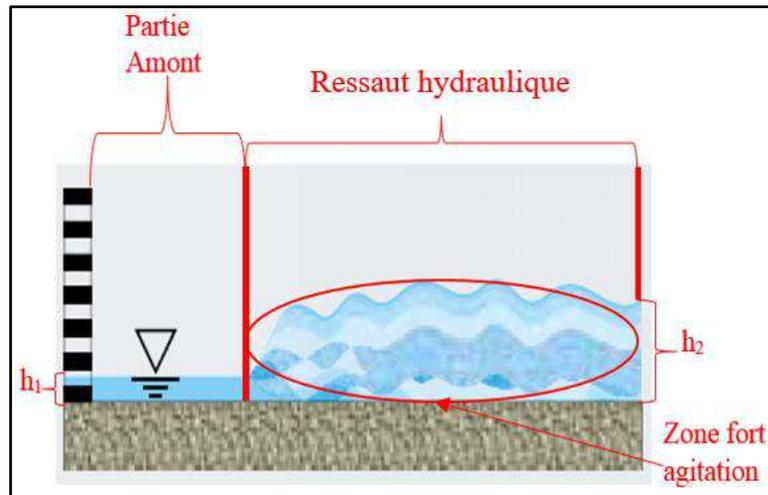


Figure 1. 9 : Le ressaut agité (Fort).

I.9. Historique du ressaut hydraulique

Un livre intitulé l'histoire de l'hydraulique, écrit par Rouse et Ince, racontant l'histoire du ressaut hydraulique jusqu'à 1900, il mentionné les principaux auteurs qui ont étudiés le ressaut hydraulique. Léonard de Vinci (1452 - 1519) est le premier auteur à traiter le phénomène de manière expérimentale. Après trois siècles, Venturi (1746 - 1822) un auteur Italien observe que la hauteur de charge en vue de l'irrigation gagner à partir le ressaut. Puits quelques années, Bidone (1781 - 1839) considéré le ressaut comme le « père », il est le premier à avoir observé

Chapitre I : Généralités sur le ressaut hydraulique

et analysé le ressaut sous la forme de systématique. La loi de la quantité de mouvement utilise par Bélanger (1789 - 1874) et obtient la formule théorique du ressaut.

L'effet du ressaut hydraulique sur la dissipation d'énergie en termes des hauteurs est élaboré par Bresse (1822 - 1883). Suite à des essais en laboratoire, Merriman (1848 - 1925) établit une expression empirique pour les hauteurs conjuguées.

Les travaux développement jusqu'à la 2^{ème} Guerre mondiale sont :

- En Grande-Bretagne, Gibson détermine des hauteurs conjuguées et le facteur de correction des vitesses par volet expérimentale avec le nombre de Froude arriver jusqu'à 8,6 ;
- Kennison un auteur américain utilise l'équation de la conservation d'énergie pour identifier les hauteurs conjuguées et présenter en fonction le nombre de Froude en termes adimensionnels sur un diagramme à la première fois. En 1925, Stevens est à avoir décrit la dissipation d'énergie en fonction des hauteurs (mais n'est pas validée par l'expérimentale) ;
- Safranez un chercheur européen réalise plusieurs études dans le domaine du ressaut, en 1927, il expose à l'assiste de diagrammes adimensionnels les résultats des différentes recherches expérimentales. En 1929, il détermine une relation empirique, avec le nombre de Froude varie entre 1,72 jusqu'à 19,1. En 1930, il propose la puissance dissipée d'énergie liée au volume du ressaut. En 1933, il élabore une formule empirique pour la longueur du rouleau de surface du ressaut classique ;
- Dans l'année 1936, Bakhmeteff et Matzke ajoute un facteur d'écoulement cinétique équivalent au carré du nombre de Froude dans une théorie cohérente sur le ressaut ;
- La thèse de Citrini est synthétisée les résultats effectuer sur le ressaut hydraulique jusqu'à 1939, elle présente tous les points sur les connaissances de son époque sur le phénomène du ressaut.

L'historique des différents travaux réalisés sur le ressaut hydraulique sont classique est présenté comme suit :

- ❖ L'article publié par Bradley et Peterka en 1957 détermine la longueur du ressaut ainsi que l'applicabilité de l'expression du ressaut pour toutes les configurations de bassins, et aussi analyser les différentes formes du ressaut ;
- ❖ « Open channel hydraulics » de 1959 est un livre décrire dans le chapitre 15 une présentation achevée, claire et bref du ressaut hydraulique. De très nombreux essais ont été effectués par Schröder sur le ressaut classique, il donne une explication convaincante de la dynamique interne du ressaut ;
- ❖ En 1964, Silvester utilise le théorème d'Euler pour identifier les caractéristiques du ressaut évaluent dans des canaux horizontaux à différents profils ;
- ❖ Rajaratnam est un grand chercheur dans le domaine du ressaut, il étudie divers types de ressauts.
- ❖ Les données de plusieurs auteurs relatifs le profil de surface du ressaut exploite par Rajaratnam et Subramanya en 1968 et trace un nouveau diagramme adimensionnel avec de nouvelles coordonnées m (coordonnée longitudinale) et n (coordonnée

Chapitre I : Généralités sur le ressaut hydraulique

verticale). La même année 1968, Rajaratnam analyse le ressaut dans canal à fond rugueux.

- ❖ L'effet du mélange d'air sur le ressaut hydraulique classique est examiné par Herbrand en 1969.
- ❖ Des essais expérimentaux relatifs à la turbulence, aux tensions de Reynolds et soulève le problème diphasique de l'écoulement réalisés en 1971 et 1972 par Resch et Leutheusser.
- ❖ Les pressions dynamiques sur le fond du bassin mesurent par Khader et Elango en 1974.
- ❖ Hager et Wanoschek (1987) ayant examiné le ressaut hydraulique crée dans canal triangulaire.
- ❖ Hager et al (1990) contribuent à leurs expressions pour établir des équations empiriques déterminent les longueurs géométriques et rendement de dissipation d'énergie.

Les travaux réalisés concernant l'effet de la marche positive et négative sont :

- En 1950, Forster et Skrinde effectuent des mesures sur les écoulements contrôlés par une marche positive et un seuil ;
- Une étude fondamentale élaboré par Moore et Morgan en 1959, a montré l'effet de la marche négative sur les bassins amortisseurs est efficace pour stabiliser le ressaut ;
- En 1974, l'auteur Sharp s'est consacré à examiner le ressaut sur des marches négatives et aussi les marches avec l'extrémité arrondie ;
- Hager analyse le ressaut de type B contrôlé par marche négative en 1985, et les valeurs expérimentales de leur approche est mieux que l'équation de Moore et Morgan. Hager et Sinniger dans la même année étudient les caractéristiques du ressaut contrôlé par marche positive ;
- En 1986, Hager et Bretz traitent complète du ressaut hydraulique testé par marche positive et négative, et représentent sur un seul diagramme les données de deux types du ressaut.

Les études élaborent pour un ressaut forcé par les blocs et seuils dentés sont les suites :

- Harleman en 1955 fait observer que plus le bloc est profilé, moins il est sujet aux dégâts dus à la cavitation de haute vitesse mais aussi plus son efficacité diminue ;
- L'expérience de Pillai et Unny en 1964 permet d'analyser plusieurs types de blocs avec différentes l'angle d'ouverture (60° , 90° , 120° et 180°), il montre que le bloc avec l'angle d'ouverture égal 120° est plus diminuer la hauteur d'eau aval par rapport les autres angles ;
- Pour les deux ans (1965 – 1966), Rand compare entre deux types du ressaut, il déduit que le ressaut forcé par le seuil continu est plus efficace que le seuil denté ;
- En 1971, Basco représente sur un diagramme le coefficient de trainée en fonction de la hauteur relative du bloc et son emplacement, il définit sur la même graphique la zone d'optimum de dimensionnement d'in bassin amortisseur ;
- En 1980, Ranga Raju et Al observent si la rangée de blocs est plus proche du pied du ressaut donc la force de trainée est plus grande.

Chapitre I : Généralités sur le ressaut hydraulique

Les seuils continus sont objectifs de plusieurs auteurs, en 1950, Forster et Skrinde sont les premiers qui analysent le ressaut forcé par seuil continue d'une façon fondamentale, ils ont identifié une relation importante pour d'écrire les hauteurs conjuguées, aussi leurs résultats expérimentaux sont plus proches à la courbe théorique.

Shukry en 1957 propose de localiser le seuil au centre du bassin, en prend en considération l'inefficacité du ressaut noyé.

Pour la même année, Rand est le premier auteur à classifier le ressaut contrôlé par seuil en 10 cas différent, il recommande pour des raisons de sécurité d'augmentation la hauteur de seuil à 10%. Même auteur en 1965 utilise les résultats précédents pour présenter d'une autre manière, avec les arrangements plus pratiques à utiliser pour le dimensionnement. Il montre en 1966 le seuil continu est plus efficace pour stabiliser le ressaut par rapport le seuil denté. Il publie en 1970 l'étude de l'érosion du canal à aval du seuil.

L'approche du Macha en 1963 a montré deux choix, le premièrement les seuils dentés sont plus efficaces que les seuils continues, et deuxièmes la sécurité est proportionnelle à S et inversement proportionnelle à F .

Le point expérimental mesure par l'essai de Rajaratnam en 1964 sont présentes dans un diagramme le coefficient de traîné et la position relative du seuil, et formés un courbe moyen divise en quatre zones.

En suite Rajaratnam et Murahari en 1971 continue les travaux précédents, ils sont étudiés en détail la répartition des vitesses et les profils de surface.

En 1972, Karki et al établie deux équations pour les ressauts entièrement torrentiels par-dessus des seuils, il exprime la hauteur de seuil en fonction l'onde maximale à l'aval du seuil et la hauteur d'écoulement à l'amont, et la deuxième décrit la hauteur d'eau maximale à l'aval en relation la hauteur d'écoulement à l'amont et la hauteur maximale à l'aval. Puits en 1976, il a étudié le ressaut contrôle par seuil en tenant compte l'effet des pressions sur le fond et sur les faces verticales du seuil.

La force de pression exercée sur le seuil est mesurée par Narayanan et Schizas en 1980 pour différent type d'écoulement.

Le ressaut forcé par un seuil à paroi mince analysé par Othsu en 1981 par trois types à savoir, l'action de l'aval sur l'amont, sans action et écoulement sans formation de ressaut.

Chapitre I : Généralités sur le ressaut hydraulique

L'effet de la cavitation sur les seuils continus à cause des vitesses élevés est analysé par Stein en 1982 et Scheuer en 1985.

En 1984, Arandjelovic effectué des essais dynamiques de pressions sur les seuils pour faire une étude statique.

L'influence de différent type du seuil sur les caractéristiques du ressaut hydraulique en canal de section droite triangulaire a été analysé par Debabeche et Achour en 2001.

Le travail d'Achour, Sedira et Debabeche (2002) s'intéresse au ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal de section droite rectangulaire à fond lisse. Deux configurations du ressaut sont observées. La première configuration répond aux conditions expérimentales ($X \cong L_r$) de Forster et Skrinde (1950) pour un grand nombre de valeurs de la position relative ($X=x/h_2$). Et la deuxième phase exige la position relative du seuil correspond à la longueur du ressaut (L_j).

Les travaux récents portant particulièrement sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal à fond rugueux sont :

L'article publié par Kateb en 2006 déterminé la position des paramètres du ressaut crée dans canal triangulaire aux parois rugueuses.

L'étude de Ghamri (2012) analysé l'effet de la rugosité du fond de canal de profil U.

I.10. Conclusion

La revue de la littérature montre que les caractéristiques intervenant à déterminer la localisation du ressaut hydraulique sont essentielles, le nombre de Froude de l'écoulement incident (Fr_1), le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut (Y) calcule par la hauteur initiale (h_1) et finale (h_2) du ressaut et, la longueur du rouleau et la longueur du ressaut.

Les chapitres suivants décrivent les différentes configurations du ressaut hydraulique qui ont été menées concernant ma mémoire.



Chapitre II :
Ressaut
hydraulique dans
un canal
rectangulaire

Chapitre II : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

II.1. Introduction

Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire a fait l'objet de nombreuses études, car il est caractérisé par sa mise en œuvre facile et aussi sa géométrie simple. Plusieurs chercheurs travaillent dans ce domaine, dans ce chapitre nous présentons quelques approches scientifiques qui sont : le ressaut hydraulique classique (Equation de Belanger (1841)) et l'essai expérimental, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil et le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à fond rugueux.

II.2. Ressaut hydraulique classique

Par définition ce type de ressaut est créé dans un canal rectangulaire ayant un fond lisse de forme droite horizontale à pente presque nulle ou faible sans obstacle à l'aval. Ce modèle est considéré comme référence pour toutes les études dans ce domaine.

II.2.1. Equation de Belanger (1841)

Cette relation a pour objet d'identifier le rapport des hauteurs conjuguées (Y). La figure (2.1) présentée le schéma qui définit le ressaut hydraulique classique évoluant entre ses sections initiale (1-1) et finale (2-2).

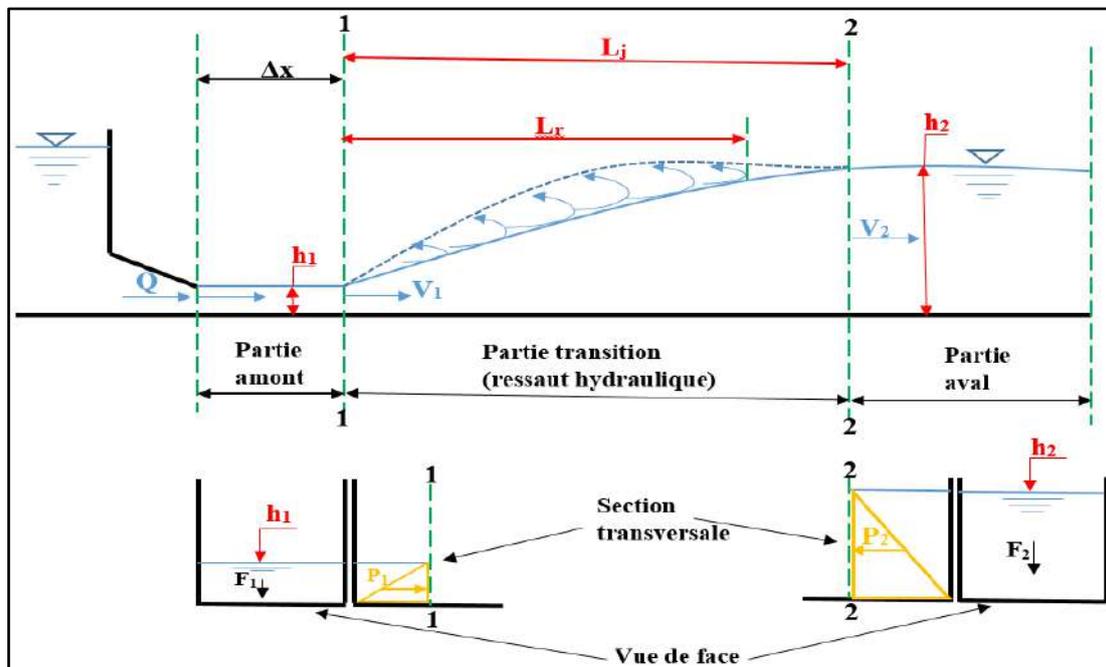


Figure 2. 1 : Dessin explicatif du ressaut classique dans un canal rectangulaire.

Chapitre II : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

En règle générale et quel que soit la figure du canal étudié, le théorème d'Euler est plus adopté pour la résolution du problème posé par la détermination le rapport des hauteurs conjuguées (Y), et donc l'application de l'équation de continuité entre l'amont et l'aval du ressaut permet de dire la variation de la quantité de mouvement entre les deux sections sera égale à la somme des forces extérieures agissant sur l'écoulement.

Pour l'utilisation correcte de ce théorème, Belanger proposé les hypothèses simplificatrices suivants :

- La force de frottement entre l'eau et les parois et le fond de canal est négligeable ;
- La répartition des vitesses est uniforme, c'est-à-dire en considéré une vitesse moyenne pour chaque section initiale et finale du ressaut ;
- L'effet de l'air sur la surface libre est négligeable ;
- La pression est hydrostatique dans les deux sections ;
- Les forces extérieures se simplifient aux seules forces de pression hydrostatique s'exercés en avant et en après du ressaut.

Si on projette l'équation de continuité sur un axe horizontale de l'écoulement, on obtient :

$$F_1 - F_2 = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad (2.1)$$

Où :

- ❖ ρ : la masse volumique du liquide.
- ❖ Q : le débit écoule dans le canal.
- ❖ 1 : l'indice de la partie amont du ressaut hydraulique.
- ❖ 2 : l'indice de la partie aval du ressaut hydraulique.
- ❖ V : la vitesse de l'écoulement, $V=Q/A$.
- ❖ F : la force de pression hydrostatique, $F = PA$.
- ❖ P : la pression hydrostatique, $P = \rho g h_G$.
- ❖ g : l'accélération de pesanteur.
- ❖ h_G : le centre de gravité, dans ce cas canal rectangulaire $h_G = h/2$.
- ❖ A : l'aire de la section mouillée, dans ce cas canal rectangulaire $A = bh$.
- ❖ b : la largeur de canal.
- ❖ h : le profondeur de la lame d'eau.

Après avoir remplacé les paramètres par leurs valeurs dans l'équation (2.1), et réajustant entre eux nous aurons :

Chapitre II : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

$$\frac{1}{2} \rho g b (h_1^2 - h_2^2) = \frac{\rho Q^2}{b} \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{h_1} \right) \quad (2.2)$$

En 1841, cette équation a été résolue par Bélanger, et trouver la formule suivante :

$$Y = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2}) - 1 \quad (2.3)$$

Avec Fr_1 : le nombre de Froude à l'amont du ressaut, et leur relation pour une section rectangulaire est :

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} \quad (2.4)$$

II.2.2. Les essais expérimentaux de Hager et al

Le rapport des hauteurs conjuguées

Selon des essais expérimentaux de Hager et Sinniger (1985, 1986), la valeur de $8Fr_1^2$ dans l'équation (2-3) doit être largement supérieur à 1 pour des nombres de Froude $Fr_1 > 3$, donc la nouvelle forme de la relation (2-3) sert être simplifiée et réduite et écrire comme suite :

$$Y = \sqrt{2}Fr_1 - \frac{1}{2} \quad (2.5)$$

Longueur du rouleau

Les deux relations expérimentales suivantes qui forment la longueur du rouleau (L_r) adimensionnée par la profondeur en amont du ressaut (h_1), en fonction des deux paramètres, qui sont le rapport d'aspect donné par $W=h_1/b$, et aussi le nombre de Froude en amont du ressaut (Fr_1) :

La première relation valable pour $W < 0,1$:

$$\frac{L_r}{h_1} = 160 Tgh\left(\frac{Fr_1}{20}\right) - 12 \quad (2.6)$$

La deuxième relation valable pour $0,1 < W < 0,7$:

$$\frac{L_r}{h_1} = 100 Tgh\left(\frac{Fr_1}{12,5}\right) - 12 \quad (2.7)$$

D'autre équation linéaire a été proposée pour un nombre de de Froude en amont du ressaut varie entre 2,5 et 8 :

$$\frac{L_r}{h_1} = 8Fr_1 - 12 \quad (2.8)$$

Longueur du ressaut

L'aide des essais Bradley et Peterka (1957), Hager et al. (1990) a été évalué la longueur du ressaut (L_j) adimensionnée par la profondeur en amont du ressaut (h_1), et donne par la suivante :

$$\frac{L_j}{h_1} = 220 Tgh \left(\frac{Fr_1 - 1}{22} \right) \quad (2.9)$$

Et plus une remarque observée graphiquement pour la longueur du ressaut (L_j) adimensionnée par la profondeur en aval du ressaut (h_2), lorsque le nombre de Froude en amont du ressaut compris entre 4 et 12 (Hager et al. (1990)) : $\frac{L_j}{h_2} = 6$ (2.10)

La relation empirique suivante est valable pour des nombres de Froude en amont du ressaut égal 3 (Sinniger et Hager (1985)) :

$$\frac{L_j}{h_2} = \frac{35\sqrt{Fr_1}}{8+Fr_1} \quad (2.11)$$

Rendement du ressaut

Le rendement d'un ressaut hydraulique classique a été déterminé par Hager et Sinniger en 1986, et donné par la formule suivante :

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{Fr_1} \right]^2 \quad (2.12)$$

Cette formule valable pour des nombres de Froude en amont du ressaut inférieur à 2.

II.3. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince

II.3.1. Approche de Forster et Skrinde (1950)

La particularité de cette étude, les auteurs considérés que la configuration du ressaut est créée de telle manière que le placement du seuil fixe avec la longueur du rouleau (L_r), et aussi ils remarquent que la hauteur de la lame d'eau après le seuil n'a aucune influence sur le ressaut. Les paramètres prend en considération dans cette étude sont :

- ✚ La hauteur relative du seuil s/h_1 .
- ✚ La position relative du seuil X/h_2 .
- ✚ Le nombre de Froude en amont du ressaut Fr_1 .

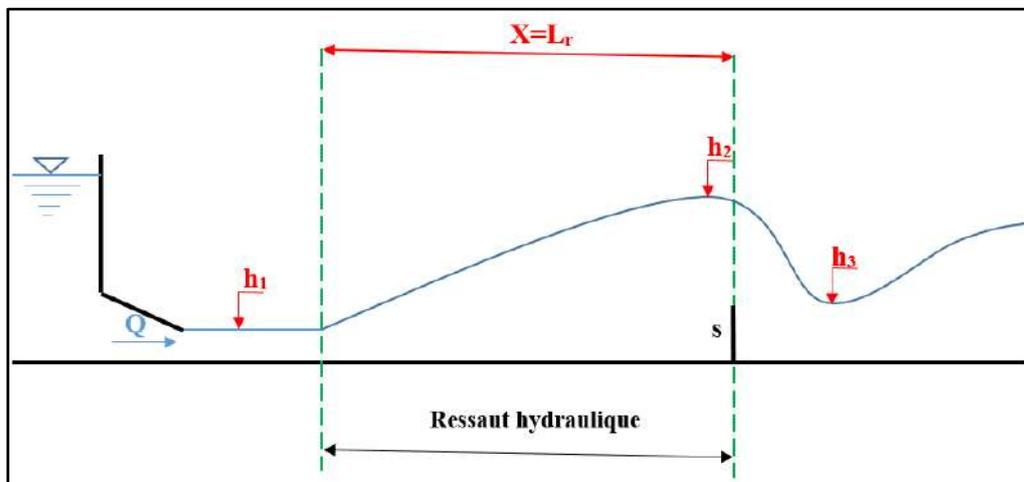


Figure 2. 2 : Approche de Forster et Skrinde (1950).

Chapitre II : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

Les résultats expérimentaux obtenus sont testés pour trois valeurs de la position relative à savoir : 3,5 et 10. Ils présentent dans le diagramme suivant :

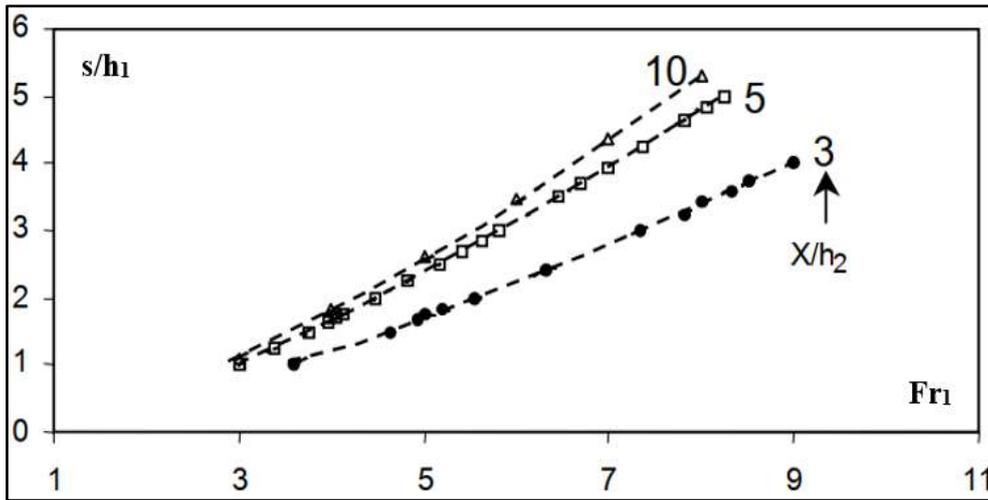


Figure 2.3 : Relation entre la hauteur relative et le nombre du Froude d'écoulement incident (Approche Forster et Skinde 1950).

La figure expose la variation du nombre de Froude (Fr_1) de l'écoulement incident en fonction de la hauteur relative (s/h_1) du seuil, elle détermine par la méthode graphique d'interpolation la valeur de paramètre (X) équivalent l'emplacement de l'obstacle et aussi la longueur du bassin amortisseur.

II.3.2. Approche d'Achour, Sedira et Debabeche (2002)

L'objectif principal de ce travail a été d'observer expérimentalement le comportement de deux configurations du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal de section droite rectangulaire.

La première configuration

Elle confronte avec configuration de Forster et Skrinde (1950), mais l'avantage de ce cas plusieurs valeurs de la position relative (X/h_2) testés de l'environ de 15 valeurs au lieu de trois valeurs, varie entre 3 et 10 avec un pas de 0,5.

Les essais réalisés pour des épaisseurs du seuil variant entre 1 et 6 et dans la gamme $3 \leq Fr_1 \leq 9$.

Une équation de type puissance a été établie par les auteurs :

$$S = C_0 [Fr_1 - 1]^\beta \quad (2.13)$$

β : un paramètre constant et leur valeur égal 5/4 ;

C_0 : un paramètre varie, selon les relations suivantes :

$$\text{Si : } 3 \leq X / h_2 \leq 5, \text{ donc : } C_0 = 0,0604(X / h_2) + 0,1186 \quad (2.14)$$

$$\text{Si : } 3 \leq X / h_2 \leq 10, \text{ donc : } C_0 = 0,0086(X / h_2) + 0,379 \quad (2.15)$$

La deuxième configuration

Les auteurs proposent dans ce cas, le positionnement du seuil correspond avec la longueur de ressaut (L_j), comme indique dans la figure suivante :

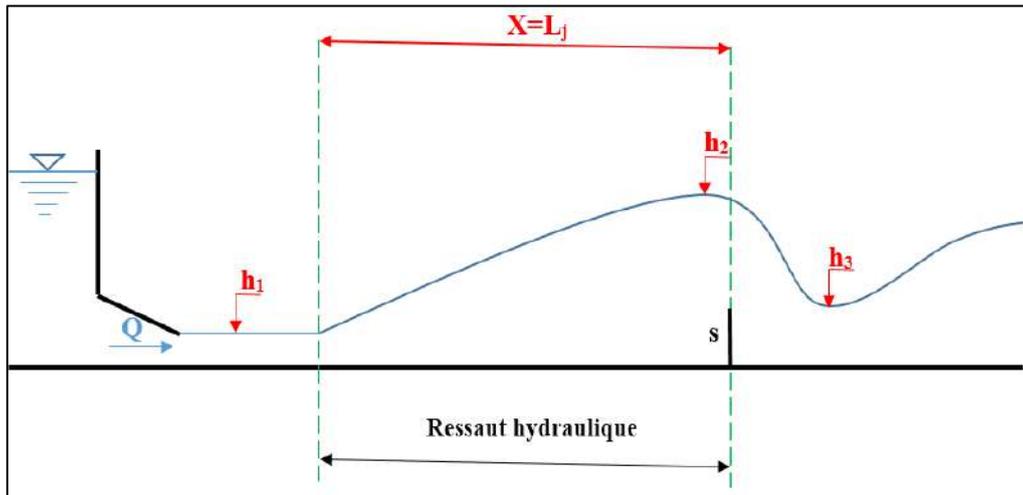


Figure 2. 4 : Dessin explicative d'approche d'Achour, Sedira et Debabeche (2002).

Les mesures expérimentales effectuées dans la série de valeurs du nombre de Froude (Fr_1) de l'écoulement incident varient entre 3 à 9, après l'analyse de données deux équations a été identifiés liés de trois paramètres Y , Fr_1 et s/h_1 :

$$Y = 2,37(s/h_1)^{0,80} + 1 \quad (2.16)$$

$$s/h_1 = 0,562(Fr_1 - 1)^{1,225} \quad (2.17)$$

Les auteurs trouvent que le rapport (X/h_2) environ égal à 6 (confirme le résultat de Peterka, 1983 pour le ressaut classique).

Selon l'analyse des résultats expérimentaux :

$$X/h_1 = 10 (Fr_1 - 1) \quad (2.18)$$

II.4. Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à fond rugueux

II.4.1. Approche de Rajaratnam (1968)

Le ressaut étudié est créé dans un canal rectangulaire à fond rugueux, en effet 37 expériences ont été exécutées pour tester cinq valeurs de la rugosité absolue : ϵ (mm) = 0,975 ; 2,225 ; 2,256 ; 2,469 et 9,144.

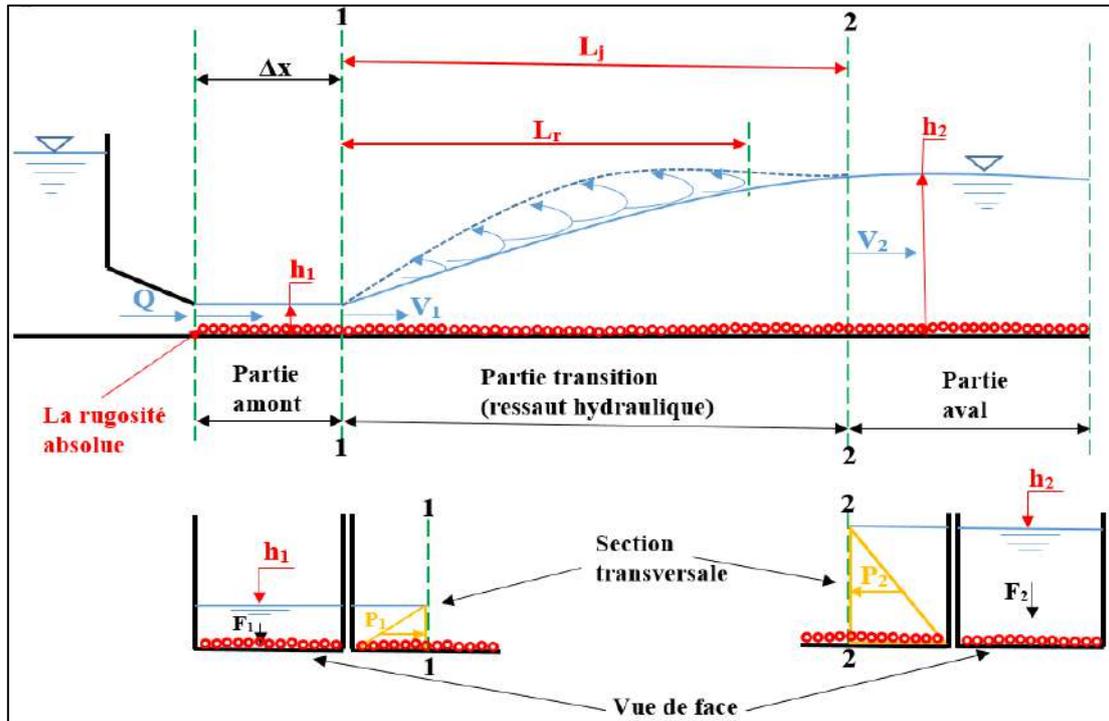


Figure 2. 5 : Approche de Rajaratnam (1968).

Les courbes présentées dans la figure (2.5) sont tracées par Rajaratnam en 1968, elles indiquent pour chaque valeur de la rugosité relative (ϵ/h_1) la variation du rapport des hauteurs conjuguées (Y) en fonction du nombre de Froude en amont du ressaut (Fr_1).

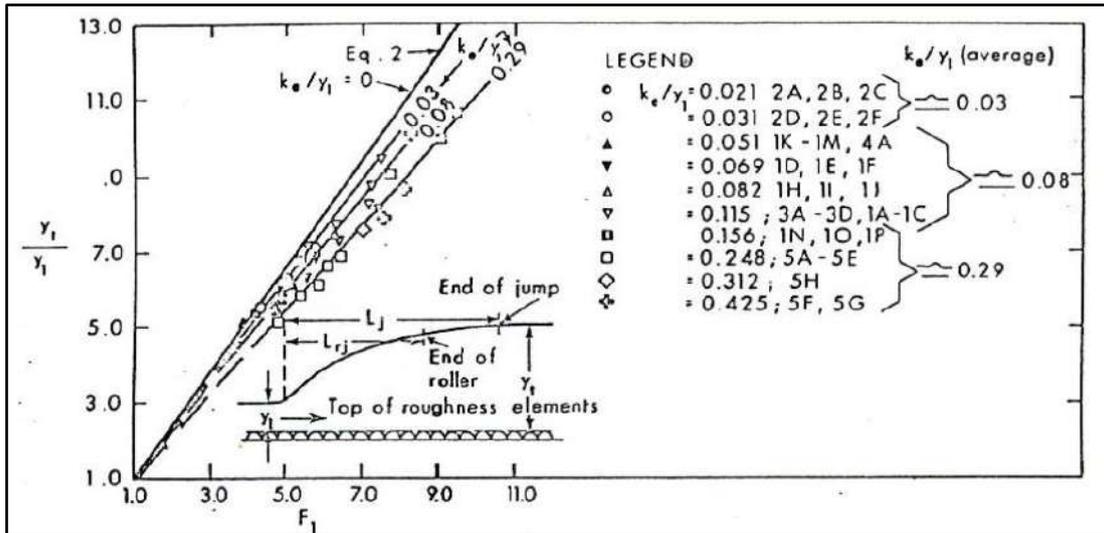


Figure 2. 6 : Graphique expérimentale élaboré par Rajaratnam.

D'après la figure trois équations ont été déterminée :

$$\begin{aligned}
 \text{Si : } \varepsilon / h_1 = 0,03, \text{ donc } h_2/h_1 &= 1,30 Fr_1 - 0,3 \\
 \text{Si : } \varepsilon / h_1 = 0,08, \text{ donc } h_2/h_1 &= 1,22 Fr_1 - 0,24 \\
 \text{Si : } \varepsilon / h_1 = 0,29, \text{ donc } h_2/h_1 &= 1,10 Fr_1 - 0,10
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

L'équation finale retenue par Rajaratnam est suivante :

$$h_2/h_1 = 1,41 Fr_1 - 0,5 \tag{2.20}$$

Les observations découvrent par l'étude de Rajaratnam en 1968 sont :

- La relation entre le paramètre (Y) et la rugosité absolue est relation opposée, c.à.d. lorsque la rugosité augmente le rapport (Y) diminue ;
- Pour le ressaut à fond rugueux les longueurs géométriques du ressaut sont restreintes presque la moitié par rapport à fond lisse.

II.5. Conclusion

Les résultats attendre de ce chapitre sont les suivantes :

Le seul paramètre a été théoriquement déterminé par le Belanger en 1841 est le rapport des hauteurs conjuguées (Y), pour le ressaut classique.

Quel que soit la configuration du ressaut étudié, l'identification de positionnement ou bien les paramètres du ressaut est faites par l'analyse des résultats expérimentaux ; dans ce contexte plusieurs équation ont été proposées et présentées, par différents auteurs.



Chapitre III :
Ressaut
hydraulique en
canal
triangulaire

Chapitre III : Ressaut hydraulique en canal triangulaire

III.1. Introduction

Nous allons exposer dans ce chapitre les principaux travaux les plus significatifs et qui ont contribué à déterminer les caractéristiques du ressaut hydraulique se produisant en canal triangulaire. Trois configurations du ressaut hydraulique seront présentées :

- ❖ Le ressaut hydraulique classique ;
- ❖ L'approche de Debabeche et Achour (2001) ;
- ❖ L'approche de de Kateb (2006).

III.2. Ressaut hydraulique classique

III.2.1. Approche de Hager et Wanoschek (1987)

Le rapport des hauteurs conjuguées

La section du canal trapézoïdal contient deux hauteurs inclinées avec une base de largeur b , si en éliminé la dernière et raccordé les deux hauteurs doivent un canal triangulaire, si pour cette raison pour déduire le paramètre des hauteurs conjuguées (Y) d'un ressaut classique ruisselé dans un canal triangulaire, il faut d'abord déterminer dans un canal trapézoïdal.

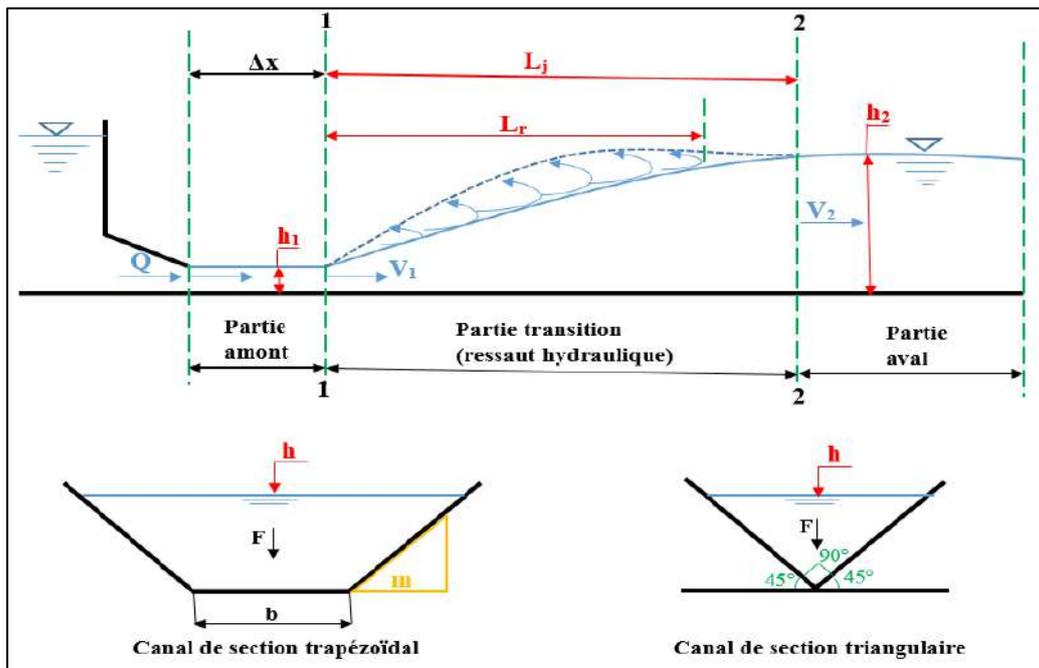


Figure 3.1 : Dessiner explicative du ressaut classique dans un canal triangulaire.

Chapitre III : Ressaut hydraulique en canal triangulaire

Les hypothèses d'application de loi de de la quantité de mouvement si la même les hypothèses mentionnées dans le chapitre I, donc l'équation d'un ressaut classique en canal trapézoïdal doivent :

$$\frac{bh_1^2}{2} + \frac{mh_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(bh_1+mh_1^2)} = \frac{bh_2^2}{2} + \frac{mh_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(bh_2+mh_2^2)} \quad (3.1)$$

Avec m : cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale.

Dans ce cas, on a trois paramètres adimensionnels :

- ❖ Fr_1 : le nombre de Froude d'écoulement incident ;
- ❖ Y : le rapport des hauteurs conjuguées, $Y = h_2 / h_1$;
- ❖ M : la hauteur relative initiale du ressaut, $M = mh_1 / b$.

Si en remplace tous les termes dans l'équation (3.1) obtenue la relation suivante :

$$Fr_1^2 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (3.2)$$

Le canal de section droite triangulaire est un cas particulier du canal trapézoïdal pour lequel, largeur (b) égal zéro donc (M) tendant vers à l'infini, donc l'équation (3.2) écrire sous forme :

$$Fr_1^2 = \frac{2Y^2(Y^2+Y+1)}{3(Y+1)} \quad (3.3)$$

L'équation (3.3) a été simplifié par Hager et Wanoschek (1987), et donne la relation approche suivante :

$$Y = \left(\frac{3}{2} Fr_1^2 - 1 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.4)$$

Longueur du rouleau

Hager et Wanoschek (1987) a été effectué les essais du ressaut hydraulique classique crée dans un canal de section droite symétrique triangulaire avec $m=1$. Les caractéristiques d'écoulement varient selon le paramètre, pour les débits entre 4 et 20 l/s, pour les vitesses varient de 1,7 à 8,6 m/s, et les profondeurs initiales (h_1) de 70 à 76 cm et des nombres de Froude de 2 à 14.

La figure (3.2) représenté la variation de nombre de Froude amont du ressaut (Fr_1) en fonction de la longueur du rouleau relative (L_r/h_2), elle trace par l'exploitation des résultats de mesure obtenue par Hager et Wanoschek (1987).

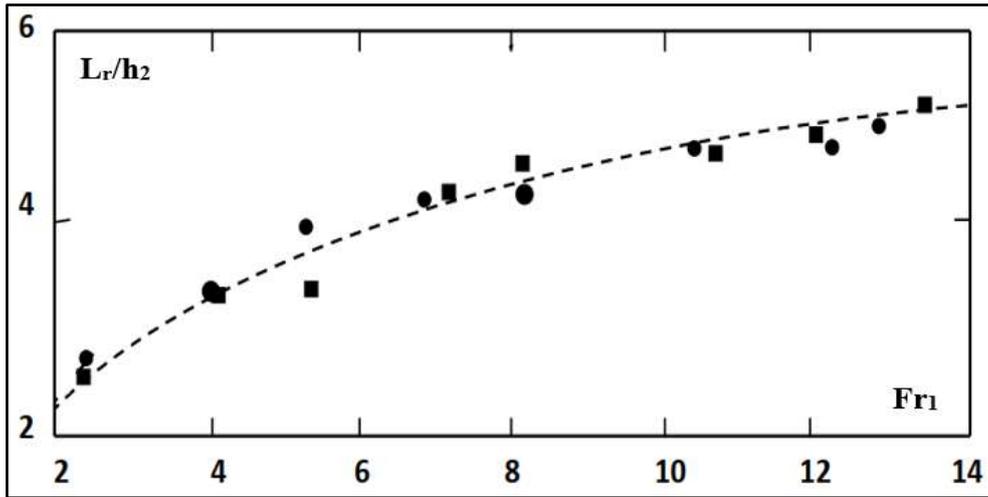


Figure 3.2 : Nombre de Froude amont du ressaut en fonction de la longueur du rouleau relative selon Hager et Wanoschek (1987).

D'après la figure en remarque l'augmentation de nombre de Froude correspondant une augmentation de la longueur relative, l'estimation de la valeur de cette dernière est basé sur l'application de la relation proposée par les auteurs :

$$\text{Pour : } 0,4 < m \leq 1 ; \frac{L_r}{h_2} = 1,8 m^{0,5} Fr_1^{0,4}/m \quad (3.5)$$

Longueur du ressaut

Même les remarques mentionnées ci-dessus pour la longueur relative du ressaut L_j/h_2 , et les données expérimentales dessinées dans la figure suivante :

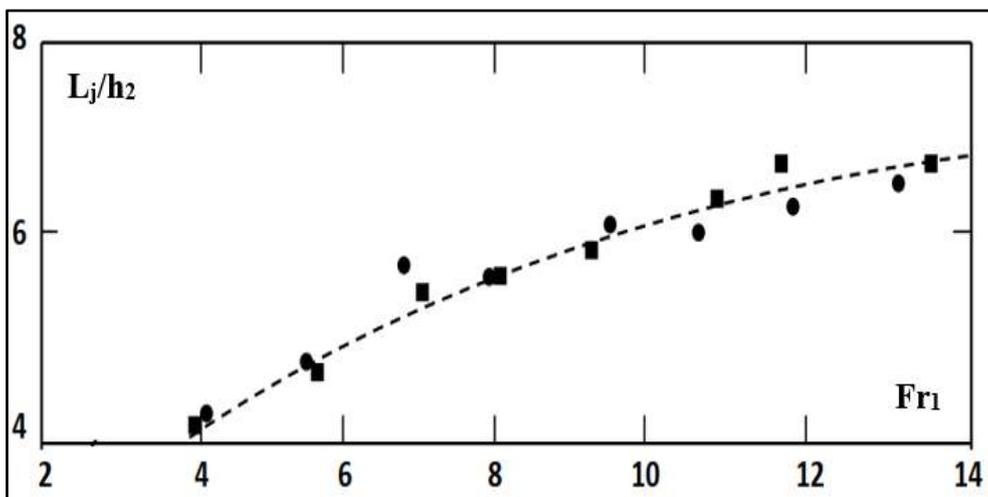


Figure 3.3 : Nombre de Froude amont du ressaut en fonction de la longueur du ressaut relative selon Hager et Wanoschek (1987).

Après l'analyse des résultats, Hager et Wanoschek (1987) donne la relation (3.6) pour évaluer la longueur du ressaut :

$$\text{Pour : } 0,4 < m \leq 1 ; \frac{L_j}{h_2} = 2,4 m^{0,5} Fr_1^{0,4}/m \quad (3.6)$$

III.3. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil

III.3.1. Approche de Debabeche et Achour (2001)

L'étude s'intéresse à la quantification des paramètres du ressaut hydraulique dans le canal triangulaire d'angle de l'ouverture égal 90° , et à sa variation sous l'effet d'un seuil par la voie de l'expérimentation.

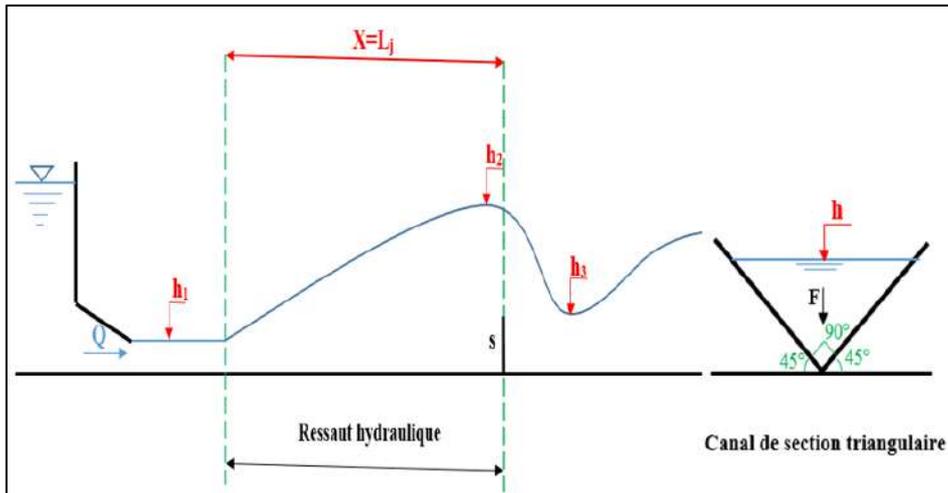


Figure 3. 4 : Dessin explicative d'approche de Debabeche et Achour (2001).

Le rapport des hauteurs conjuguées

Théoriquement la présence du seuil à paroi mince ne devrait avoir aucun effet sur la diminution de la hauteur d'aval du ressaut, donc on peut dire que le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique est la même pour un ressaut contrôlé. Cette particularité a été par ailleurs confirmée par les essais de Debabeche et Achour (2001) pour un nombre de Froude (Fr_1) inférieur 7,5.

La figure (3.5) présente pour les quatre configurations de ressaut (classique, contrôlé par seuil à paroi mince et épaisse, et ressaut forcé).

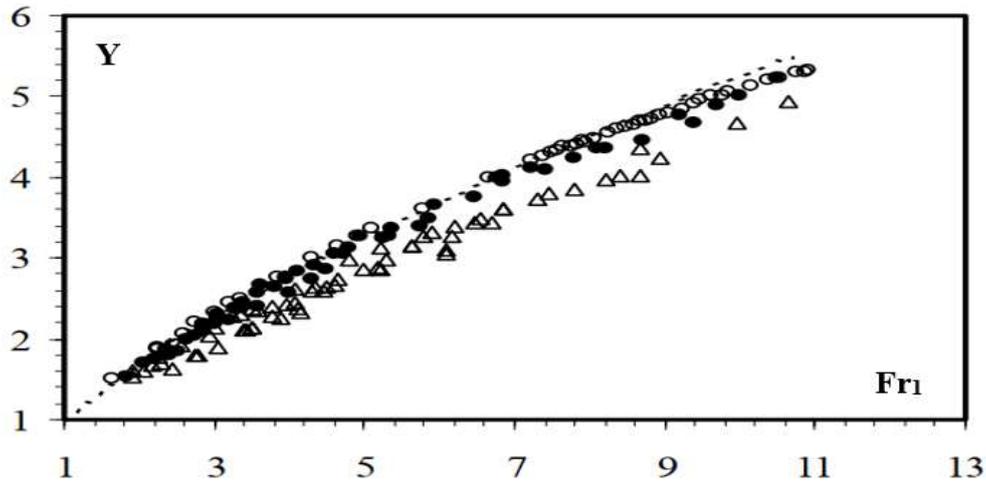


Figure 3.5 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le nombre du Froude. Points expérimentaux pour $m = 1$: (○) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince, (●) ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse, (Δ) : ressaut forcé par seuil à paroi mince et (...) ressaut classique.

Selon les auteurs, les points expérimentaux sont approchés par la courbe suivante :

$$Y = 1 + \alpha \cdot \ln [(Fr_1 + 4)/5] \quad (3.7)$$

$\alpha=3,96$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

La variation expérimentale du rapport (Y) des hauteurs conjuguées des ressauts en fonction de la hauteur relative (S) a été présentée aussi par les auteurs sur la figure (3.6) :

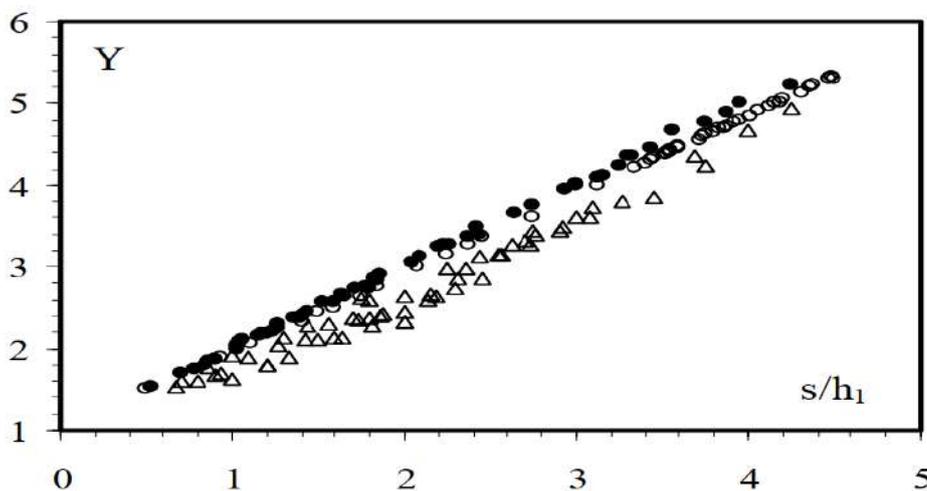


Figure 3.6 : Relation entre la hauteur relative du seuil et le nombre du Froude. Points expérimentaux pour $m = 1$: (○) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince, (●) ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse, (Δ) : ressaut forcé par seuil à paroi mince.

Les mesures ont permis d'aboutir à l'équation linéaire suivante qui donne le rapport (Y) en fonction de la hauteur relative (S) pour les trois cas :

$$Y = 1 + \beta S \quad (3.8)$$

$\beta=3,96$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

Hauteur relative du seuil

En peut exprimer la profondeur relative du seuil (S) en fonction de nombre de Froude amont du ressaut (Fr_1), si on a l'égalité l'équation (3.7) = l'équation (3.8) en trouve l'équation suivante :

$$S = \gamma \cdot \ln [(Fr_1 + 4)/5] \quad (3.9)$$

$\gamma=3,96$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

Longueur relative du bassin

Il existe une différence sur la longueur du bassin entre les trois configurations testées par les chercheurs, dans notre cas s'intéresse au ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince, ce type du ressaut caractéristique par un rouleau de surface, et par conséquence la longueur coïncide à la position x du seuil par rapport au début du ressaut.

La variation expérimentale de la longueur relative $X=x/h_1$ du bassin du ressaut contrôlé par seuil mince en fonction du nombre de Froude d'écoulement incident (Fr_1) est présentés à la figure (3.7) pour différentes configurations étudiées par les auteurs.

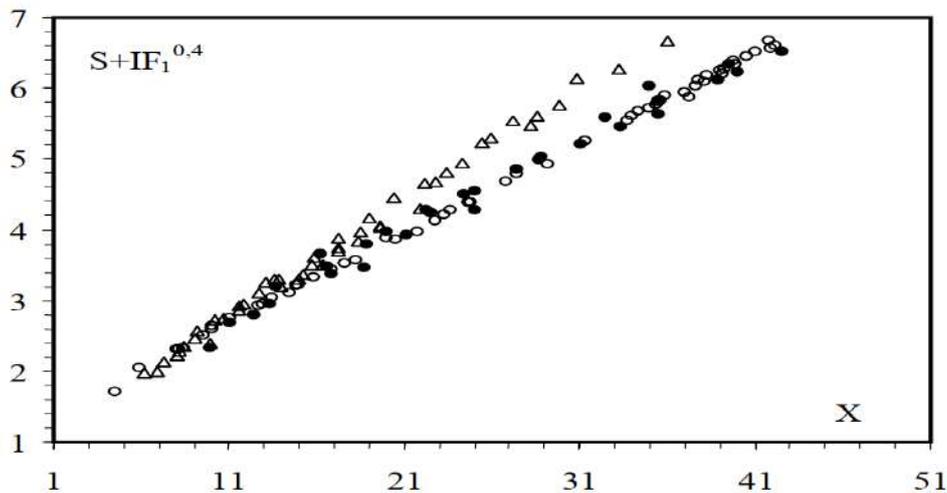


Figure 3.7 : Relation entre le nombre du Froude et la longueur du bassin.

L'ajustement des points expérimentales par la méthode des moindres carrées a permis de déterminer la longueur de bassin par l'application de formule de type puissance suivante :

$$S + Fr_1^{0,4} = aX + b ; X \geq 4 \quad (3.10)$$

$a = 0,127$ et $b = 1,278$.

III.4. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil aux parois rugueuses

III.4.1. Approche de Kateb (2006)

Ce travail est d'étudier théoriquement et expérimentalement de l'effet de la rugosité des parois de canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° sur les paramètres du ressaut hydraulique.

III.4.1.1. Développement de l'approche théorique

L'analyse théorique du ressaut hydraulique produisant dans un canal triangulaire aux parois rugueuses permet de trouver une relation entre les paramètres du ressaut et la rugosité absolue.

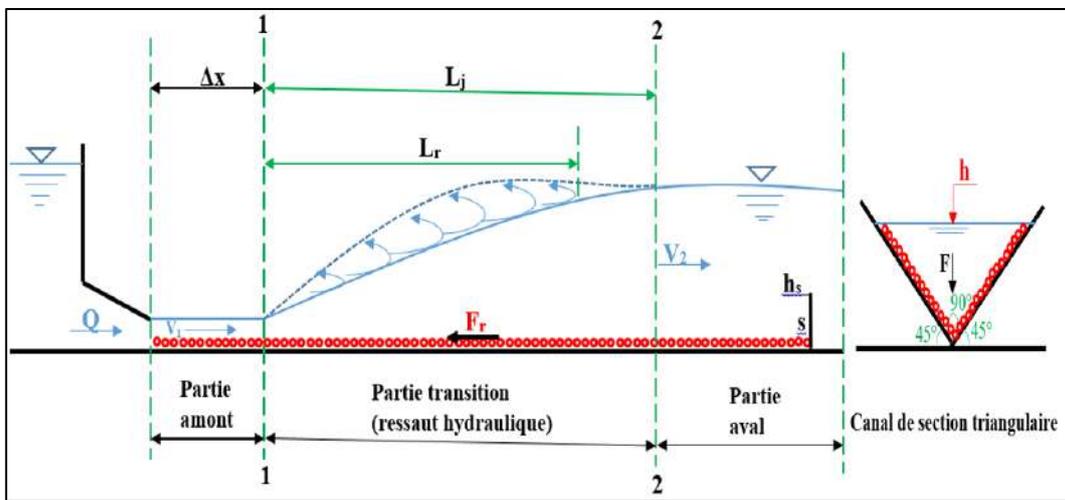


Figure 3. 8 : Dessiner explicative d'approche de Kateb (2006).

Les conditions d'application de loi de de la quantité de mouvement si la même les hypothèses mentionnées dans le chapitre I, mais en tenant compte de la force frottement (F_R) engendre à la contacte des molécules d'eau et les murs du canal due la présence de la rugosité, cette force est égale :

$$F_R = C\rho gL_j \left(\frac{v_1^2}{2g}\right) p \quad (3.11)$$

C : coefficient de résistance ;

p : périmètre mouillé du canal.

Après avoir remplacé les formules des éléments dans l'équation de la quantité de mouvement, on obtient :

$$P_1A_1 - P_2A_2 - CgL_j \left(\frac{v_1^2}{2g}\right) p = \rho QV_2 - \rho QV_1 \quad (3.12)$$

Kateb (2006) a été résolue l'équation (3.12) et définir la relation du (Y) en fonction de (Fr_1) et (C) :

$$Fr_1^2(1 - C_r) = \frac{2Y^2(1-Y^3)}{3(1-Y^2)} \quad (3.13)$$

$$C_r = \frac{L_j C Y^2}{h_1(Y^2-1)} \quad (3.14)$$

Lorsque (C_r) est égal à zéro, l'équation (3.13) revient à l'expression de Hager et Wanoschek (1987) pour un ressaut hydraulique classique.

III.4.1.2. L'essai expérimental

L'expérimentation a été effectuée dans large série de nombre de Froude ($4 < Fr_1 < 24$), et quatre rugosités absolues testées (ε (mm) = 4,53 ; 6,04 ; 7,11 ; 8,73), avec sept valeurs de la hauteur initiale (h_1 (mm) = 18, 25, 30, 34, 40, 44, et 51).

Le rapport des hauteurs conjuguées

La figure (3.9) présente pour les quatre rugosités absolues traitées ces résultats exprimant la variation du nombre de Froude d'écoulement incident (Fr_1) en fonction du rapport des hauteurs conjuguées (Y).

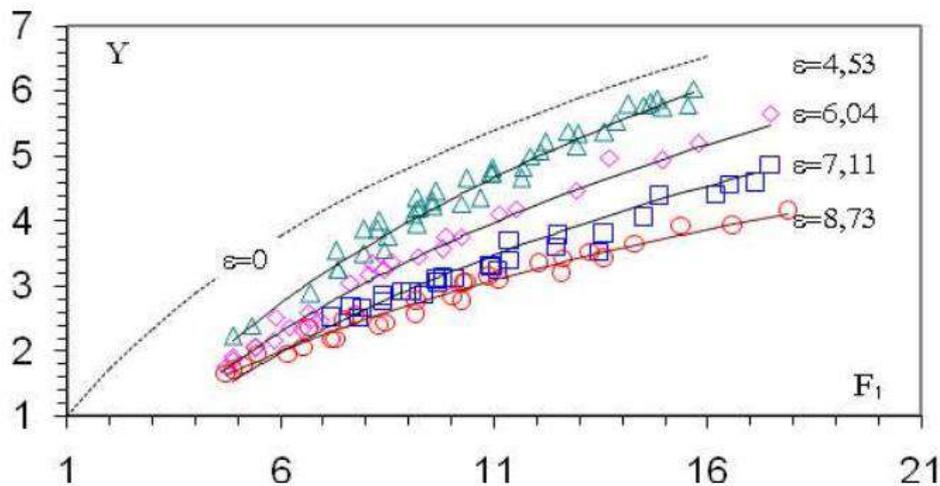


Figure 3.9 : Relation entre de paramètre des hauteurs conjuguées et le nombre du Froude. Pour quatre valeurs de la rugosité. (—) Courbes d'ajustement. (---) courbe selon Debabeche (2003)

Selon la figure ci-dessus, Kateb (2006) a été remarque pour une valeur du nombre de Froude constante, l'augmentation de la rugosité absolue provoque la diminution du rapport des hauteurs conjuguées (Y). Et aussi, les points expérimentaux du ressaut étudiant présentés à la figure (3.9) peuvent être approchés par l'équation de régression logarithmique suivante :

$$\text{Pour : } 4,53 \leq \varepsilon \leq 8,73 \text{ mm ; } Y = (7,14 - 0,5\varepsilon) \text{ Ln} (Fr_1-1) - 0,6 \quad (3.15)$$

Longueur du ressaut

Lors des essais du ressaut étudié par Kateb (2006), les longueurs du ressaut ont été relevées et sont présentées à la figure suivante :

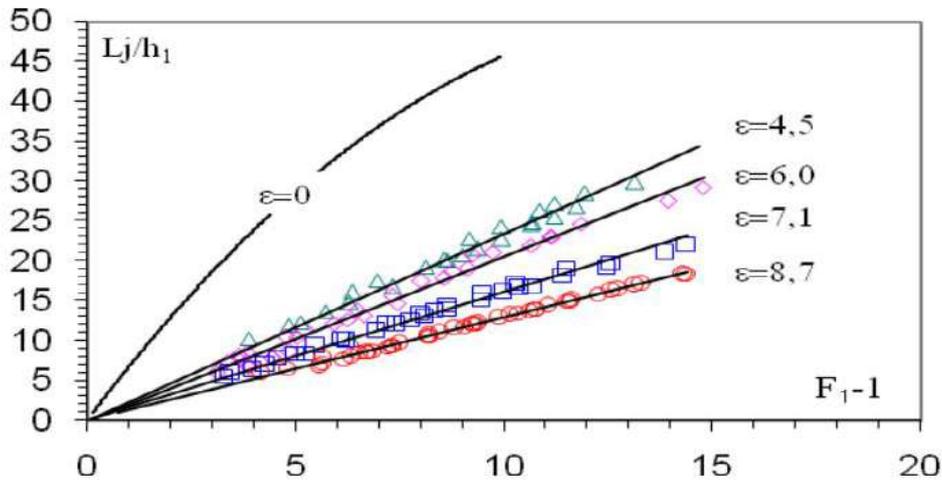


Figure 3. 10 : Relation entre le nombre de Froude et la longueur du ressaut. Pour quatre valeurs ε de rugosité absolue. (—) Courbes d'ajustement.

D'après la figure (3.10), pour le même de nombre Froude (Fr_1), on observe plus la rugosité absolue est augmenté plus la longueur de ressaut est réduite. Une expression linéaire a pu être trouvée par l'auteur et s'énonce comme suit :

$$\text{Pour : } 4,53 \leq \varepsilon \leq 8,73 \text{ mm ; } L_j/h_1 = (3,53 - 0,26\varepsilon) (Fr_1-1) \quad (3.16)$$

III.5. Conclusion

Les résultats obtenus par la présentation de la différente configuration du ressaut hydraulique créé dans canal triangulaire ont montré :

Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique déterminé par Hager et Wanoschek (1987) à l'aide de l'exploitation de la loi de quantité de mouvement ; et ainsi les auteurs déterminent par voie expérimentales les formules de définir les longueurs caractéristiques du ressaut ;

L'existence du seuil mince de contrôle de ressaut n'a pas d'influence réductrice significative sur le rapport des hauteurs conjuguées ;

L'expression de Debabeche et Achour (2001) permet de reconnaître les équations empiriques des paramètres adimensionnels suivants : longueur relative du bassin, hauteur relative du seuil et rapport des hauteurs conjuguées ;

Kateb (2006) a été validé pour le même de nombre Froude de l'écoulement incident, l'augmentation de la rugosité joué un rôle important sur la réduction du rapport des hauteurs conjuguées et la longueur de ressaut.



Chapitre IV :
Ressaut
hydraulique en
canal profilé en U
à fond rugueux

Chapitre IV : Ressaut hydraulique en canal profilé en U à fond rugueux

IV.1. Introduction

Le canal profilé en U correspondant une forme parabolique, il est composé à la base d'un demi-cercle, surmonté latéralement de deux parois verticales. Par ailleurs, la bibliographie montre que les travaux concernant ce type de configuration n'ont été entrepris.

Aucune étude n'est également à signaler concernant le ressaut hydraulique en canal profilé en U à fond rugueux, à l'exception de celle de Ghamri (2012).

IV.2. Analyse théorique

La figure (4.1) représente de manière schématique un ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince et évoluant dans canal profilé en U à fond rugueux :

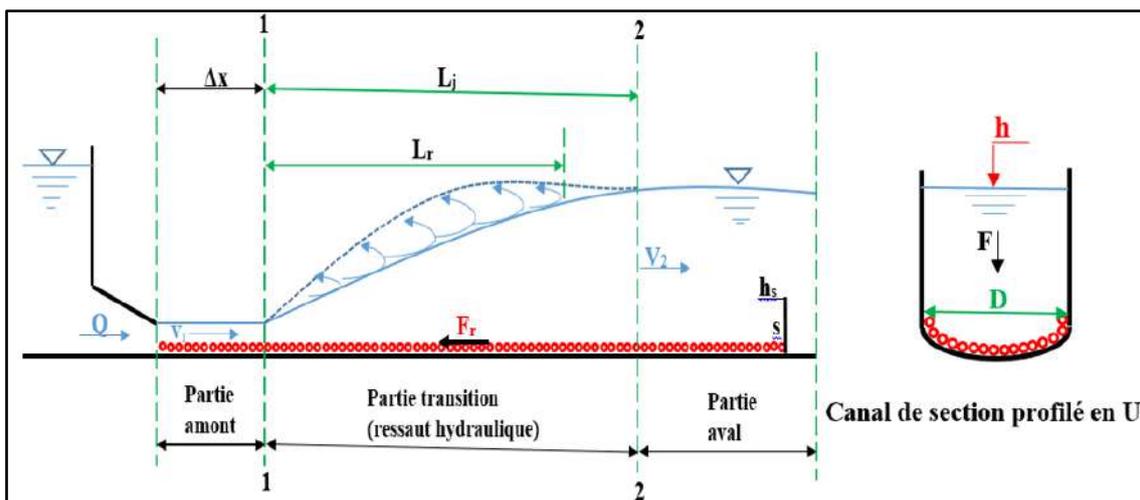


Figure 4. 1 : Dessiner explicative d'approche de Ghamri (2012).

L'application du théorème de la quantité de mouvement dans la direction longitudinale, entre les sections amont (1-1) et aval (2-2) du ressaut, permet géométriquement d'écrire :

$$\bar{h}_1 A_1 + \frac{Q^2}{g A_1} = \bar{h}_2 A_2 + \frac{Q^2}{g A_2} + F_R / \rho g \quad (4.1)$$

Avec :

$$\bar{h}_1 = (D^3 / 12 A_1) \sin^3 \theta_1 - (D / 2) \cos \theta_1 ;$$

$$\bar{h}_2 = (D / 2) [(y_2 - 1/2)(y_2 + 1/2 - 2C_o) + 1/6] / (y_2 - C_o)$$

Chapitre IV : Ressaut hydraulique en canal profilé en U à fond rugueux

L'adaptation de la relation (4.1) par Ghamri (2012) a permis d'écrire la relation (4.2) théorique du ressaut hydraulique produisant dans canal profilé en U aux parois rugueuses :

$$Fr_1^2(1 - C_R) = \frac{8\sin\theta_1}{(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1)^2} \frac{\left(\frac{\pi}{8} + y_2 + \frac{1}{2}\right)}{\left[\left(\frac{\pi}{8} + y_2 + \frac{1}{2}\right) - \frac{1}{4}(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1)\right]} \left[\left[\left(y_2 - \frac{1}{2}\right) \left(y_2 + \frac{1}{2} - 2C_0\right) + \frac{1}{6} \right] - \frac{\sin^3\theta_1}{6} + \cos\theta_1 \frac{1}{4}(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1) \right] \quad (4.2)$$

IV.3. Description des essais

Ces essais portent sur le ressaut hydraulique produisant dans le canal horizontal profilé en U à fond demi-circulaire rugueux. En effet, il teste quatre rugosités équivalentes qui sont ε (mm) : 4,30 ; 5,63 ; 7,14 et 9,11.

Ils se déroulent de la manière suivante : une hauteur initiale (h_1) donné, le ressaut est provoqué par exhaussement du niveau aval à l'aide du seuil et l'accroissement du débit entraîne, cela va nous permettre de visualiser de façon adéquate le ressaut hydraulique.

Les grandeurs mesurées à chaque série couple de valeur (Q , s) sont :

- La longueur ressaut du L_j ;
- La longueur du rouleau L_r ;
- La hauteur à l'aval du ressaut h_2 .

Les paramètres calculent à partir ces mesures sont :

- ❖ Le nombre de Froude d'écoulement incident Fr_1 ;
- ❖ La hauteur relative amont ($y_1 = h_1/D$) et aval ($y_2 = h_2/D$) ;
- ❖ Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y ;
- ❖ La longueur relative du ressaut L_j/h_1 et L_j/h_2 ;
- ❖ La hauteur relative du seuil $S = s/h_1$;
- ❖ La rugosité relative ε/D .

Quarantaine de points de mesures expérimentales ont été réalisés, touchent une marge des nombres de Froude de l'amont du ressaut variant entre 2 à 20, pour treize seuils ont été testés avec leurs hauteurs change de 3,2 à 13,5 cm.

IV.4. Résultats expérimentaux

IV.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude

Selon Ghamri (2012), la figure (4.2) présente la variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut (Y) en fonction du nombre de Froude d'écoulement à l'amont du ressaut (Fr_1), pour 04 valeurs de la rugosité absolue (ϵ) :

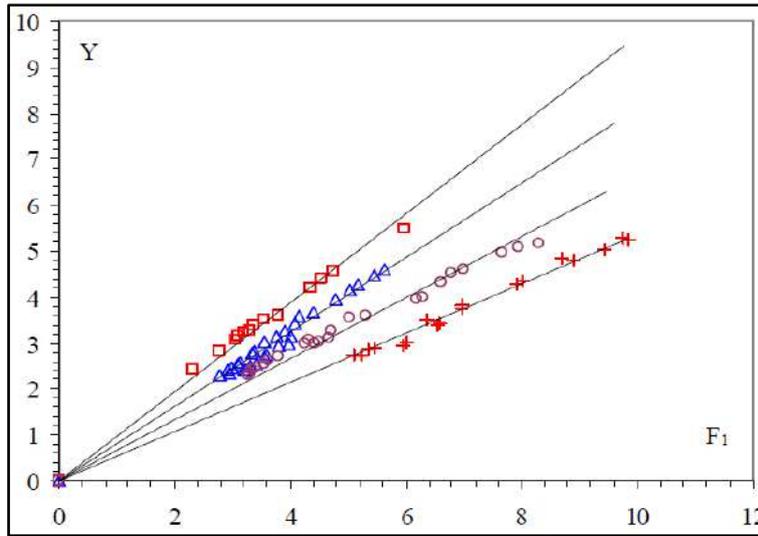


Figure 4. 2 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le nombre du Froude. Pour les quatre valeurs de ϵ : (\square) 4,30mm ; (Δ) 5,63mm ; (\circ) 7,14mm et (\times) 9,11mm.

Les droits en noir représentent les courbes d'ajustements.

L'interprétation des résultats présentés dans la figure (4.2) permet de dire, pour une valeur du nombre de Froude (Fr_1) constante l'augmentation de la rugosité absolue (ϵ) entraîne la diminution du rapport des hauteurs conjuguées (Y).

Une loi de type linéaire a été découverte après l'ajustement des points par la méthode des moindres carrés, elle exprime la variation du rapport des hauteurs conjuguées (Y) en fonction de la rugosité relative (ϵ/D) et du nombre de Froude d'écoulement incident (Fr_1) :

$$Y = \left(-22,31 \frac{\epsilon}{D} + 1,34\right) Fr_1 \tag{4.3}$$

Pour : $0,0175 \leq \epsilon/D \leq 0,0371$.

IV.4.2. Longueur relative du ressaut en fonction de nombre du Froude

La seconde action a été étudié par Ghamri (2012) est l'influence de la rugosité relative (ϵ/D) sur la longueur relative du ressaut (L_j/h_1) avec la présence du seuil, comme indique dans la figure suivante :

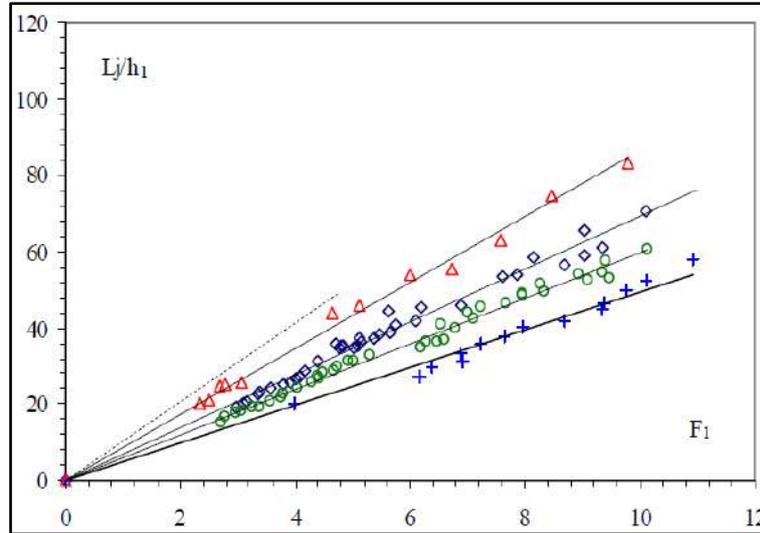


Figure 4. 3 : Relation entre le nombre du Froude et la longueur du ressaut. Pour quatre valeurs de la rugosité (ϵ) : (Δ) 4,30mm ; (\diamond) 5,63mm ; (\circ) 7,14mm et (\times) 9,11mm.

Les lignes en noir représentent les courbes d'ajustements.

D'après le graphique ci-dessus, Ghamri (2012) remarque pour un nombre du Froude (Fr_1) fixe l'augmentation progressive de la rugosité relative (ϵ/D) avec la diminution de la longueur relative du ressaut (L_j/h_1).

L'ajustement statistique des résultats expérimentaux par la méthode des moindres carrés a été établie Ghamri (2012) et donne une relation de type puissance suivante :

$$\frac{L_j}{h_1} = 0,44\left(\frac{\epsilon}{D}\right)^{-0,73} Fr_1 \tag{4.4}$$

Pour : $0,0175 \leq \epsilon/D \leq 0,0371$.

IV.4.3. Longueur relative du rouleau du surface aval en fonction du nombre de Froude

En 2012, l'auteur Ghamri étudie la variation de la longueur relative du rouleau du surface (L_r/h_1) du ressaut en fonction du nombre de Froude incident (Fr_1) pour différentes rugosités testées, comme présenté dans la figure suivante :

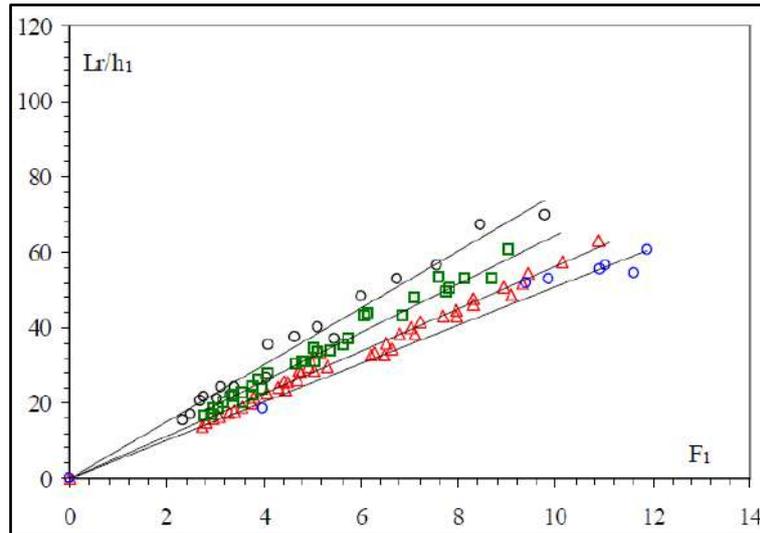


Figure 4.4 : Relation entre le nombre du Froude et la longueur relative de rouleau. Pour les différentes rugosités testées. ε (mm) : (o) 4,30mm (\square) 5,63 (Δ) 7,14 (\diamond) 9,11mm.

Il a été relevé que pour une valeur du nombre de Froude d'écoulement d'amont du ressaut (Fr_1) donné, l'augmentation la rugosité relative (ε/D) engendre la diminution de la longueur relative du rouleau de surface (L_j/h_1). L'analyse statistique des points de mesures expérimentales a exposé que, pour une rugosité absolue expérimentée, la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) varie en fonction au nombre de Froude (Fr_1) et la rugosité relative (ε/D) par l'équation de type puissance suivante :

$$\frac{L_j}{h_1} = 0,88\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{-0,53} Fr_1 \quad (4.5)$$

Pour : $0,0175 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$.

IV.4.4. Rendement du ressaut hydraulique

Dans ce cas, l'auteur définit l'équation du rendement comme suit :

$$\eta = \frac{h_1 - h_2 + \frac{D \cdot q_2}{2} \left[\frac{16}{(\theta_1 - \sin(\theta_1) \cos(\theta_1))^2} - \frac{1}{\left(\frac{\pi}{8} + y_2 - 1/2\right)^2} \right]}{h_1 + \left[\frac{8D \cdot q_2}{(\theta_1 - \sin(\theta_1) \cos(\theta_1))^2} \right]} \quad (4.6)$$

La figure (4.5) est présentée la variation du rendement du ressaut (η) en fonction du nombre de Froude incident (Fr_1) :

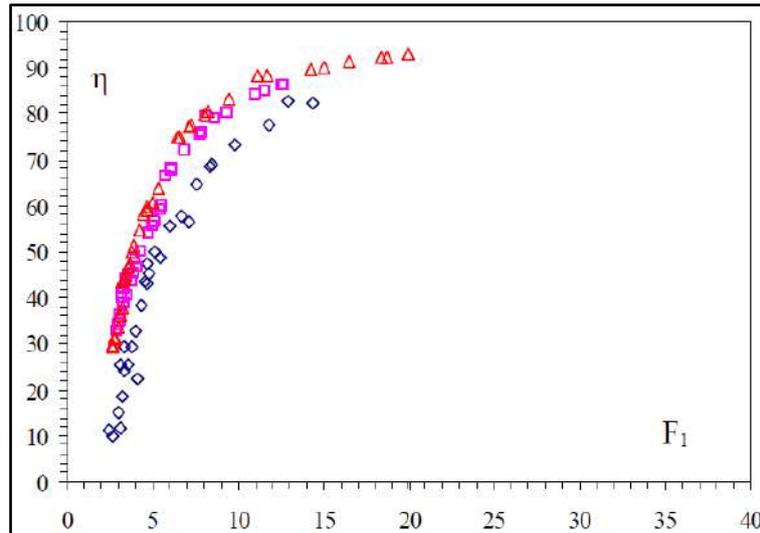


Figure 4. 5 : Relation entre le rendement du ressaut et le nombre du Froude. Pour les rugosités relatives suivantes (ϵ/D) : (\diamond) 0,0175 ; (\square) 0,0229 et (Δ) 0,0291.

Ghamri (2012) observe de cette figure, pour $0,0175 \leq \epsilon/D \leq 0,0291$ et $2 \leq Fr_1 \leq 20$, que l'augmentation du nombre du Froude incident entraîne l'augmentation du rendement, par ailleurs pour le même nombre du Froude incident, le rendement augmente avec l'augmentation de la rugosité, ainsi la dissipation de l'énergie est importante avec l'augmentation de la rugosité équivalente.

IV.5. Conclusion

Les conclusions ressortent à partir de l'étude de Ghamri (2012) sont :

- ✚ Pour une même valeur du nombre de Froude, ou bien aussi pour une hauteur du seuil fixe, la relation entre la rugosité relative (ϵ/D) et le rapport des hauteurs conjuguées (Y) est une relation inverse.
- ✚ Une formule empirique de type linéaire a été établie pour la détermination du rapport des hauteurs conjuguées (Y).
- ✚ La longueur de ressaut est réduite avec la présence de la rugosité absolue.
- ✚ En peut déterminer la valeur de la longueur du rouleau par l'application de l'équation de type puissance identifié ci-dessus.

On constate également, pour une valeur du nombre de Froude d'écoulement incident identique, lorsque la valeur de la rugosité absolue augmente les caractéristiques du ressaut diminuent.



Conclusion
à la première
partie

Conclusion à la première partie

Quel que soit la forme de canal considéré, et suite aux résultats théoriques et expérimentaux a été présentés, plusieurs points importants sont à retenir :

- ❖ Pour un ressaut hydraulique classique :
 - ✚ En règle générale, l'application de l'équation de la quantité de mouvement a permis de déterminer le rapport des hauteurs conjuguées (Y) du ressaut hydraulique par l'analyse théorique. En effet, les chercheurs ont été publiés les équations dans ce domaine sont : Belanger (1841) pour le canal rectangulaire, Hager et Wanoschek (1987) pour le canal triangulaire et Ghamir (2012) le canal profilé en U ;
 - ✚ A travers les études de Hager et Wanoschek (1987) et Hager et al (1990), sur ce type du ressaut, les auteurs ont montré que l'évaluation des paramètres géométriques du ressaut, telle que la longueur du ressaut (L_j) et la longueur (L_r) du rouleau ne s'effectuent que par voie expérimentale.
- ❖ Pour un ressaut hydraulique contrôlé par seuil à parois mince :
 - ✚ Le traitement des données expérimentales montre que l'emplacement du seuil à l'aval du ressaut n'a pas d'effet réducteur significatif sur le rapport des hauteurs conjuguées ;
 - ✚ Les éléments géométriques de ce type du ressaut hydraulique, ont été identifiés expérimentalement par Forster et Skrinde (1950), Debabeche et Achour (2001) et Achour, Sedira et Debabeche (2002) ; ces derniers ont évalué la hauteur relative (s/h_1) et la position relative (x/h_1).

Pour une valeur du nombre de Froude d'écoulement incident (Fr_1) donnée, les travaux de Rajaratnam (1968), Kateb (2006) et Ghamir (2012) ont été montré, que la présence de surface rugueuse rend les caractéristiques géométriques du ressaut hydraulique plus efficace et également plus court.



*Deuxième
partie
Etude
expérimentale*

Introduction à la deuxième partie

Par ailleurs, la bibliographie montre que les travaux concernant le contrôle du ressaut par seuil à parois mince dans un canal rectangulaire aux parois rugueuses n'ont été entrepris.

Nous nous proposons pour notre contribution d'étudier de l'effet de la rugosité des parois de canal rectangulaire sur les paramètres du ressaut hydraulique, c'est ce qu'on a développé dans la deuxième partie de ce mémoire.

Cette partie contient deux chapitres. Le première chapitre présente la proposition d'un protocole expérimentale servant de guide à l'avenir pour la poursuite de la présente étude par des essais sur modèle réduit au laboratoire.

L'analysé, l'interprétation et discussion des résultats des grandeurs mesurées lors des essais pour le ressaut hydraulique étudié sont présentés dans le deuxième chapitre.



Chapitre I :
Méthodes
et
matériels

Chapitre I : Méthodes et matériels

I.1. Introduction

A ce stade de l'étude, des mesures sur modèle réduit au laboratoire sont indispensables afin d'évaluer d'une part le coefficient de résistance (C_R) trouvé dans l'expression théorique, et d'autre part de déterminer les caractéristiques du ressaut.

Ce chapitre, a pour objet de donner une brève description du dispositif expérimental utilisé dans cette partie ainsi que de définir le protocole expérimental adopté et ce dans l'optique d'obtenir des résultats concrets et exploitables.

I.2. Position du problème

Les ressauts se produisent lors du passage du régime torrentiel au régime fluvial. Ils se trouvent dans la nature, ou bien recréés dans un laboratoire.

Ils sont dits classiques lorsqu'ils se forment dans un canal rectangulaire au fond lisse à pente nulle. Ils sont dits contrôlés lorsqu'ils se forment sur un seuil.

Le type de ressaut qui sera étudié dans ce document, il se configure dans un canal rectangulaire aux parois rugueuses et contrôlé par un seuil.

La recherche des paramètres d'un ressaut a fait l'objet de plusieurs études mais en vain, il n'existe hélas aucune formule empirique permettant la détermination des paramètres exacts du ressaut.

L'intérêt de notre travail est de trouver une relation empirique indiquant l'effet de la rugosité sur les caractéristiques du ressaut hydraulique.

I.3. Dispositif expérimental

Le modèle de canal de test qui a été pris en compte pour mettre en œuvre notre expérience est dessiné dans la figure (1.1) ci-dessous, il est de marque NEYRTEC. Il est utilisé pour des essais d'envergure sur le thème des écoulements dans des canaux.

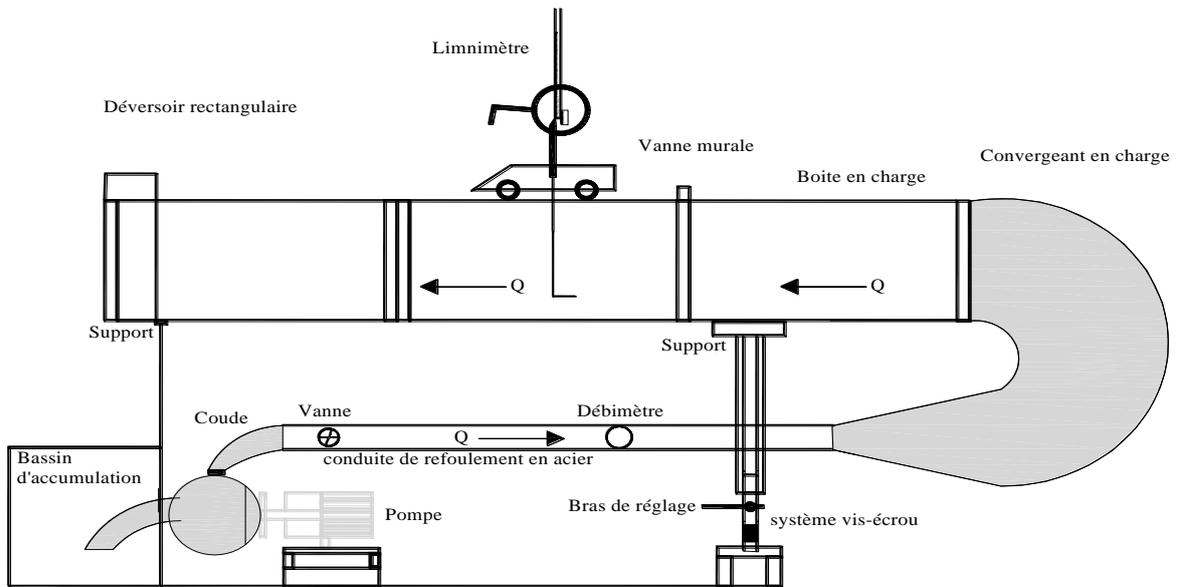


Figure 1.1 : Modèle du canal utilisé.

Ce dernier possède une section de forme rectangulaire, avec les dimensions suivantes : la longueur égale 10 m, la largeur égale 25 cm et la profondeur égale 50 cm. Le type de matériau de fabrication des murs sont en verre dur.



Photo 1. 1 : Canal d'essai.

Le bassin d'alimentation et d'accumulation sous forme cubique, avec une capacité d'environ 5000 litre photo (1.2).



Photo 1. 2 : Bassin d'alimentation et d'accumulation.

L'eau est puisée le bassin d'alimentation à l'aide d'une pompe axiale photo (1.3) donnant un débit maximal de 44 l/s.



Photo 1. 3 : Pompe d'essai du dispositif.

Le rôle de la vanne de réglage située ensuite de la pompe est de contrôler le débit s'évacue dans le canal pour créer le ressaut à chaque fois.



Photo 1. 4 : Vanne de réglage.

Après la vanne de réglage se trouve le compteur d'eau dans le but de mesurer les volumes transportés dans une canalisation d'un diamètre de 150 mm.



Photo 1. 5 : Compteur d'eau.

L'objectif du convergent est de garantir la rapidité de l'écoulement incident dans le canal. Il se compose d'un boîtier de chargement, et localisé avant la vanne murale.



Photo 1. 6 : Convergeant.

L'entrée de canal se trouve la vanne murale, qui permet de régler et fixer la profondeur de l'eau conjuguée (h_1).



Photo 1. 7 : Vanne murale.

Pour contrôler et stabiliser le ressaut analysé, nous avons utilisé un seuil à différentes profondeurs varient entre 3 à 15 cm.

L'emplacement du seuil se trouve dans la dernière partie du canal, et sa profondeur toujours supérieure à la profondeur de l'eau conjuguée (h_1), a fin de création du ressaut dans de bon condition.

Il est fabriqué par des matériaux résistants à la corrosion, leur fixation est effectuée à l'intérieur de canal.

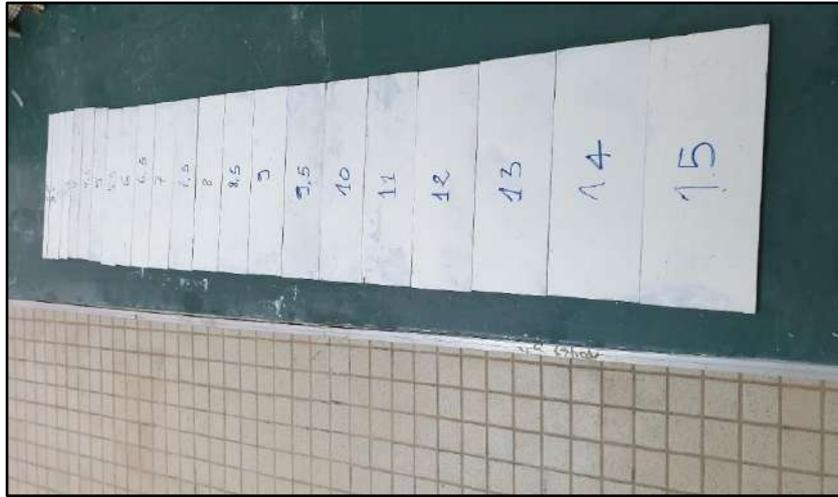


Photo 1. 8 : Seuils minces testés.

A l'extrémité du canal se trouve un clapet à mouvement vertical, qui assure le retour d'écoulement vers le bassin d'accumulateur.



Photo 1. 9 : Vanne à déplacement verticale.

I.4. Les mesures à effectuer

Les principaux paramètres du ressaut à mesurer sont-ils :

I.4.1. Mesure des profondeurs

Les profondeurs d'eau à mesurer dans le canal sont (h_1) et (h_2) et la hauteur de la lame d'eau à travers les deux parois du déversoir rectangulaire. Ces mesures ont été évaluées par une limnimétrie (Figure 1.2 et photo 1.10).

La limnimétrie est formée d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnométrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau (Figure 1.2 et photo 1.10).

La lecture sur la limnimétrie 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 dixième en face de la division qui coïncide ou qui est la plus rapprochée d'une division de la règle.

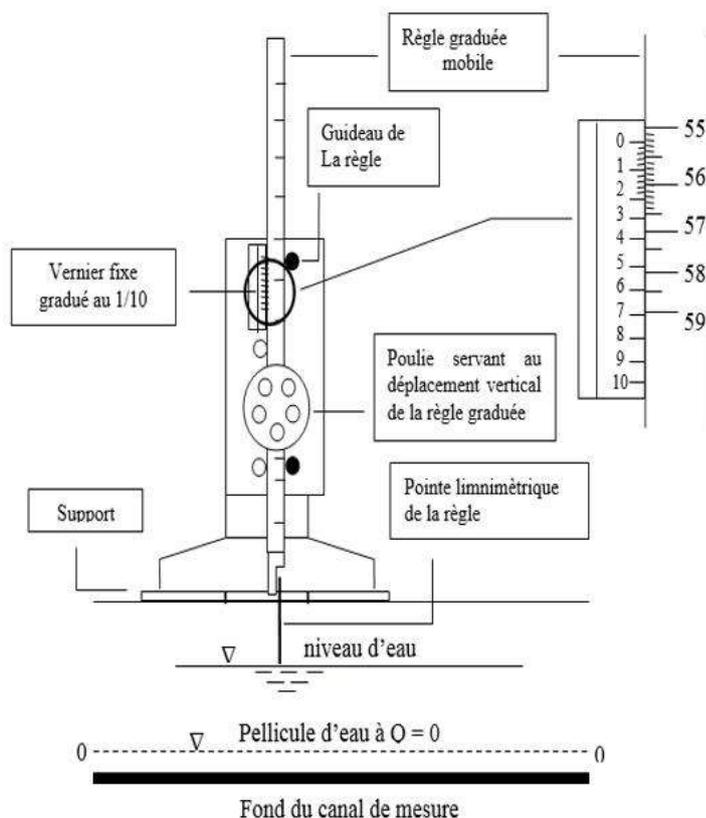


Figure 1. 2 : Dessiner explicative de la limnimétrie.

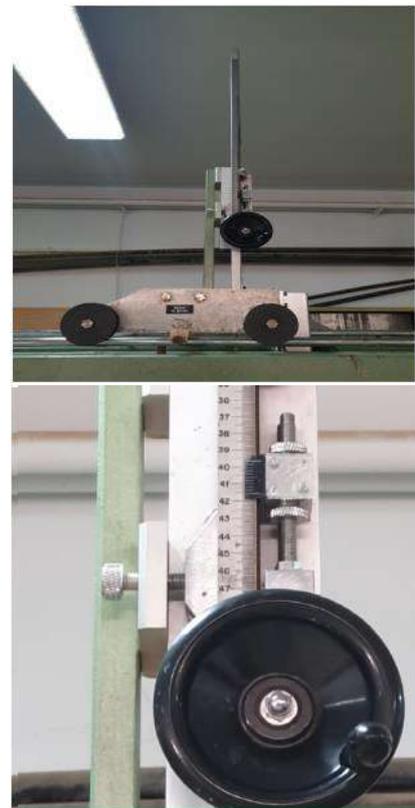


Photo 1. 10 : Limnimétrie.

I.4.2. Mesure des longueurs

Les longueurs qui ont une grande efficacité dans la détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique sont la longueur du ressaut et la longueur du rouleau ainsi que la position du seuil, toutes ces mesures sont prises par un ruban gradué.

I.4.3. Mesure du débit

Le déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale inséré à l'aval du canal (Photo 1.11), il a été réalisé et testé par Hachemi Rachedi (2006). En effet, lorsque nous connaissons la relation liant le débit de ce déversoir et le niveau d'eau en amont et il est possible de calculer le débit en observant la hauteur d'eau. Les formules des déversoirs peuvent s'écrire sous la forme :

$$Q = 0,3794 B \sqrt{2g} \beta (1 + 0,16496 \beta^{2,0716})^{3/2} h^{3/2} \quad (1.1)$$

$$\text{Avec : } \beta = \frac{b}{B}$$

Q : Le débit de l'écoulement en (m³/s) ;

B : la largeur du canal en (m) ;

b : La largeur de l'échancrure (distance entre les deux parois du déversoir) en (m) ;

g : L'accélération de la pesanteur en (m²/s) ;

β : Rapport de forme ;

h : La hauteur de la lame d'eau ;

La condition d'application de cette relation est : $\beta < 0,45$.



Photo 1. 11 : Déversoir rectangulaire.

Chapitre I : Méthodes et matériels

La méthode d'étalonnage des appareils de mesure de débit par comparaison directe consiste à comparer les mesures réalisées par le déversoir rectangulaire du Hachemi Rachedi (2006) et par le compteur d'eau pour un même essai.

Tableau 1. 1 : Regroupe les mesures effectuées sur le déversoir et le compteur d'eau.

Mesures effectuées par le compteur d'eau			Mesures effectuées par le déversoir		ΔQ	Mesures effectuées par le compteur d'eau			Mesures effectuées par le déversoir		ΔQ
Volume compte (m ³)	Temps (s)	Q _c compteur d'eau (m ³ /s)	h (m)	Q _d déversoir (m ³ /s)		Volume compte (m ³)	Temps (s)	Q _c compteur d'eau (m ³ /s)	h (m)	Q _d déversoir (m ³ /s)	
0,1	7,12	0,01404	0,164	0,01283	0,73710	0,1	2,74	0,036	0,312	0,03368	0,90201
0,1	6,58	0,01519	0,178	0,01451	0,38384	0,1	2,62	0,038	0,32	0,03498	0,99441
0,1	5,67	0,01763	0,193	0,01638	0,64743	0,1	2,45	0,041	0,33	0,03663	1,26600
0,1	5,33	0,01876	0,197	0,01689	0,94544	0,1	2,3	0,043	0,335	0,03947	1,19519
0,1	4,88	0,02049	0,208	0,01833	1,03731	0,1	11,62	0,009	0,125	0,00854	0,05151
0,1	4,39	0,02277	0,215	0,01926	1,63329	0,1	9,89	0,01	0,134	0,00948	0,47080
0,1	4,21	0,02375	0,231	0,02145	0,99358	0,1	8,68	0,012	0,147	0,01089	0,42711
0,1	3,96	0,02525	0,24	0,02272	1,05357	0,1	8,09	0,012	0,156	0,0119	0,29008
0,1	3,89	0,0257	0,248	0,02386	0,74087	0,1	7,09	0,014	0,165	0,01295	0,69739
0,1	3,56	0,02808	0,255	0,02488	1,25593	0,1	6,5	0,015	0,176	0,01427	0,63308
0,1	3,4	0,02941	0,265	0,02636	1,14954	0,1	6,01	0,017	0,19	0,016	0,33284
0,1	3,32	0,03012	0,272	0,02741	0,99392	0,1	5,79	0,017	0,199	0,01715	0,05726
0,1	3,17	0,03154	0,28	0,02863	1,03939	0,1	5,21	0,019	0,21	0,01859	0,28313
0,1	3,07	0,03257	0,294	0,0308	0,59985	0,1	4,83	0,021	0,218	0,01967	0,47329
0,1	2,79	0,03584	0,305	0,03255	1,07782	0,1	4,13	0,024	0,25	0,02415	0,02167
0,1	5,27	0,01897	0,2	0,01728	0,84432	0,1	3,84	0,026	0,258	0,02532	0,27671
0,1	4,86	0,02057	0,214	0,01913	0,67426	0,1	3,69	0,027	0,265	0,02636	0,27727
0,1	4,54	0,02202	0,223	0,02035	0,75050	0,1	7,35	0,014	0,162	0,0126	0,61941
0,1	4,36	0,02293	0,236	0,02215	0,32947	0,1	6,53	0,015	0,173	0,0139	0,81321
0,1	3,84	0,02604	0,245	0,02343	1,06282	0,1	5,89	0,017	0,186	0,0155	0,79257
0,1	3,67	0,02724	0,26	0,02562	0,62505	0,1	5,35	0,019	0,2	0,01728	0,70244
0,1	3,5	0,02857	0,271	0,02726	0,48172	0,1	4,8	0,021	0,219	0,0198	0,46834
0,1	3,2	0,03125	0,28	0,02863	0,93377	0,1	4,35	0,023	0,232	0,02159	0,59967
0,1	2,98	0,03355	0,289	0,03002	1,22142	0,1	3,85	0,026	0,243	0,02315	1,16159
0,1	2,91	0,03436	0,3	0,03175	0,86886	0,1	2,9	0,034	0,303	0,03223	0,74175

La figure suivante représente la variation de débit mesuré par le déversoir (Q_d) et par le compteur d'eau (Q_c) :

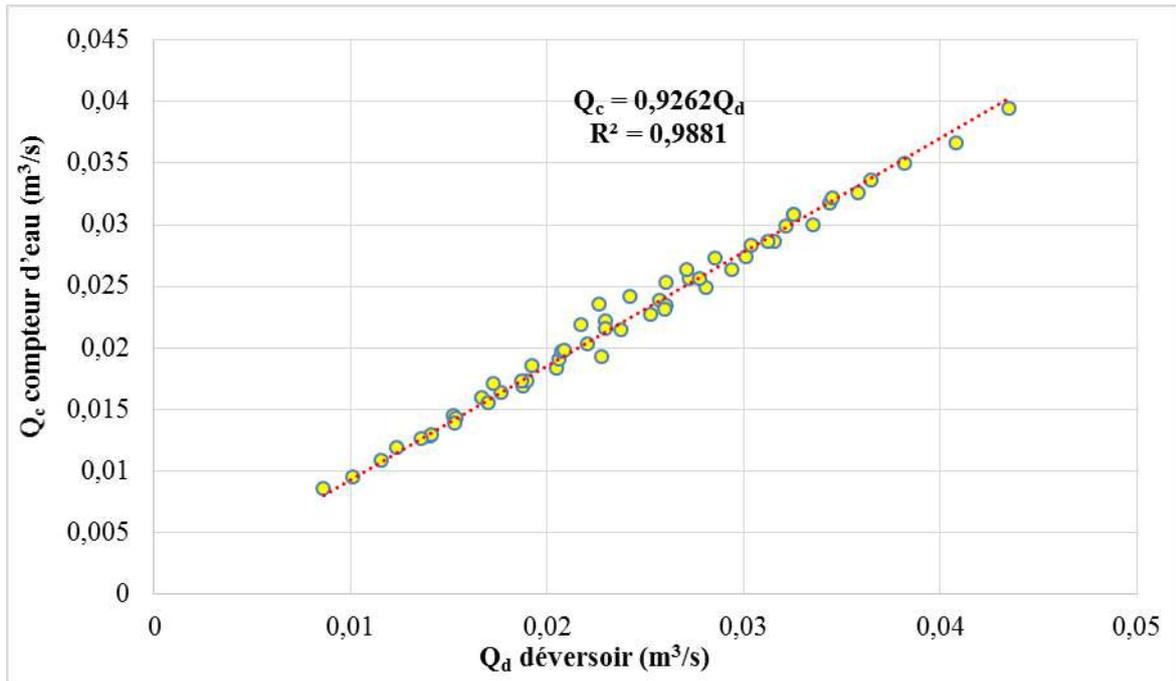


Figure 1. 3 : Variation de débit mesuré par le déversoir (Q_d) et par le compteur d'eau (Q_c).

Salon le figure, on remarque que la courbe d'ajustement obtenue est la bissectrice de l'angle formé par les axes de référence, ce qui permet de dire que les points sont ajustés avec une bonne corrélation, et par conséquent les appareils sont rigoureusement exacts.

I.5. Mode de préparation de la rugosité

Pour attendre des bons résultats expérimentaux, nous avons utilisé des boules puéricultures pour construire une surface rugueuse, parce que-ils on a des formes homogènes et uniformes. En effet, dans notre expression exploite quatre boules de différents diamètres comme indique dans la photo suivante :

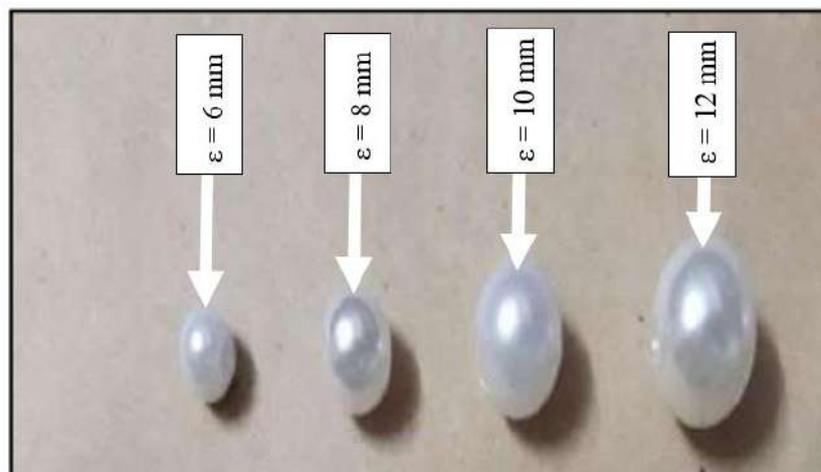


Photo 1. 12 : des boules utilisant.

Chapitre I : Méthodes et matériels

Afin de bien maîtriser le changement des rugosités étudiées, nous allons fixer chaque boule sur un tapis en plastique souple à l'aide d'une colle, et ce selon la taille de canal à considérer.

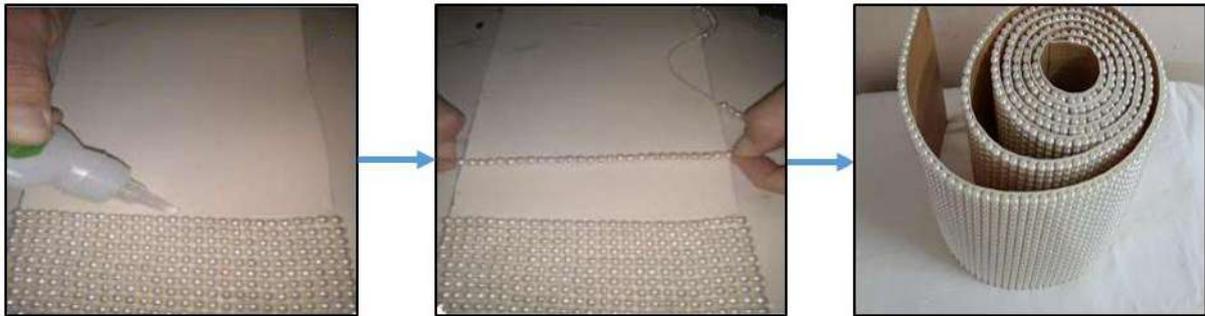


Photo 1. 13 : Constriction des tapis rugueux.

Pour obtenir un canal rugueux, nous allons clouer ces tapis sur des parois, comme indiqué dans la photo suivante :

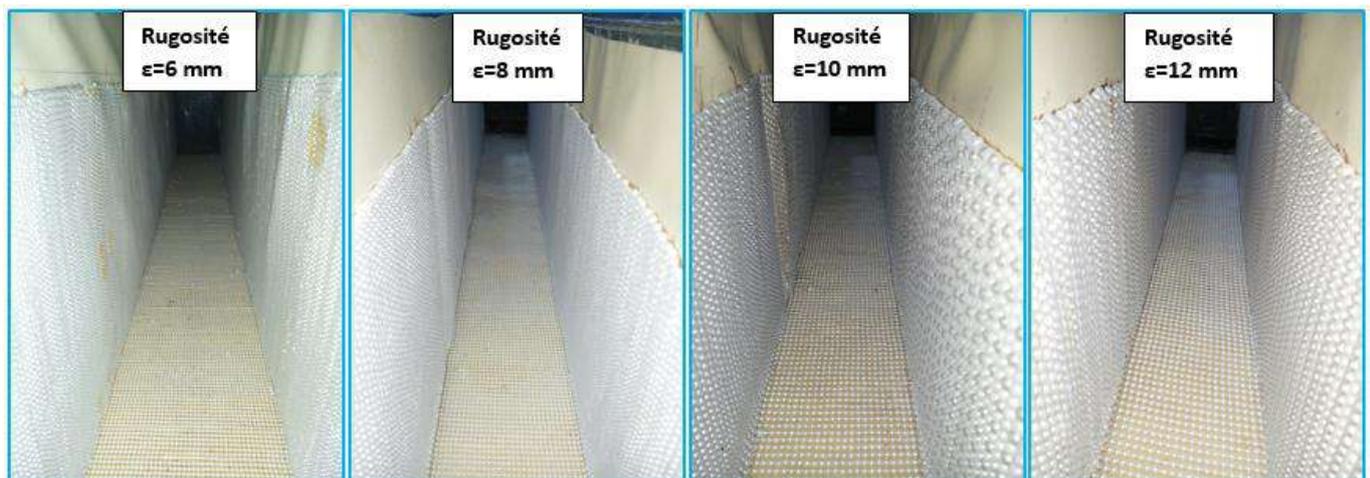


Photo 1. 14 : Canal aux parois rugueuses.

I.6. Procédure expérimentale

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire aux parois rugueuses. Quatre valeurs de la rugosité absolue ont été testées : ϵ (mm) = 6, 8, 10 et 12. L'expérimentation a été menée sous quatre hauteurs initiales de l'écoulement : h_1 (mm) = 20, 30, 40 et 50. Une large gamme du nombre de Froude incident a été ainsi obtenue, correspondant à $2 < Fr_1 < 16$.



Photo 1. 15 : Création du ressaut hydraulique aux parois rugueuses.

Pour une hauteur (s) de seuil placé à l'extrémité aval du canal et pour une hauteur (h_1) de l'écoulement incident, l'augmentation du débit volume (Q) provoque l'apparition d'un ressaut. Le couple (Q, h_1) permet en outre le calcul du nombre de Froude (Fr_1) de l'écoulement incident. L'accroissement de (Fr_1) entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation de sa longueur (L_j). Ainsi, à chaque valeur du nombre de Froude (Fr_1) correspond une valeur de la longueur (L_j) de ressaut ainsi qu'une valeur de la hauteur s du seuil. Un échantillon constitué plusieurs points de mesures expérimentales, pour chacune des valeurs de la rugosité absolue testées, a permis ainsi d'aboutir à des résultats significatifs.

Les caractéristiques hydrauliques et géométriques qui intéressent la présente étude expérimentale sont : le débit volume (Q), la hauteur (h_1) de l'écoulement incident, la hauteur finale (h_2) du ressaut, la longueur (L_j) de celui-ci et la rugosité absolue (ϵ) des parois du canal. En outre, l'attention est portée sur l'évolution des paramètres adimensionnels suivants :

- ❖ Le nombre de Froude (Fr_1) ;
- ❖ La longueur relative (L_j/h_1) du ressaut ;
- ❖ Le rapport ($Y = h_2/h_1$) des hauteurs conjuguées du ressaut.

I.7. Mode expérimental

Le mode opératoire va s'effectuer de la manière suivante :

Chapitre I : Méthodes et matériels

1. Vérifier l'appareillage et nettoyer le canal ;
2. Fixer la rugosité sur les parois du canal ;
3. A l'aide de bras de réglage positionné le canal une pente nulle pour qu'il soit parfaitement horizontal ;
4. Mettre en place une vanne pour fixer la hauteur conjuguée amont (h_1) au pied du ressaut ;
5. Brancher le dispositif au système électrique ;
6. Mettre en marche la pompe qui aspirera l'eau du bassin d'alimentation pour la refouler dans le canal ;
7. Placer et fixer le seuil dans le canal pour éviter d'être emportés par le mouvement de la masse liquide ;
8. Faire varier le débit jusqu'à la création et stabilisation le ressaut ;
9. Pour chaque débit, mesurer à l'aide de l'appareil :
 - a. La longueur (L_j) du ressaut ;
 - b. La longueur (L_r) du rouleau ;
 - c. La hauteur conjuguée avale (h_2) du ressaut ;
10. Enlever le seuil et placer le déversoir rectangulaire à l'extrémité avale du canal ;
11. Mesurer la hauteur de la lame d'eau ;
12. Faire varier le seuil par pas fixe de 01cm, depuis 03cm jusqu'à attendre 15cm et prendre les mêmes mesures ;
13. Faire varier la profondeur de la vanne par pas fixe de 01cm, depuis 02cm jusqu'à attendre 05cm ;
14. Changer la rugosité des parois du canal par pas fixe de 02mm, depuis 06 jusqu'à attendre 12 mm et refaire la même manipulation et prendre les mêmes mesures ;
15. Consigner les résultats dans un tableau.

I.8. Conclusion

A travers ce chapitre méthodes et matériels, nous avons expliqué le dispositif utilisé dans l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire aux parois rugueuses en détails, ainsi que tous ces composants avec illustrations. Nous avons développé le procédure et mode expérimental pour l'expérience réalisée dans cette étude.

Cette expérience va nous permettre d'acquérir des résultats concrets et valides que nous pourrons par la suite analysé et discuté en vue de contribuer à la localisation du ressaut hydraulique, l'analyse de ces mêmes résultats fera l'objet du chapitre suivant.



Chapitre II :
Résultats
et
discussions

Chapitre II : Résultats et discussions

II.1. Introduction

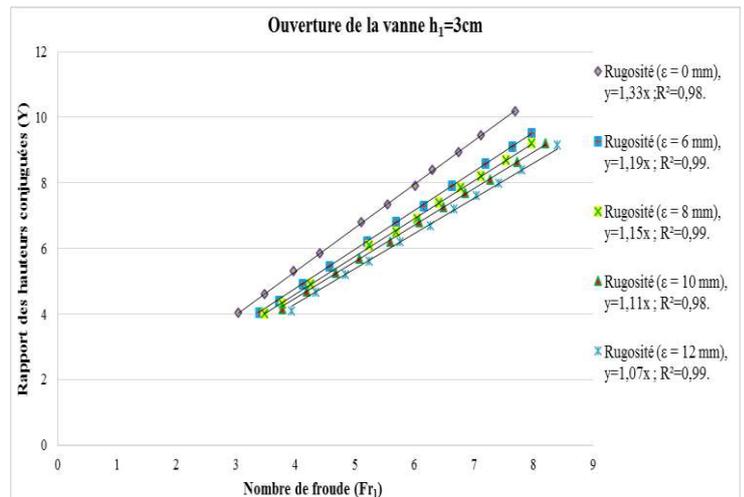
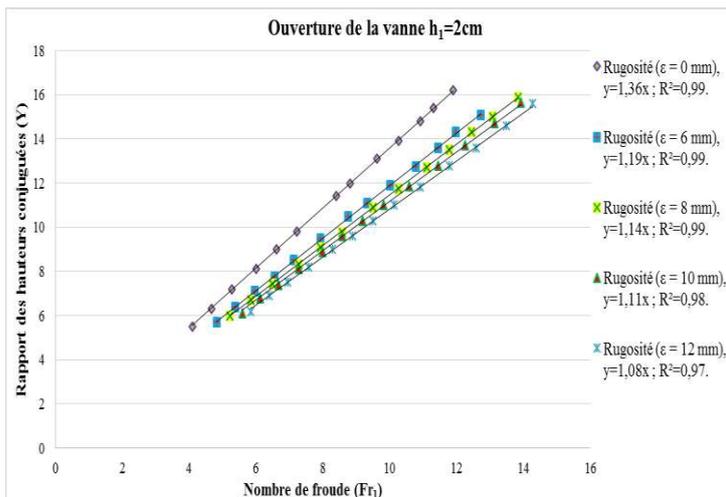
Nous voici au terme de notre travail, avec ce chapitre qui lèvera le voile sur les résultats que nous avons trouvés tout au long de notre expérimentation. En effet nous allons traiter les résultats obtenus expérimentalement de deux types de ressaut, d'une part ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond rugueux, et d'autre part aux parois rugueuses, et ce dans le but de connaître l'impact de la rugosité sur les paramètres du ressaut.

Trois phases nous avons présentées, la première et la deuxième partie concernera l'analyse des résultats obtenus de deux types de ressaut par l'établissement d'équations servant d'approche ajuster par la méthode des moindres carrés, tandis que la troisième nous allons faire la comparaison entre les deux configurations étudiées.

II.2. Ressaut hydraulique à fond rugueux

II.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées (Y)

Les mesures effectuées pour le paramètre des hauteurs conjuguées (Y) sont schématisées dans la figure (2.1) en fonction du paramètre adimensionnel (Fr_1), avec quatre ouvertures de la vanne, tels que : $h_1=2, 3, 4$ et 5 cm.



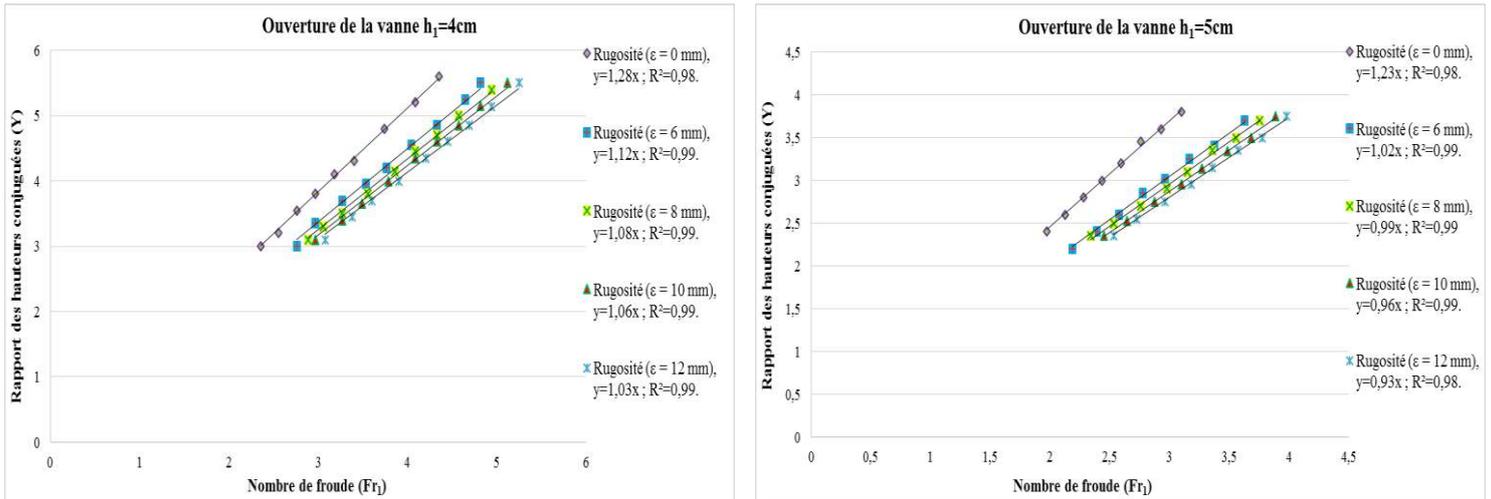


Figure 2. 1 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le nombre du Froude, dans le cas à fond rugueux. (—) Courbes d'ajustements.

Selon la figure (2.1), on remarque les suivantes :

- ❖ Pour chaque série de mesure, à chaque fois que l'ouverture de la vanne et la valeur de la rugosité absolue augmente, provoque la diminution du paramètre des hauteurs conjuguées (Y) et le paramètre adimensionnel (Fr_1). Cette diminution est expliquée par l'effet des deux paramètres qui tendent à diminuer la vitesse de la partie l'amont, et par conséquent engendre l'accroissement de la hauteur conjuguée au début du ressaut (h_1) et la réduction de la hauteur conjuguée finale (h_2).
- ❖ Un nuage de points, correspondant chacun à une valeur bien connue de la rugosité absolue (ϵ). Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés, qui a montré que la variation du rapport des hauteurs conjuguées (Y) en fonction du nombre de Froude (Fr_1) est de type linéaire, sous forme droite passe par l'origine, et ça relation donnée par la suivante : $Y = a Fr_1$.

Le tableau (2.1) : regroupe la valeur de la pente (a) pour les différents droites d'ajustement.

Tableau 2. 1 : Valeur de la pente (a) pour les différents droites d'ajustement.

Rugosité	Ouverture de la vanne $h_1=2\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=3\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=4\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=5\text{cm}$		Moyen
	a	R ²							
06	1,19	0,99	1,19	0,99	1,12	0,99	1,02	0,99	1,13
08	1,14	0,99	1,15	0,99	1,08	0,99	0,99	0,99	1,09
10	1,11	0,98	1,11	0,98	1,06	0,99	0,96	0,99	1,06
12	1,08	0,97	1,07	0,99	1,03	0,99	0,93	0,99	1,03

Chapitre II : Résultats et discussions

Selon le tableau (2.1), on observe une relation inverse entre la rugosité absolue (ϵ) et la pente du droit d'ajustement (a), c.à.d. plus la rugosité absolue (ϵ) est augmentée, plus la pente (a) est diminuée. Pour déterminer la relation entre les deux paramètres, nous avons tracés la répartition de la pente moyenne (a) en fonction de la rugosité relative (ϵ/b), commue illustre dans le graphique suivant :

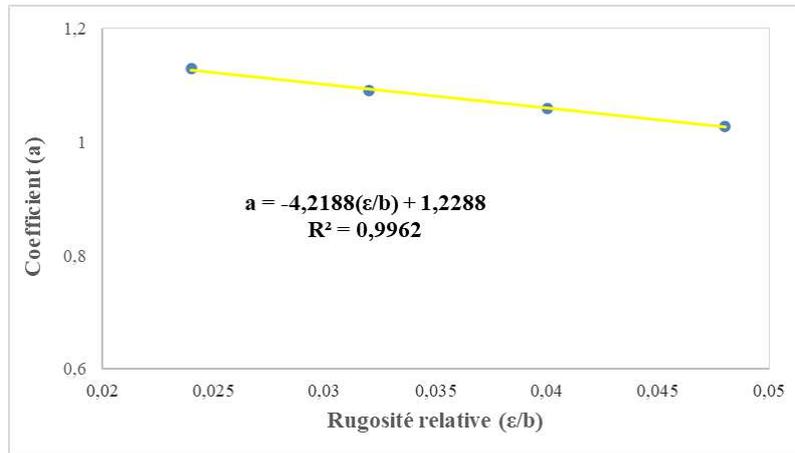


Figure 2. 2 : Relation entre le coefficient (a) et la rugosité relative (ϵ/b).

L'adaptation des données des couples des valeurs (ϵ/b , a) par la méthode des moindres carrés a abouti à une droite unique, représentée par la relation : $a = 1,2288 - 4,2188 (\epsilon/b)$.

L'équation empirique de (Y) est la suivante :

$$Y = (1,2288 - 4,2188 (\epsilon/b)) Fr_1 \quad (2.1)$$

Pour : $0,024 \leq \epsilon/b \leq 0,048$.

La figure (2.3) montre que l'équation $Y = \Phi(Fr_1, (\epsilon/b))$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces points suivent absolument la première bissectrice.

Chapitre II : Résultats et discussions

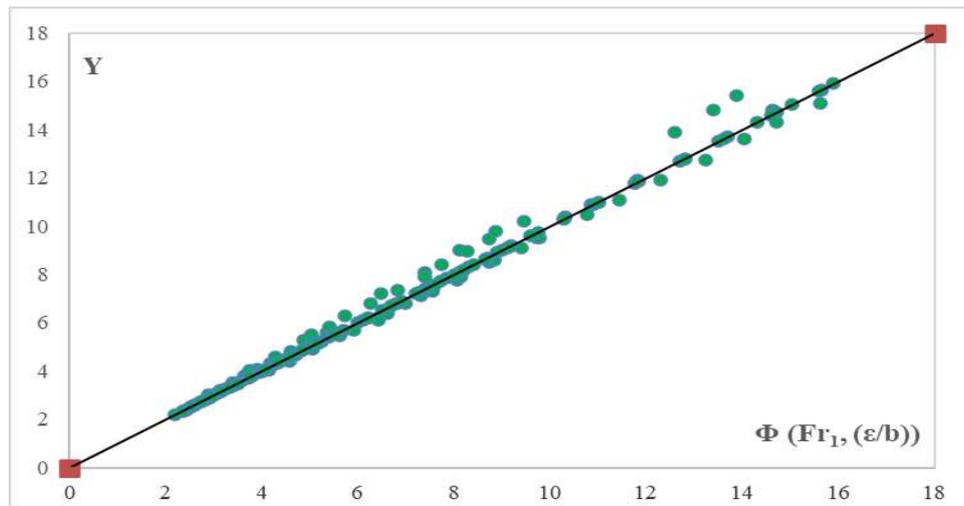


Figure 2. 3 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées (Y) et la fonction de $\Phi(Fr_1, (\epsilon/b))$.
 (—) Première bissectrice d'équation $Y = (1,2288 - 4,2188 (\epsilon/b)) Fr_1$.

Le tableau (2.2) indique les valeurs expérimentales qui permet l'édition de la courbe de la figure (2.3) :

Tableau 2. 2 : Valeurs expérimentales de dessiner de la fonction $Y = \Phi(Fr_1, (\epsilon/b))$.

Y _{exp}	Fr ₁	Y _{rel}	ΔY (%)	Y _{exp}	Fr ₁	Y _{rel}	ΔY (%)	Y _{exp}	Fr ₁	Y _{rel}	ΔY (%)	Y _{exp}	Fr ₁	Y _{rel}	ΔY (%)
2,4	1,974	2,426	1,1	5,2	4,09	5,026	3,3414	6,9	6,044	7,427	7,64	12	8,821	10,83	9,6689
2,6	2,124	2,61	0,409	5,5	4,09	5,026	8,6137	7,3	6,152	7,559	3,56	11,1	9,313	11,44	3,096
3	2,356	2,895	3,4902	4,9	4,121	5,064	3,357	8,4	6,297	7,738	7,876	10,9	9,5	11,67	7,091
3,2	2,555	3,139	1,8785	4,9	4,248	5,22	6,535	7,4	6,406	7,871	6,376	11	9,814	12,05	9,625
3,2	2,595	3,189	0,3251	5,6	4,352	5,348	4,4898	7,45	6,498	7,984	7,172	11,9	10	12,29	3,303
3,45	2,759	3,391	1,7099	5,85	4,409	5,417	7,3881	7,75	6,553	8,052	3,901	11,75	10,26	12,6	7,29
3,55	2,759	3,391	4,4787	5,45	4,571	5,616	3,059	7,9	6,627	8,142	3,075	13,9	10,26	12,6	9,2951
3,6	2,926	3,596	0,0975	5,25	4,644	5,707	8,709	8,95	6,738	8,28	7,4829	11,85	10,58	13	9,723
3,8	2,969	3,648	3,9872	5,7	4,818	5,92	3,865	8,5	7,113	8,74	2,827	12,75	10,77	13,24	3,862
3,35	2,969	3,648	8,9	5,5	4,818	5,92	7,642	8,2	7,113	8,74	6,586	11,8	10,9	13,4	13,57
4,05	3,04	3,735	7,7605	6,8	5,103	6,271	7,7756	9,45	7,113	8,741	7,5017	12,7	11,1	13,64	7,437
3,8	3,097	3,805	0,156	6,2	5,205	6,396	3,161	8,6	7,189	8,833	2,715	13,6	11,43	14,05	3,319
4,1	3,183	3,912	4,5812	6	5,222	6,416	6,946	8,3	7,284	8,95	7,833	13,5	11,77	14,46	7,122
3,7	3,27	4,019	8,622	6,1	5,239	6,437	5,537	8,7	7,533	9,256	6,396	12,8	11,77	14,46	12,97
4,05	3,388	4,163	2,8	6,4	5,376	6,606	3,228	9,1	7,649	9,399	3,288	14,3	11,97	14,71	2,867
4,3	3,403	4,181	2,7461	7,35	5,55	6,82	7,2099	10,2	7,688	9,447	7,3754	13,7	12,24	15,04	9,797
4	3,477	4,272	6,817	6,8	5,69	6,991	2,814	9,5	7,922	9,734	2,469	14,3	12,44	15,29	6,951
4,6	3,477	4,273	7,1053	6,5	5,69	6,991	7,557	9,1	7,922	9,734	6,971	13,6	12,58	15,46	13,68
4,4	3,718	4,569	3,843	6,7	5,848	7,186	7,258	9,5	7,961	9,782	2,977	15,1	12,72	15,63	3,522
4,8	3,741	4,597	4,2163	7,1	5,955	7,317	3,064	9,2	7,961	9,782	6,332	15,02	13,06	16,05	6,901
4,3	3,779	4,644	8,002	7,9	6,009	7,384	6,5314	9,75	8,578	10,54	8,104	15,9	13,84	17	6,951
5,3	3,965	4,872	8,0681	8,1	6,009	7,384	8,8393	10,5	8,76	10,76	2,514	15,65	13,91	17,09	9,213

Chapitre II : Résultats et discussions

Dans la majorité des cas, presque 90%, la différence entre les données du paramètre (Y) calculées par l'équation (2.1) et les données mesurées est moindre à 10% (Cette valeur est admissible selon Resch (1971)).

II.2.2. Longueur relative du ressaut (L_j/h_1)

Les mesures exécutées pour la longueur relative du ressaut (L_j/h_1) sont dessinées dans la figure (2.4) en fonction du paramètre adimensionnel (Fr_1), avec quatre ouvertures de la vanne, tels que : $h_1 = 2, 3, 4$ et 5 .

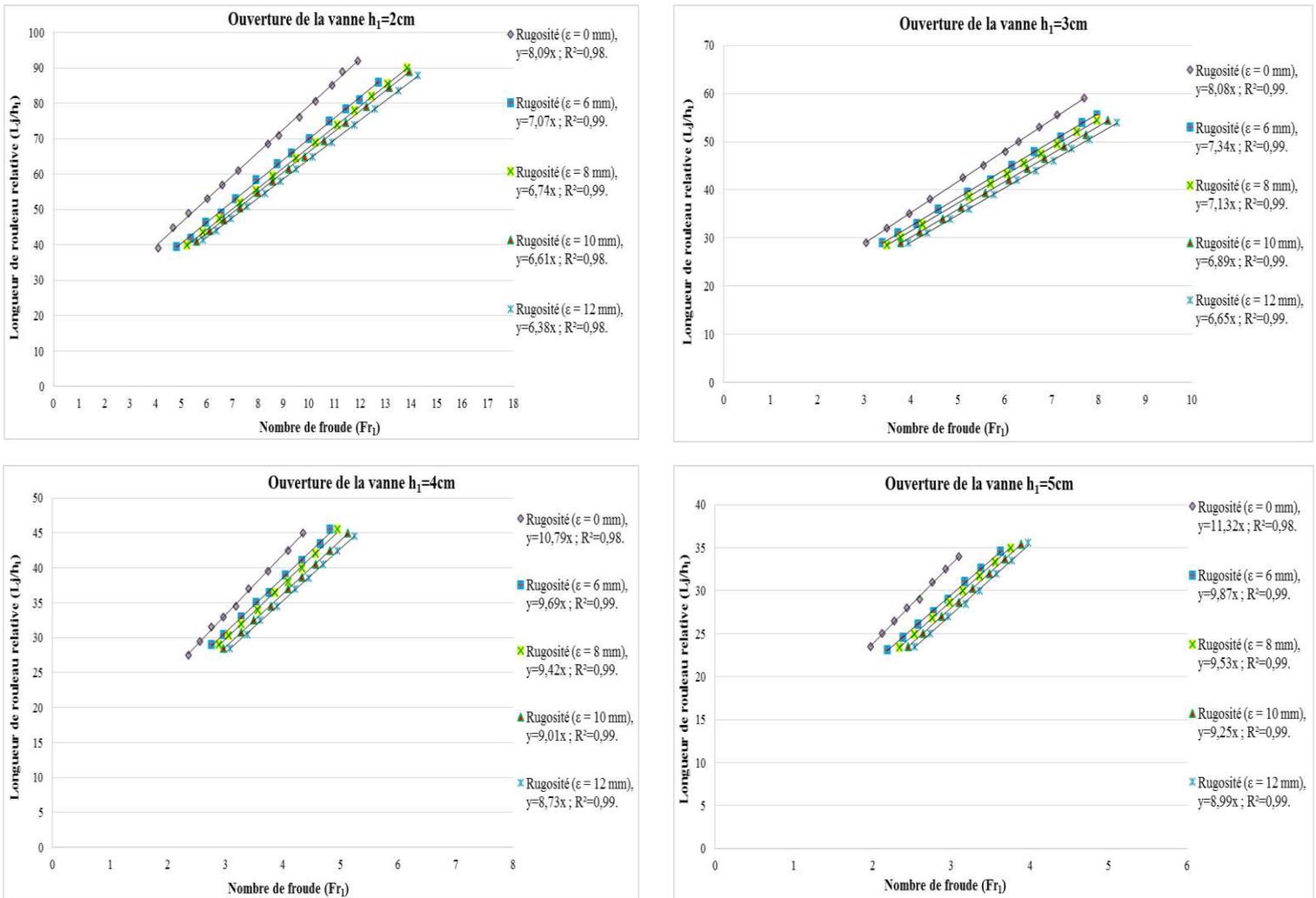


Figure 2.4 : Relation entre la longueur du ressaut relative et le nombre du Froude, dans le cas à fond rugueux. (—) Courbes d'ajustements.

Chapitre II : Résultats et discussions

Selon la figure (2.4), on remarque les suivantes :

- ❖ Pour chaque série de mesure, à chaque fois que l'ouverture de la vanne et la valeur de la rugosité absolue augmente, engendre la réduction du nombre de Froude (Fr_1) et la longueur relative du ressaut (L_j/h_1). Cette diminution est expliquée par l'effet des deux paramètres qui tendent à diminuer la vitesse de la partie amont, et par conséquent provoque la diminution de la longueur du ressaut (L_j).
- ❖ Un nuage de points, correspondant chacun à une valeur bien connue de la rugosité absolue (ϵ). Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés, qui a montré que la variation de la longueur relative du ressaut (L_j/h_1) en fonction du nombre de Froude (Fr_1) est de type linéaire, sous forme droite passe par l'origine, et cette relation donnée par la suivante : $L_j/h_1 = n Fr_1$.

Le tableau (2.3) : regroupe la valeur de la pente (n) pour les différentes droites d'ajustement.

Tableau 2.3 : Valeur de la pente (n) pour les différentes droites d'ajustement.

Rugosité ϵ (mm)	Ouverture de la vanne $h_1=2\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=3\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=4\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=5\text{cm}$		Moyen n
	n	R^2	n	R^2	n	R^2	n	R^2	
06	7,07	0,99	7,34	0,99	9,69	0,99	9,87	0,99	8,49
08	6,74	0,99	7,13	0,99	9,42	0,99	9,53	0,99	8,21
10	6,61	0,98	6,89	0,99	9,01	0,99	9,25	0,99	7,94
12	6,38	0,98	6,65	0,99	8,73	0,99	8,99	0,99	7,68

Selon le tableau (2.3), on observe une relation inverse entre la rugosité absolue (ϵ) et la pente du droit d'ajustement (n), c.à.d. plus la rugosité absolue (ϵ) est augmentée, plus la pente (n) est diminuée. Pour déterminer la relation entre les deux paramètres, nous avons tracés la répartition de la pente moyenne (n) en fonction de la rugosité relative (ϵ/b), comme illustre dans le graphique suivant :

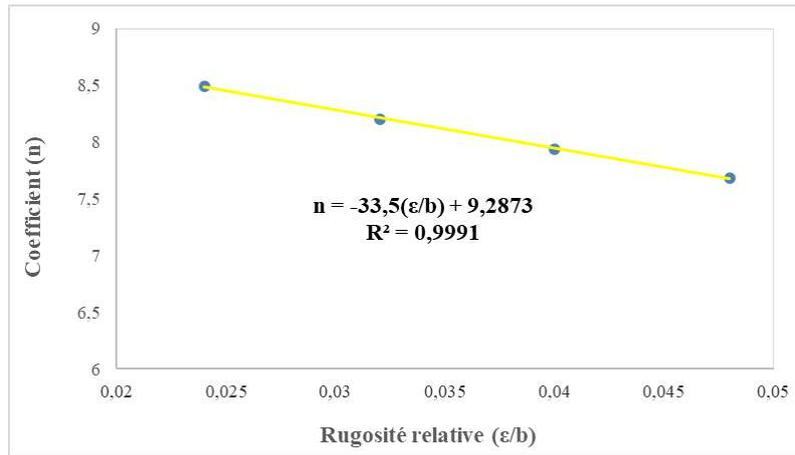


Figure 2. 5 : Relation entre le coefficient (n) et la rugosité relative (ϵ/b).

L'adaptation des données des couples des valeurs ((ϵ/b) , n) par la méthode des moindres carrés a abouti à une droite unique, représentée par la relation : $n = 9,2873 - 33,5 (\epsilon/b)$.

En effet, en remplaçant la pente (n) par leur expression dans la relation de (L_j/h_1) , on trouve l'équation suivante :

$$L_j/h_1 = (9,2873 - 33,5 (\epsilon/b)) Fr_1 \quad (2.2)$$

Pour : $0,024 \leq \epsilon/b \leq 0,048$.

La figure (2.6) montre que l'équation $L_j/h_1 = \Psi(Fr_1, (\epsilon/b))$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces points suivent sûrement la première bissectrice.

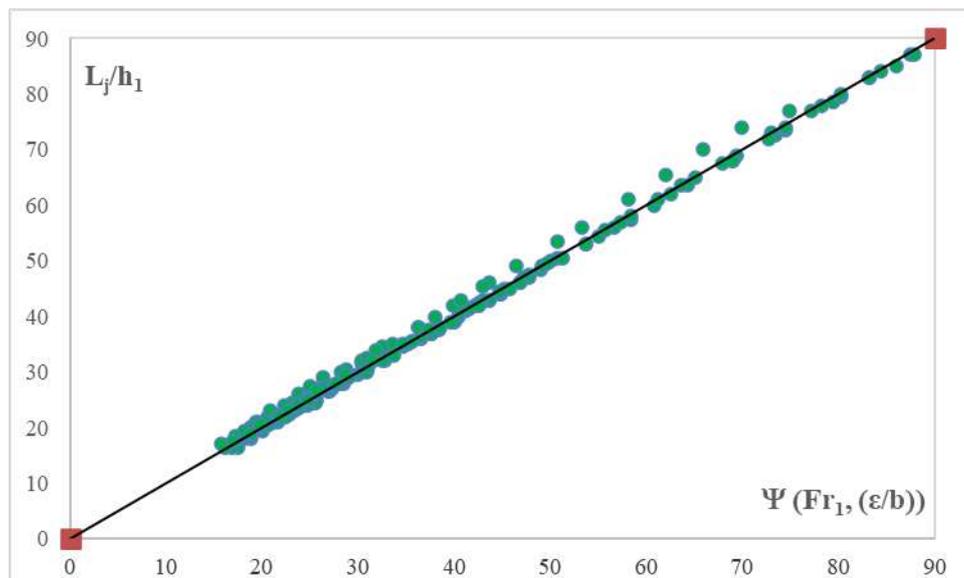


Figure 2. 6 : Relation entre la longueur du ressaut relative et la fonction de $\Psi(Fr_1, (\epsilon/b))$. (—) Première bissectrice d'équation $L_j/h_1 = (9,2873 - 33,5 (\epsilon/b)) Fr_1$.

Chapitre II : Résultats et discussions

Le tableau (2.4) indique les valeurs expérimentales qui permet l'édition de la courbe de la figure (2.6) :

Tableau 2.4 : Valeurs expérimentales de dessiner de la fonction $L_j/h_1 = \Psi(Fr_1, (\varepsilon/b))$.

L_j/h_{1exp}	Fr_1	L_j/h_{1rel}	$\Delta L_j/h_1$ (%)	L_j/h_{1exp}	Fr_1	L_j/h_{1rel}	$\Delta L_j/h_1$ (%)	L_j/h_{1exp}	Fr_1	L_j/h_{1rel}	$\Delta L_j/h_1$ (%)	L_j/h_{1exp}	Fr_1	L_j/h_{1rel}	$\Delta L_j/h_1$ (%)
60	13,2	68,97	14,96	24,5	4,9	25,46	3,94	26	4,9	25,49	1,932	38	6	36,28	4,505
68,5	8,39	77,99	13,85	28,5	3,18	29,56	3,729	41	4,32	40,19	1,958	61	9,62	58,12	4,707
42,5	5,1	47,39	11,52	32	3,57	33,18	3,688	30	3,14	29,24	2,524	28	4,4	26,62	4,91
24,5	5,17	26,86	9,645	32,5	3,6	33,47	2,997	39	4,09	37,98	2,594	42	6,6	39,9	4,977
25	5,23	27,21	8,879	35,5	7,03	36,56	2,997	34,6	3,62	33,68	2,637	46	7,22	43,64	5,12
29	3,38	31,46	8,505	30,5	3,38	31,39	2,935	29	3,04	28,23	2,64	32,5	5,1	30,81	5,171
57	6,6	61,37	7,68	30	5,93	30,84	2,826	34	3,55	33,05	2,774	53,5	8,39	50,71	5,207
24	4,94	25,67	6,995	43,5	8,59	44,67	2,695	23,5	2,45	22,76	3,147	43	6,73	40,69	5,366
33,5	6,85	35,58	6,23	37	4,09	37,98	2,655	28,5	2,96	27,57	3,259	65,5	10,2	61,96	5,403
25,5	5,19	26,99	5,865	33	6,48	33,66	2,016	28,6	2,97	27,65	3,319	31,1	3,16	29,4	5,452
45	5,12	47,54	5,662	34,5	3,78	35,16	1,941	31,5	5,84	30,38	3,539	45,5	7,11	42,95	5,588
37	4,2	39,08	5,627	35,4	3,88	36,07	1,894	45	4,66	43,36	3,627	24,9	2,53	23,5	5,606
53	6	55,8	5,298	27	2,96	27,49	1,82	24	4,44	23,11	3,689	35	3,53	32,84	6,146
42,5	4,81	44,74	5,276	23	4,5	23,41	1,784	39	4,04	37,54	3,724	26	4,69	24,38	6,2
35	3,96	36,82	5,214	42	4,57	42,44	1,07	32,6	3,37	31,35	3,813	34	5,27	31,84	6,33
27	5,45	28,33	4,941	32	3,47	32,29	0,925	30	5,53	28,74	4,19	30,3	3,05	28,36	6,391
40,5	4,57	42,44	4,81	45,5	4,94	45,9	0,892	36,5	3,76	34,95	4,223	27,6	2,77	25,78	6,591
33,5	3,77	35,04	4,599	27	2,87	26,7	1,077	27,5	5,06	26,33	4,228	77	11,9	71,88	6,636
27	5,41	28,11	4,124	29,35	5,58	29,01	1,148	35	5,55	33,51	4,238	23,4	2,34	21,73	7,118
38	7,61	39,54	4,055	30,8	3,27	30,37	1,384	25,5	4,69	24,38	4,365	26,1	2,57	23,95	8,221
30	3,35	31,18	3,966	25	2,64	24,55	1,773	26,8	2,75	25,62	4,38	24,6	2,38	22,17	9,866
45	9	46,78	3,961	36,5	3,85	35,81	1,88	34	6,25	32,47	4,47	45	4,35	40,42	10,16

Dans la plupart des cas, environs 93%, la différence entre les données de la longueur relative du ressaut calculées par l'équation (2.2) et les données mesurées est moindre à 10%.

II.2.3. Longueur relative du rouleau (L_r/h_1)

Les mesures réalisées pour la longueur relative du rouleau (L_r/h_1) sont représentées dans la figure (2.7) en fonction du paramètre adimensionnel (Fr_1), avec quatre ouvertures de la vanne, tels que : $h_1 = 2, 3, 4$ et 5 .

Chapitre II : Résultats et discussions

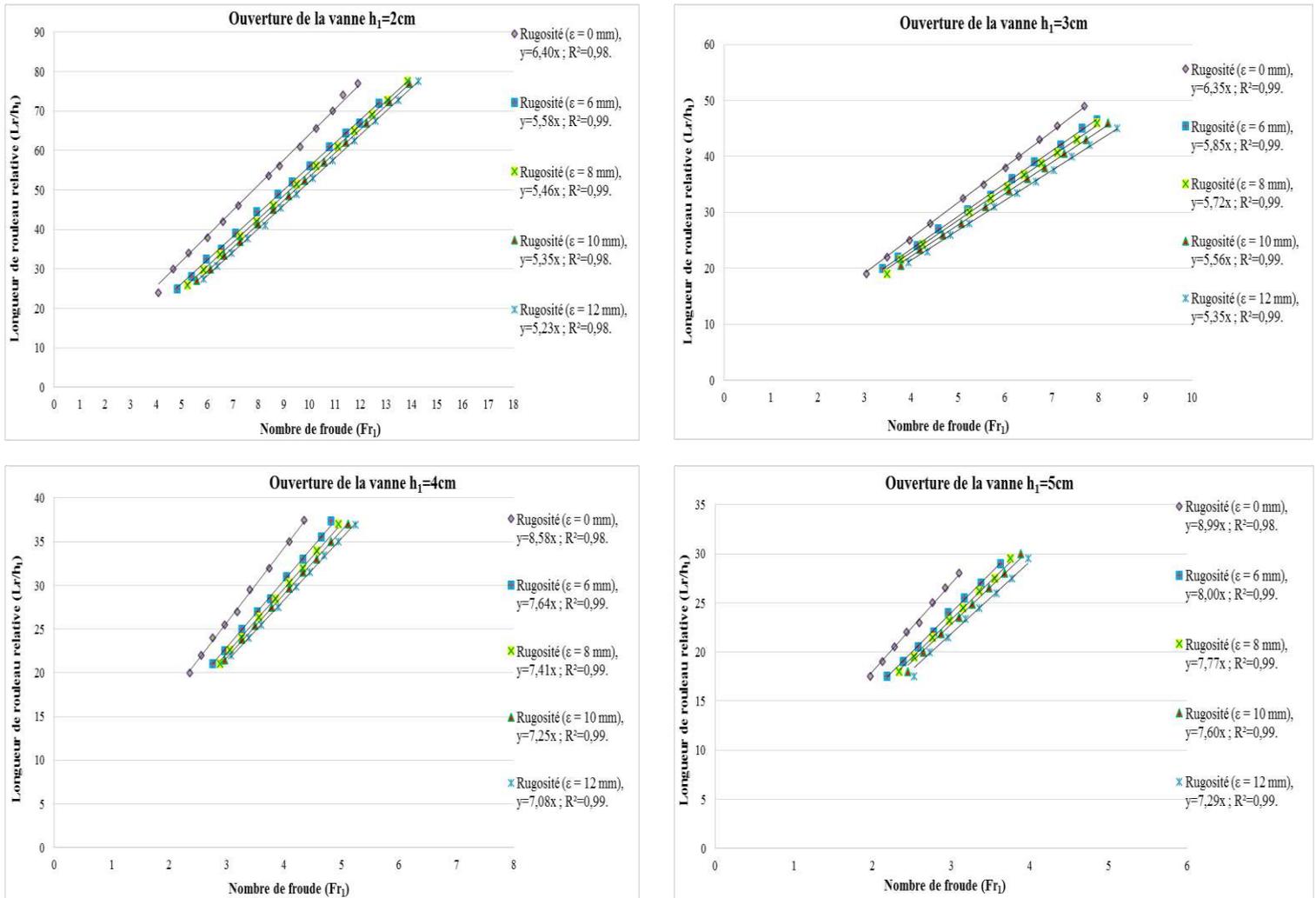


Figure 2.7 : Relation entre la longueur du rouleau relative et le nombre du Froude, dans le cas à fond rugueux. (—) Courbes d'ajustements.

Selon la figure (2.7), on remarque les suivantes :

- ❖ Pour chaque série de mesure, à chaque fois que l'ouverture de la vanne et la valeur de la rugosité absolue augmente, provoque la diminution du nombre de Froude (Fr_1) et la longueur relative du rouleau (L_r/h_1). Cette diminution est expliquée par l'effet les deux paramètres qui tendent à diminuer la vitesse de partie amont, et par conséquent engendre la diminution de la longueur du rouleau (L_r).
- ❖ Un nuage de points, correspondant chacun à une valeur bien connue de la rugosité absolue (ϵ). Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés, qui a montré que la variation de la longueur relative du rouleau (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude (Fr_1) est de type linéaire, sous forme droite passe par l'origine, et ça relation donnée par la suivante : $L_r/h_1 = c Fr_1$.

Chapitre II : Résultats et discussions

Le tableau (2.5) : regroupe la valeur de la pente (c) pour les différents droites d'ajustement.

Tableau 2. 5 : Valeur de la pente (c) pour les différents droites d'ajustement.

Rugosité ϵ (mm)	Ouverture de la vanne $h_1=2\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=3\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=4\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=5\text{cm}$		Moyen c
	c	R ²							
06	5,58	0,99	5,85	0,99	7,64	0,99	8	0,99	6,76
08	5,46	0,99	5,72	0,99	7,41	0,99	7,77	0,99	6,59
10	5,35	0,98	5,56	0,99	7,25	0,99	7,6	0,99	6,44
12	5,23	0,98	5,35	0,99	7,08	0,99	7,29	0,99	6,23

Selon le tableau (2.5), on observe une relation inverse entre la rugosité absolue (ϵ) et la pente du droit d'ajustement (c), c.à.d. plus la rugosité absolue (ϵ) est augmentée, plus la pente (c) est diminuée. Pour déterminer la relation entre les deux paramètres, nous avons tracés la répartition de la pente moyenne (c) en fonction de la rugosité relative (ϵ/b), commue illustre dans le graphique suivant :

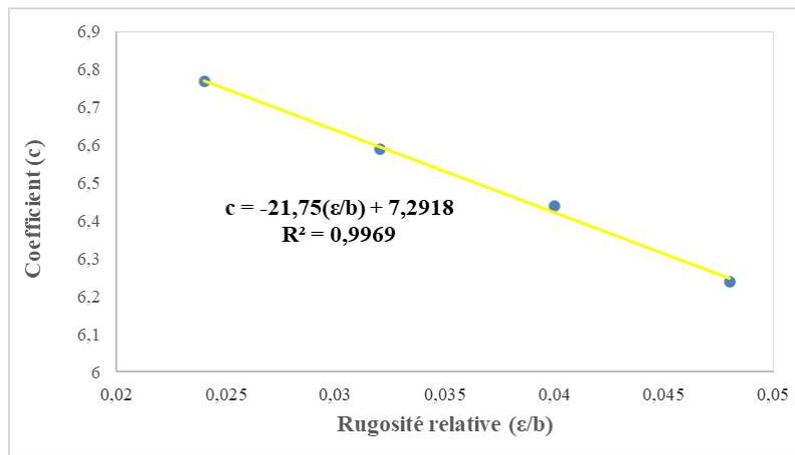


Figure 2. 8 : Relation entre le coefficient (c) et la rugosité relative (ϵ/b).

Le traitement des données des couples des valeurs ((ϵ/b) , c) par la méthode des moindres carrés a abouti à une droite unique, représentée par la relation : $c = 7,2918 - 21,75 (\epsilon/b)$.

En effet, en remplaçant la pente (c) par leur expression dans la relation de (L_r/h_1), on trouve l'équation suivante :

$$L_r/h_1 = (7,2918 - 21,75 (\epsilon/b)) Fr_1 \quad (2.3)$$

Pour : $0,024 \leq \epsilon/b \leq 0,048$.

La figure (2.9) montre que l'équation $L_r/h_1 = \zeta(Fr_1, (\epsilon/b))$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice.

Chapitre II : Résultats et discussions

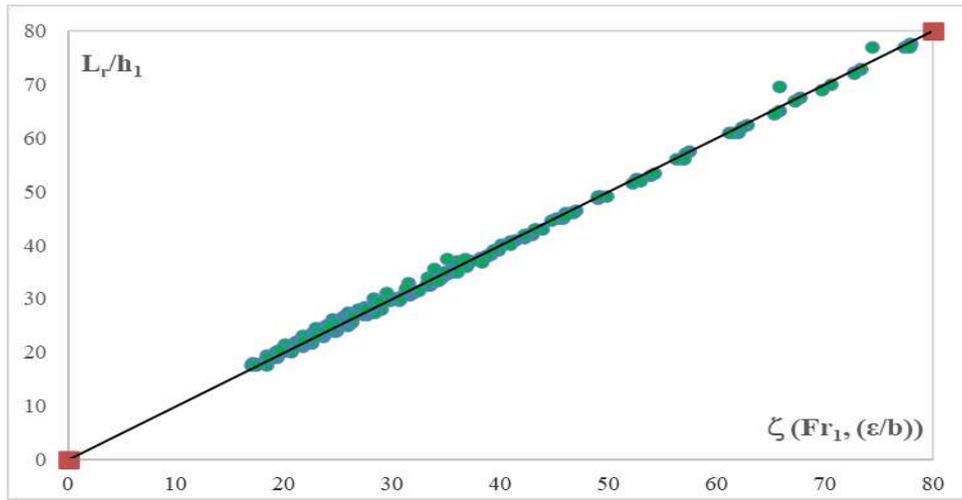


Figure 2. 9 : Relation entre la longueur du rouleau relative et la fonction de $\zeta(Fr_1, (\epsilon/b))$. (—) Première bissectrice d'équation $L_r/h_1 = (7,2918 - 21,75 (\epsilon/b)) Fr_1$.

Le tableau (2.6) indique les valeurs expérimentales qui permet l'édition de la courbe de la figure (2.9) :

Tableau 2. 6 : Valeurs expérimentales de dessiner de la fonction $L_r/h_1 = \zeta(Fr_1, (\epsilon/b))$.

L_r/h_{1exp}	Fr_1	L_r/h_{1rel}	$\Delta L_r/h_1$ (%)	L_r/h_{1exp}	Fr_1	L_r/h_{1rel}	$\Delta L_r/h_1$ (%)	L_r/h_{1exp}	Fr_1	L_r/h_{1rel}	$\Delta L_r/h_1$ (%)	L_r/h_{1exp}	Fr_1	L_r/h_{1rel}	$\Delta L_r/h_1$ (%)
17,5	2,53	18,45	5,44	20	2,72	19,87	0,6	27	3,53	25,79	4,47	37,4	4,81	35,13	6,06
36,9	5,24	38,26	3,69	24	3,27	23,84	0,62	35,5	4,64	33,86	4,59	65,5	10,2	74,81	14,2
27,5	3,9	28,45	3,47	18	2,45	17,87	0,71	25	3,27	23,84	4,6	32	6,11	30,59	4,38
25,5	3,6	26,28	3,06	23,4	3,18	23,21	0,8	31	4,04	29,48	4,9	38,5	7,28	37,11	3,6
31,5	4,44	32,43	2,98	28,5	3,85	28,11	1,33	18	2,34	17,06	5,19	47,5	8,88	45,75	3,66
35	4,94	36,04	2,97	32	4,32	31,56	1,37	19,5	2,53	18,45	5,36	40,3	7,28	39,11	2,94
24	3,38	24,65	2,71	22,6	3,05	22,26	1,46	30	3,88	28,32	5,59	54,4	9,81	52,55	3,38
29,9	4,2	30,68	2,62	30,3	4,09	29,82	1,57	27,5	3,55	25,92	5,73	35,5	6,26	33,64	5,21
33,4	4,69	34,22	2,46	26,4	3,55	25,95	1,68	74	11,3	82,42	11,3	47	8,39	45,22	3,77
22	3,07	22,42	1,93	29,5	3,97	28,99	1,69	24,5	3,14	22,96	6,28	81,5	14,2	78,02	4,26
33	4,57	33,32	0,99	34	4,57	33,32	1,97	21,5	2,75	20,12	6,41	72	12,4	69,75	3,11
37	5,12	37,33	0,9	37	4,94	36,04	2,58	23,2	2,97	21,71	6,42	54	9,31	52,9	2,02
21,5	2,96	21,64	0,68	20	2,64	19,28	3,59	26,2	3,35	24,49	6,52	79,5	13,8	77,91	1,99
27,5	3,78	27,61	0,41	28,5	3,76	27,44	3,69	29,5	3,75	27,38	7,18	48	8,19	46,77	2,54
29,7	4,09	29,82	0,41	22,5	2,96	21,64	3,78	22	2,77	20,24	7,99	74	12,7	72,76	1,67
21,5	2,96	21,58	0,39	23,5	3,09	22,58	3,9	20,5	2,57	18,8	8,25	63	10,7	61,58	2,24
35	4,81	35,13	0,37	28	3,68	26,84	4,12	19	2,38	17,4	8,37	37,7	6,4	36,71	2,61
25,4	3,49	25,46	0,24	26,5	3,48	25,39	4,15	29	3,62	26,44	8,79	44	7,18	42,41	3,59
23,8	3,27	23,84	0,2	21	2,75	20,12	4,18	27	3,37	24,62	8,81	46	7,64	45,77	0,48
26	3,57	26,05	0,2	24,9	3,27	23,84	4,22	17,5	2,18	15,93	8,94	62	9,62	61,18	1,3
31,5	4,32	31,55	0,18	21,9	2,87	20,97	4,24	25,5	3,16	23,08	9,46	54,5	8,39	54,23	0,48
21	2,88	21,03	0,15	33	4,32	31,56	4,36	24	2,96	21,58	10	78	11,9	77,8	0,24

Dans la majorité des cas, presque 95%, la différence entre les données de la longueur relative du rouleau calculées par l'équation (2.3) et les données mesurées est moindre à 10%.

II.2.4. Rendement du ressaut hydraulique

Le rendement du ressaut hydraulique est donné par la formule s'écrit comme suit :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = 1 - \frac{Y + \frac{Fr_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{Fr_1^2}{2}}$$

La figure (2.10) montre que les points de mesure du ressaut contrôlé par seuil sont au-dessus de leurs homologues contrôlés pour une gamme des nombres de Froude incident $2 < Fr_1 < 14$. Cependant, pour les nombres de Froude $Fr_1 > 14$, tous les points de mesures tendent à se rejoindre pour former un seul nuage de points.

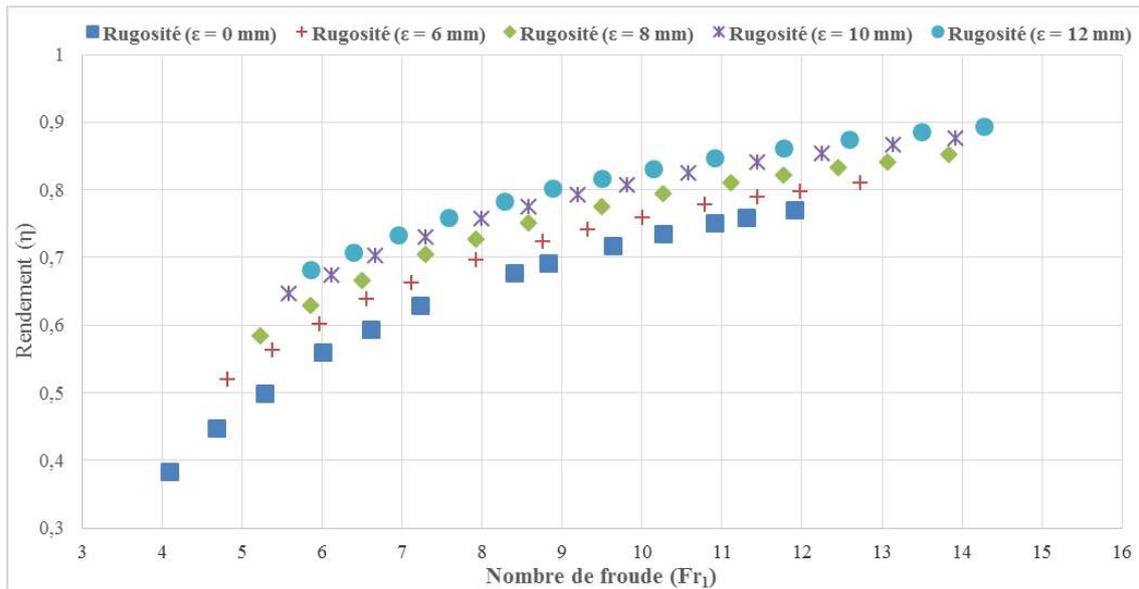


Figure 2. 10 : Relation entre le rendement et le nombre de Froude, dans le cas à fond rugueux.

En outre, la figure (2.10) montre que la dissipation de la charge hydraulique croit avec l'augmentation de la rugosité. Néanmoins, pour des nombres de Froude élevés, les points de mesure se rejoignent et l'effet de la rugosité s'atténue. Ceci peut être expliqué par le fait qu'au-delà d'un certain nombre de Froude pratique, le ressaut devient clapoteux et ne peut adhérer constamment au fond canal (Selon la classification de Bradley et Peterka, 1957).

II.3. Ressaut hydraulique aux parois rugueuses

II.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées (Y)

Les mesures effectuées pour le paramètre des hauteurs conjuguées (Y) sont schématisées dans la figure (2.11) en fonction du paramètre adimensionnel (Fr_1), avec quatre ouvertures de la vanne, tels que : $h_1 = 2, 3, 4$ et 5 cm.

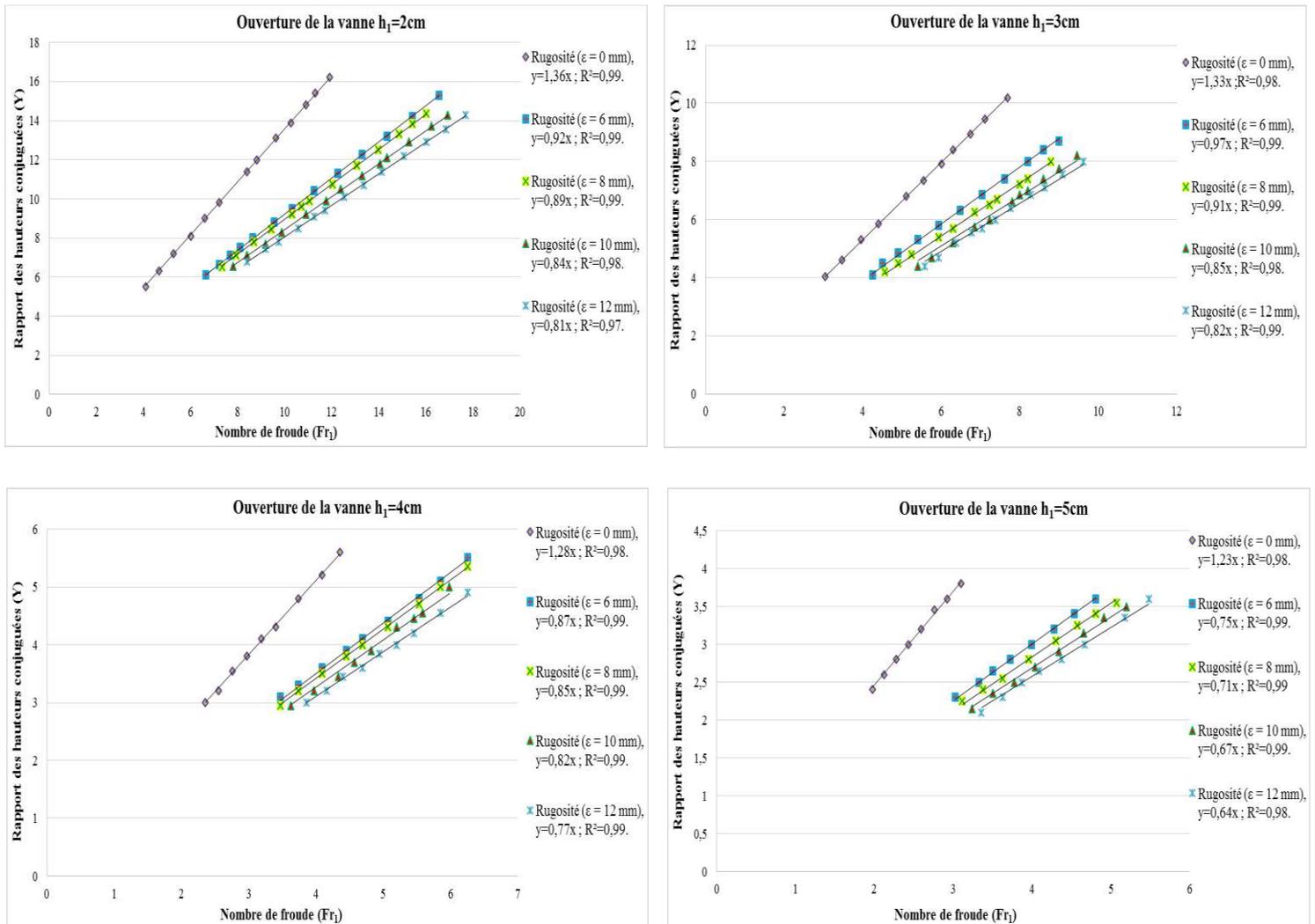


Figure 2. 11 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude, dans le cas aux parois rugueuses. (—) Courbes d'ajustements.

Selon la figure (2.11), on remarque les suivantes :

- ❖ Pour chaque série de mesure, à chaque fois que l'ouverture de la vanne et la valeur de la rugosité absolue augmente, provoque la diminution du nombre de Froude (Fr_1) et le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut (Y). Cette diminution est expliquée par l'effet les deux paramètres qui tendent à diminuer la vitesse de la partie amont, et par conséquent engendre

Chapitre II : Résultats et discussions

l'augmentation de la hauteur conjuguée initiale (h_1) et la diminution de la hauteur conjuguée finale (h_2).

- ❖ Un nuage de points, correspondant chacun à une valeur bien connue de la rugosité absolue (ϵ). Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés, qui a montré que la variation du rapport des hauteurs conjuguées (Y) en fonction du nombre de Froude (Fr_1) est de type linéaire, sous forme droite passe par l'origine, et ça relation donnée par la suivante : $Y = d Fr_1$.

Le tableau (2.7) : regroupe la valeur de la pente (d) pour les différents droites d'ajustement.

Tableau 2. 7 : Valeur de la pente (d) pour les différents droites d'ajustement.

Rugosité ϵ (mm)	Ouverture de la vanne $h_1=2\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=3\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=4\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=5\text{cm}$		Moyen d
	d	R^2	d	R^2	d	R^2	d	R^2	
06	0,92	0,99	0,97	0,99	0,87	0,99	0,75	0,99	0,87
08	0,89	0,99	0,91	0,99	0,85	0,99	0,71	0,99	0,84
10	0,84	0,98	0,85	0,98	0,82	0,99	0,67	0,99	0,79
12	0,81	0,97	0,82	0,99	0,77	0,99	0,64	0,99	0,76

Selon le tableau (2.7), on observe une relation inverse entre la rugosité absolue (ϵ) et la pente du droit d'ajustement (d), c.à.d. plus la rugosité absolue (ϵ) est augmentée, plus la pente (d) est diminuée. Pour déterminer la relation entre les deux paramètres, nous avons tracés la répartition de la pente moyenne (d) en fonction de la rugosité relative (ϵ/b), commue illustre dans le graphique suivant :

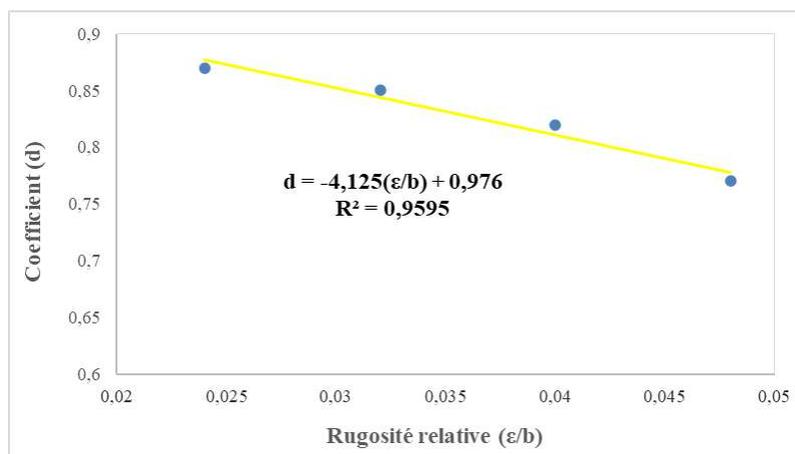


Figure 2. 12 : Relation entre le coefficient (d) et la fonction de la rugosité relative (ϵ/b).

Chapitre II : Résultats et discussions

L'adaptation des données des couples des valeurs $((\epsilon/b), d)$ par la méthode des moindres carrés a abouti à une droite unique, représentée par la relation : $d = 0,976 - 4,125 (\epsilon/b)$.

En effet, en remplaçant la pente (d) par leur expression dans la relation de (Y), on trouve l'équation suivante :

$$Y = (0,976 - 4,125 (\epsilon/b)) Fr_1 \quad (2.4)$$

Pour : $0,024 \leq \epsilon/b \leq 0,048$.

La figure (2.13) montre que l'équation $Y = \mathcal{G}(Fr_1, (\epsilon/b))$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice.

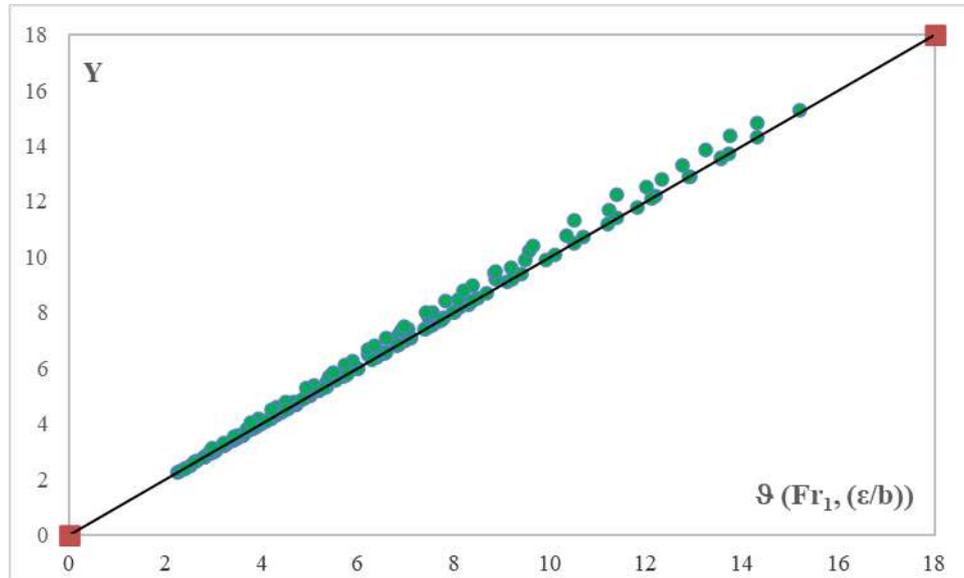


Figure 2. 13 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et la fonction de $\mathcal{G}(Fr_1, (\epsilon/b))$. (—) Première bissectrice d'équation $Y = (0,976 - 4,125 (\epsilon/b)) Fr_1$.

Le tableau (2.8) indique les valeurs expérimentales qui permet l'édition de la courbe de la figure (2.13) :

Chapitre II : Résultats et discussions

Tableau 2.8 : Valeurs expérimentales de dessiner de la fonction $Y = \vartheta(Fr_1, (\varepsilon/b))$

Y_{exp}	Fr_1	Y_{rel}	ΔY (%)	Y_{exp}	Fr_1	Y_{rel}	ΔY (%)	Y_{exp}	Fr_1	Y_{rel}	ΔY (%)	Y_{exp}	Fr_1	Y_{rel}	ΔY (%)
2,12	2,6	2,64	1,6	5,93	5,4	5,09	5,56	7,61	7,4	6,53	11,6	11,2	10,4	5,93	5,4
2,59	3,2	3,22	0,85	5,93	4,7	5,09	8,49	8,39	7,1	7,21	1,58	12,3	10,5	5,93	4,7
2,92	3,6	3,63	1,08	5,84	4,55	5,02	10,3	8,27	6,85	7,1	3,78	12	10,75	5,84	4,55
3,47	2,95	2,98	1,02	5,41	5,3	4,64	12,3	8	7,2	6,87	4,55	12,5	10,1	5,41	5,3
3,74	3,3	3,21	2,61	5,93	5,8	5,09	12	8,19	7,4	7,04	4,84	13,2	11,2	5,93	5,8
3,47	3,1	2,98	3,85	6,25	5,5	5,36	2,36	8,63	7,1	7,41	4,49	13,9	12,5	6,25	5,5
3,62	2,95	3,11	5,6	6,85	5,75	5,88	2,31	8,69	7,8	7,47	4,2	13	11,7	6,85	5,75
3,5	2,65	3	13,4	6,29	5,2	5,4	4	8,8	8	7,55	5,51	13,2	12,25	6,29	5,2
3,71	2,8	3,19	14	6,77	5,55	5,81	4,84	8,19	8	7,04	11,9	13,3	10,7	6,77	5,55
4,69	4,1	4,03	1,66	6,29	5,7	5,4	5,11	9,18	7,7	7,89	2,49	14,3	12,1	6,29	5,7
4,09	3,6	3,51	2,41	6,37	5,2	5,47	5,2	9,87	8,3	8,48	2,2	14	11,8	6,37	5,2
4,44	3,9	3,82	2,01	6,85	6,25	5,88	5,86	9,08	7,55	7,8	3,35	14,8	13,3	6,85	6,25
4,94	3,85	4,24	10,2	6,25	4,9	5,36	9,57	9,62	8	8,26	3,33	14,3	13,2	6,25	4,9
4,9	4,85	4,2	13,1	7,8	6,6	6,7	1,56	9,43	8,45	8,1	4,07	15,2	12,9	7,8	6,6
5,06	4,4	4,35	1,03	7,34	6,5	6,3	2,99	9,18	7,45	7,89	5,93	15,4	13,85	7,34	6,5
5,06	4,3	4,35	1,25	7,8	6,55	6,7	2,34	9	8,7	7,73	11,1	15,4	14,2	7,8	6,55
5,53	4,7	4,75	1,1	7,22	6	6,2	3,44	10,9	9,2	9,36	1,82	16,2	13,7	7,22	6
5,84	5,1	5,02	1,49	7,22	6,5	6,2	4,5	10,3	9,2	8,86	3,61	16,9	14,3	7,22	6,5
5,98	5	5,13	2,75	7,41	6,7	6,37	4,9	10,7	9,6	9,2	4,16	16	14,35	7,41	6,7
5,19	4,3	4,46	3,79	7,76	6,4	6,66	4,21	10,3	9,5	8,86	6,65	16,8	13,55	7,76	6,4
5,41	4,4	4,64	5,62	7,92	7,1	6,8	4,16	11,7	9,9	10,1	2,1	16,5	15,3	7,92	7,1
5,58	4,55	4,79	5,41	7,38	6	6,33	5,62	11	9,9	9,48	4,22	17,6	14,3	7,38	6

Dans la plupart des cas, environs 90%, la différence entre les données du paramètre (Y) calculées par l'équation (2.4) et les données mesurées est moindre à 10%.

II.3.2. Longueur relative du ressaut (L_j/h_1)

La figure (2.14) représente les points de mesures expérimentales de la longueur relative du ressaut (L_j/h_1) en fonction du nombre de Froude (Fr_1) de l'écoulement incident et leurs ajustements, avec quatre ouvertures de la vanne, tels que : $h_1=2, 3, 4$ et 5 cm.

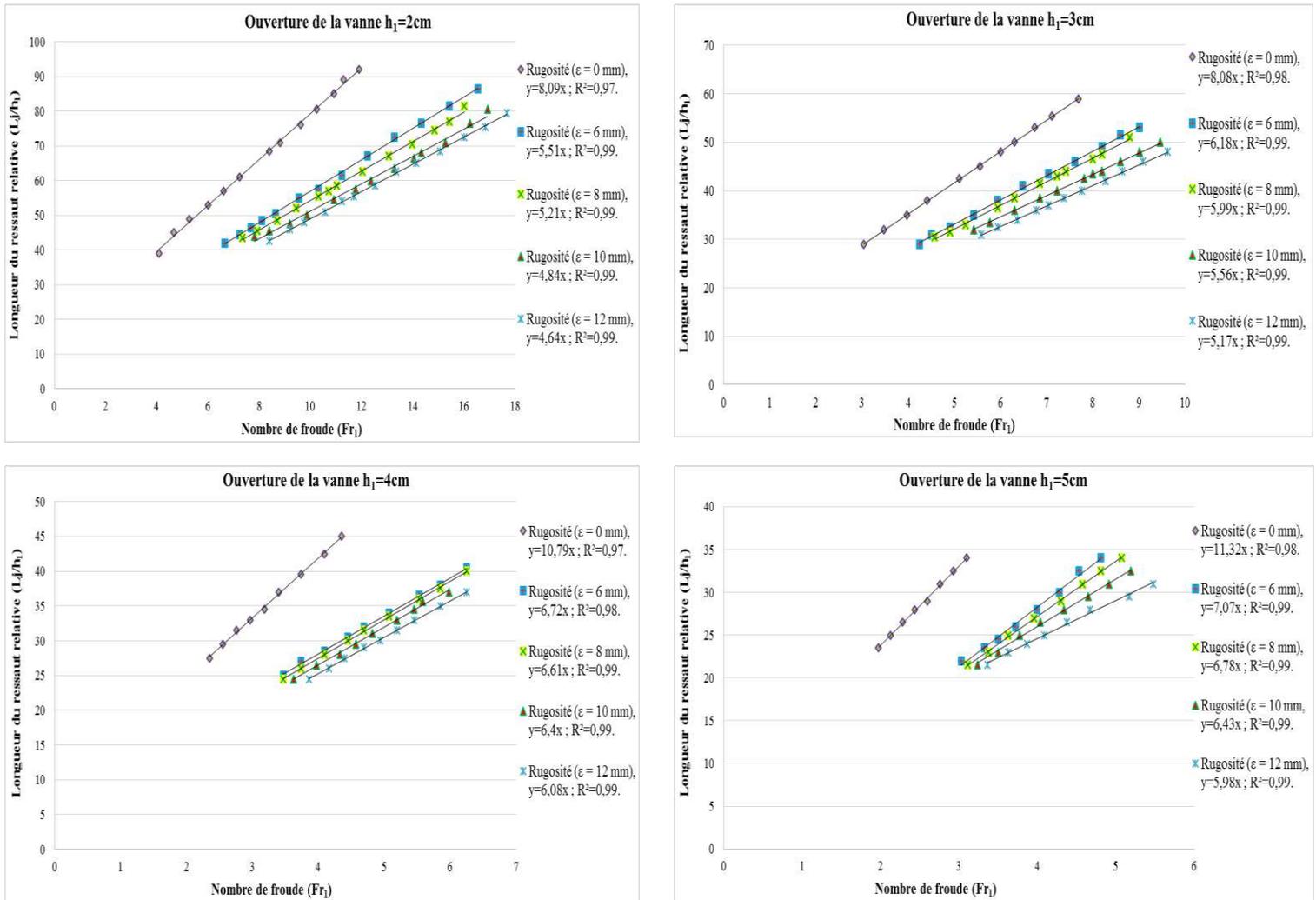


Figure 2. 14 : Relation entre la longueur du ressaut relative et le nombre de Froude, dans le cas aux parois rugueuses. (—) Courbes d'ajustements.

Selon la figure (2.14), on remarque les suivantes :

- ❖ Pour chaque série de mesure, à chaque fois que l'ouverture de la vanne et la valeur de la rugosité absolue augmente, provoque la diminution du nombre de Froude (Fr_1) et la longueur relative du ressaut (L_j/h_1). Cette diminution est expliquée par l'effet les deux paramètres qui tendent à diminuer la vitesse de la partie amont, et par conséquent engendre la diminution de la longueur du ressaut (L_j).
- ❖ Un nuage de points, correspondant chacun à une valeur bien connue de la rugosité absolue (ϵ). Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés, qui a montré que la variation de la longueur relative du ressaut (L_j/h_1) en fonction du nombre de Froude (Fr_1) est de type linéaire, sous forme droite passe par l'origine, et ça relation donnée par la suivante : $L_j/h_1 = e Fr_1$.

Chapitre II : Résultats et discussions

Le tableau (2.9) : regroupe la valeur de la pente (e) pour les différents droites d'ajustement.

Tableau 2. 9 : Valeur de la pente (e) pour les différents droites d'ajustement.

Rugosité ϵ (mm)	Ouverture de la vanne $h_1=2\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=3\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=4\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=5\text{cm}$		Moyen e
	e	R ²							
06	5,51	0,99	6,18	0,99	6,72	0,99	7,07	0,99	6,37
08	5,21	0,99	5,99	0,99	6,61	0,99	6,78	0,99	6,15
10	4,84	0,99	5,56	0,98	6,4	0,99	6,43	0,99	5,81
12	4,64	0,99	5,17	0,99	6,08	0,99	5,98	0,99	5,47

Selon le tableau (2.9), on observe une relation inverse entre la rugosité absolue (ϵ) et la pente du droit d'ajustement (e), c.à.d. plus la rugosité absolue (ϵ) est augmentée, plus la pente (e) est diminuée. Pour déterminer la relation entre les deux paramètres, nous avons tracés la répartition de la pente moyenne (e) en fonction de la rugosité relative (ϵ/b), commue illustre dans le graphique suivant :

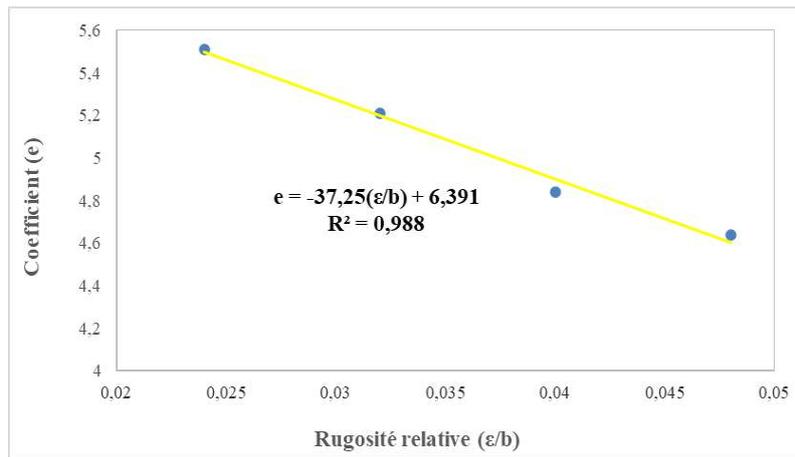


Figure 2. 15 : Relation entre le coefficient (e) et la rugosité relative (ϵ/b).

L'ajustement des données des couples des valeurs ((ϵ/b) , e) par la méthode des moindres carrés a abouti à une droite unique, représentée par la relation : $e = 6,391 - 37,25 (\epsilon/b)$.

En effet, en remplaçant la pente (e) par leur expression dans la relation de (L_j/h_1), on trouve l'équation suivante :

$$L_j/h_1 = (6,391 - 37,25 (\epsilon/b)) Fr_1 \quad (2.5)$$

Pour : $0,024 \leq \epsilon/b \leq 0,048$.

La figure (2.16) montre que l'équation $L_j/h_1 = \Theta (Fr_1, (\epsilon/b))$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice.

Chapitre II : Résultats et discussions

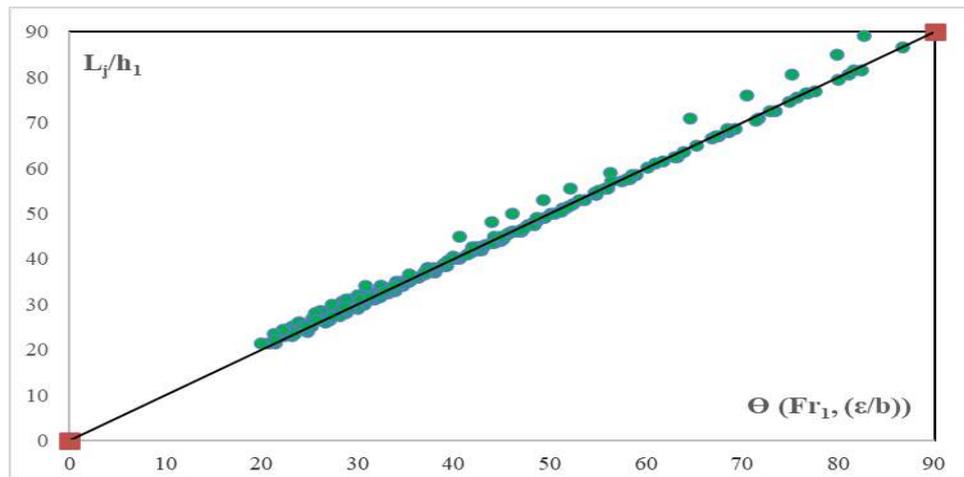


Figure 2. 16 : Relation entre la longueur du ressaut relative et la fonction de $\Theta (Fr_1, (\epsilon/b))$. (—) Première bissectrice d'équation $L_j/h_1 = (6,391 - 37,25 (\epsilon/b)) Fr_1$.

Le tableau (2.10) indique les valeurs expérimentales qui permet l'édition de la courbe de la figure (2.16) :

Tableau 2. 10 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $L_j/h_1 = \Theta (Fr_1, (\epsilon/b))$.

L_j/h_{1exp}	Fr_1	L_j/h_{1rel}	$\Delta L_j/h_1$ (%)	L_j/h_{1exp}	Fr_1	L_j/h_{1rel}	$\Delta L_j/h_1$ (%)	L_j/h_{1exp}	Fr_1	L_j/h_{1rel}	$\Delta L_j/h_1$ (%)	L_j/h_{1exp}	Fr_1	L_j/h_{1rel}	$\Delta L_j/h_1$ (%)
67	12,2	78,23	16,7	37	5,98	38,22	3,3	76,5	14,3	75,62	1,13	29	4,29	27,47	5,25
33,5	5,76	36,8	9,87	24	3,86	24,7	2,91	35	5,41	34,57	1,2	92	11,9	87,11	5,3
50,5	8,63	55,2	9,31	26	4,16	26,58	2,26	28	4,32	27,65	1,22	24,5	3,62	23,17	5,39
53	9	57,54	8,57	27,5	4,4	28,11	2,24	40,5	6,25	39,95	1,35	32,5	4,8	30,72	5,46
32	5,41	34,57	8,05	32,5	5,19	33,17	2,07	38	5,84	37,37	1,64	31	4,57	29,2	5,77
44	7,41	47,4	7,73	33	5,23	33,48	1,45	80,5	16,9	79,11	1,72	85	10,9	79,82	6,08
49	8,19	52,39	6,92	42	6,66	42,58	1,39	36	5,53	35,35	1,79	55,5	7,11	52,05	6,2
35	5,84	37,36	6,77	31	4,9	31,36	1,16	72,5	13,2	70,84	2,28	32	4,69	29,99	6,25
51,5	8,59	54,94	6,69	34,5	5,45	34,85	1,02	23	3,5	22,37	2,73	80,5	10,2	75,08	6,72
46	7,61	48,63	5,72	41	6,48	41,4	0,99	26,5	4,03	25,77	2,73	53	6,73	49,31	6,95
46,5	7,68	49,13	5,65	23	3,62	23,17	0,77	36,5	5,53	35,35	3,13	89	11,3	82,71	7,05
33	5,45	34,85	5,6	24,5	3,85	24,64	0,57	33,5	5,06	32,39	3,29	76	9,62	70,44	7,31
26,5	4,37	27,96	5,52	35,6	5,58	35,68	0,24	25	3,77	24,11	3,55	50	6,29	46,08	7,82
41,5	6,85	43,77	5,47	40	6,25	39,95	0,12	32,5	4,9	31,32	3,62	48	6	43,97	8,38
31,5	5,19	33,2	5,41	38	5,93	37,94	0,15	21,5	3,23	20,67	3,83	30	4,28	27,35	8,82
30	4,94	31,58	5,28	21,5	3,35	21,46	0,18	26,5	3,97	25,38	4,2	34	4,8	30,72	9,62
25	4,09	26,13	4,53	37,5	5,84	37,37	0,33	30,5	4,57	29,2	4,23	68,5	8,39	61,45	10,2
38,5	6,29	40,24	4,51	31,5	4,9	31,32	0,56	59	7,68	56,26	4,63	27	3,74	23,9	11,4
36,5	5,93	37,94	3,94	31	4,81	30,78	0,68	34	5,06	32,39	4,71	42,5	5,1	37,34	12,1
44,5	7,22	46,18	3,78	29,5	4,57	29,2	0,98	34	5,06	32,39	4,72	61	7,22	52,88	13,2
29	4,69	29,99	3,42	28	4,33	27,71	1	31,5	4,69	29,99	4,77	57	6,6	48,36	15,1
43,5	7,03	44,97	3,38	81,5	15,4	80,58	1,11	30	4,44	28,43	5,23	29,5	2,55	28,69	2,71

Chapitre II : Résultats et discussions

Dans la majorité des cas, presque 93%, la différence entre les données de la longueur relative du ressaut calculées par l'équation (2.5) et les données mesurées est moindre à 10%.

II.3.3. Longueur relative du rouleau (L_r/h_1)

La figure (2.17) représente les points de mesures expérimentales de la longueur relative du rouleau (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude (Fr_1) de l'écoulement incident et leurs ajustements, avec quatre ouvertures de la vanne, tels que : $h_1=2, 3, 4$ et 5 cm.

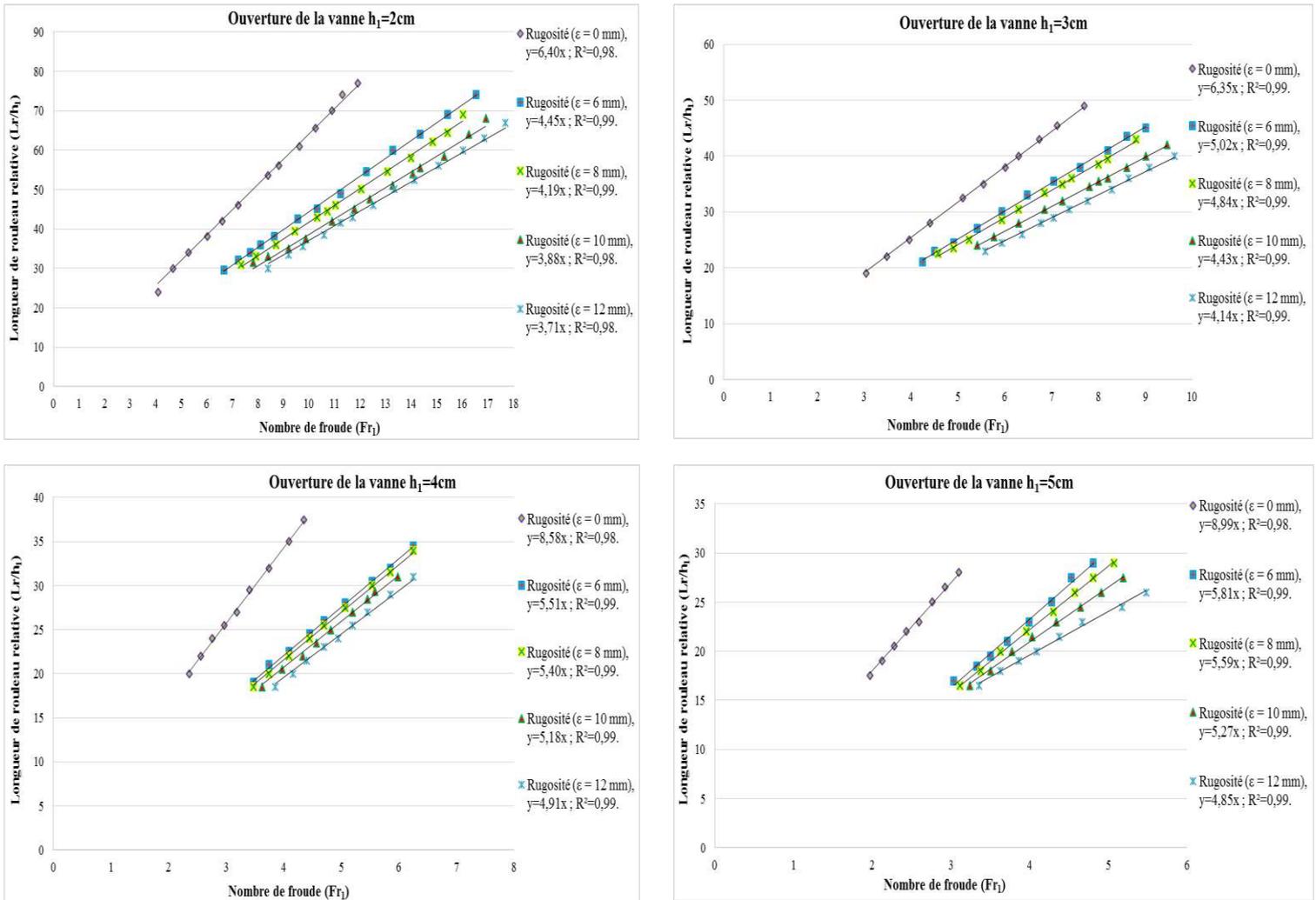


Figure 2. 17 : Relation entre la longueur du rouleau relative et le nombre de Froude, dans le cas aux parois rugueuses. (—) Courbes d'ajustements.

Selon la figure (2.17), on remarque les suivantes :

- ❖ Pour chaque série de mesure, à chaque fois que l'ouverture de la vanne et la valeur de la rugosité absolue augmente, provoque la diminution du nombre de Froude (Fr_1) et la longueur relative du rouleau (L_r/h_1). Cette diminution est expliquée par l'effet les deux

Chapitre II : Résultats et discussions

paramètres qui tendent à diminuer la vitesse de la partie amont, et par conséquent engendre la diminution de la longueur du rouleau (L_r).

- ❖ Un nuage de points, correspondant chacun à une valeur bien connue de la rugosité absolue (ϵ). Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés, qui a montré que la variation de la longueur relative du rouleau (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude (Fr_1) est de type linéaire, sous forme droite passe par l'origine, et ça relation donnée par la suivante : $L_r/h_1 = k Fr_1$.

Le tableau (2.11) : regroupe la valeur de la pente (k) pour les différents droites d'ajustement.

Tableau 2. 11 : Valeur de la pente (k) pour les différents droites d'ajustement.

Rugosité ϵ (mm)	Ouverture de la vanne $h_1=2\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=3\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=4\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=5\text{cm}$		Moyen k
	k	R^2	k	R^2	k	R^2	k	R^2	
06	4,45	0,99	5,02	0,99	5,51	0,99	5,81	0,99	5,19
08	4,19	0,99	4,84	0,99	5,4	0,99	5,59	0,99	5,01
10	3,88	0,98	4,43	0,99	5,18	0,99	5,27	0,99	4,69
12	3,71	0,98	4,14	0,99	4,91	0,99	4,85	0,99	4,4

Selon le tableau (2.11), on observe une relation inverse entre la rugosité absolue (ϵ) et la pente du droit d'ajustement (k), c.à.d. plus la rugosité absolue (ϵ) est augmentée, plus la pente (k) est diminuée. Pour déterminer la relation entre les deux paramètres, nous avons tracés la répartition de la pente moyenne (k) en fonction de la rugosité relative (ϵ/b), commue illustre dans le graphique suivant :

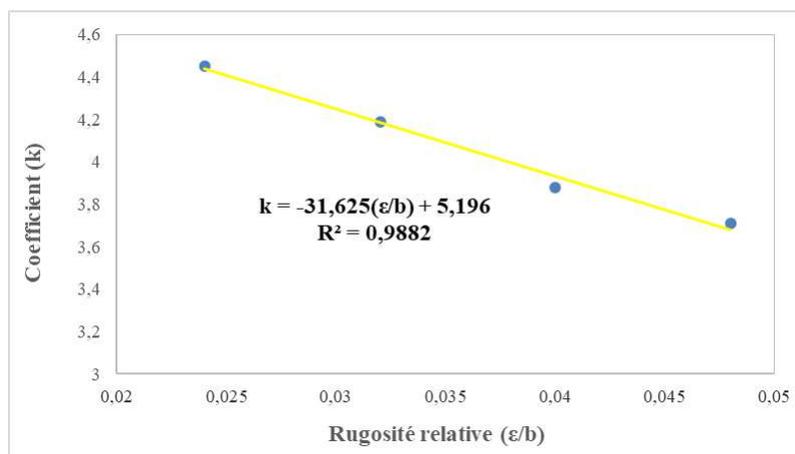


Figure 2. 18 : Relation entre le coefficient (k) et la rugosité relative (ϵ/b).

L'ajustement des données des couples des valeurs ($(\epsilon/b), k$) par la méthode des moindres carrés a abouti à une droite unique, représentée par la relation : $k = 5,196 - 31,625 (\epsilon/b)$.

Chapitre II : Résultats et discussions

En effet, en remplaçant la pente (k) par leur expression dans la relation de (L_r/h_1), on trouve l'équation suivante :

$$L_r/h_1 = (5,196 - 31,625 (\varepsilon/b)) Fr_1 \quad (2.6)$$

Pour : $0,024 \leq \varepsilon/b \leq 0,048$.

La figure (2.19) montre que l'équation $L_r/h_1 = \beta(Fr_1, (\varepsilon/b))$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces points suivent parfaitement la première bissectrice.

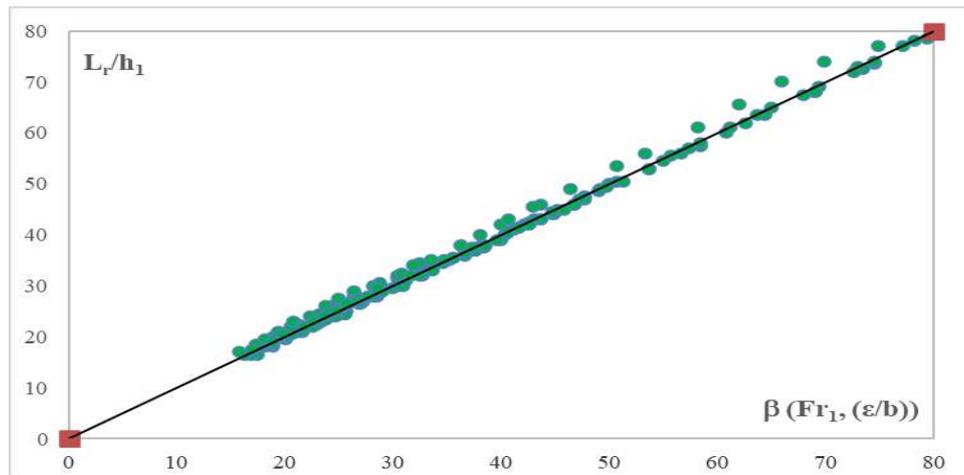


Figure 2. 19 : Relation entre la longueur du rouleau relative et la fonction de $\beta(Fr_1, (\varepsilon/b))$. (—) Première bissectrice d'équation $L_r/h_1 = (5,196 - 31,625 (\varepsilon/b)) Fr_1$.

Le tableau (2.12) indique les valeurs expérimentales qui permet l'édition de la courbe de la figure (2.19) :

Tableau 2. 12 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la fonction $L_r/h_1 = \beta(Fr_1, (\varepsilon/b))$.

L_r/h_{1exp}	Fr_1	L_r/h_{1rel}	$\Delta L_r/h_1$ (%)	L_r/h_{1exp}	Fr_1	L_r/h_{1rel}	$\Delta L_r/h_1$ (%)	L_r/h_{1exp}	Fr_1	L_r/h_{1rel}	$\Delta L_r/h_1$ (%)	L_r/h_{1exp}	Fr_1	L_r/h_{1rel}	$\Delta L_r/h_1$ (%)
20	2,35	19,28	3,57	25	3,96	23,94	4,22	29	4,8	24,98	13,8	33	6,48	33,66	2,01
17	3,03	15,77	7,17	23	3,99	20,76	9,73	24,5	4,9	25,46	3,94	42	6,6	39,9	4,97
19	3,04	18,35	3,37	21,5	4,03	20,95	2,53	26	4,9	25,49	1,93	43	6,73	40,69	5,36
16,5	3,11	16,17	1,93	22	4,09	21,24	3,41	24	4,94	25,67	6,99	33,5	6,85	35,58	6,23
16,5	3,23	16,81	1,87	20	4,16	21,61	8,08	27,5	5,06	26,33	4,22	35,5	7,03	36,56	2,99
18,5	3,32	17,26	6,66	21	4,24	22,07	5,1	32,5	5,1	30,81	5,17	45,5	7,11	42,95	5,58
16,5	3,35	17,44	5,74	25	4,28	22,23	11	24,5	5,17	26,86	9,64	46	7,22	43,64	5,12
18	3,37	17,54	2,54	24	4,29	22,33	6,92	25,5	5,19	26,99	5,86	36	7,41	38,53	7,05
18,5	3,47	18,02	2,55	22	4,32	22,48	2,2	25	5,23	27,21	8,87	38	7,61	39,54	4,05
19	3,47	18,02	5,11	23	4,33	22,53	2,01	34	5,27	31,84	6,33	49	7,68	46,42	5,24
22	3,47	20,99	4,54	21,5	4,37	22,73	5,74	27	5,41	28,11	4,12	38,5	8	41,56	7,96
18	3,5	18,18	1,04	28	4,4	26,62	4,91	27	5,45	28,33	4,94	53,5	8,39	50,71	5,2
19,5	3,5	18,19	6,71	24	4,44	23,11	3,68	26	5,48	28,46	9,49	43,5	8,59	44,67	2,69

18	3,62	18,84	4,68	23	4,5	23,41	1,78	30	5,53	28,74	4,19	45	9	46,78	3,96
18,5	3,62	18,84	1,86	27,5	4,53	23,54	14,3	35	5,55	33,51	4,23	61	9,62	58,12	4,7
21	3,71	19,31	8	26	4,57	23,74	8,66	29,35	5,58	29,01	1,14	65,5	10,2	61,96	5,4
20	3,74	19,43	2,81	22,5	4,57	23,74	5,54	31,5	5,84	30,38	3,53	70	10,9	65,87	5,89
21	3,74	19,43	7,43	24,5	4,64	24,15	1,4	30	5,93	30,84	2,82	74	11,3	68,25	7,75
20	3,77	19,6	1,98	23	4,66	24,25	5,46	38	6	36,28	4,5	77	11,9	71,88	6,63
18,5	3,85	20,03	8,28	25,5	4,69	24,38	4,36	34	6,25	32,47	4,47	60	13,2	68,97	14,9
19	3,86	20,08	5,69	26	4,69	24,38	6,2	34,5	6,25	32,48	5,85	69	15,4	80,15	16,1
22	3,95	20,56	6,51	27,5	4,8	24,97	9,16	40	6,29	38,02	4,92	74	16,5	85,94	16,2

Dans la plupart des cas, environ 94%, la différence entre les données de la longueur relative du rouleau calculées par l'équation (2.6) et les données mesurées est moindre à 10%.

II.3.4. Rendement du ressaut hydraulique

La figure (2.20) indique que les points de mesure du ressaut contrôlé par seuil sont au-dessus de leurs homologues contrôlés pour une gamme des nombres de Froude incident $2 < Fr_1 < 12$. Cependant, pour les nombres de Froude $Fr_1 > 12$, tous les points de mesures tendent à se rejoindre pour former un seul nuage de points.

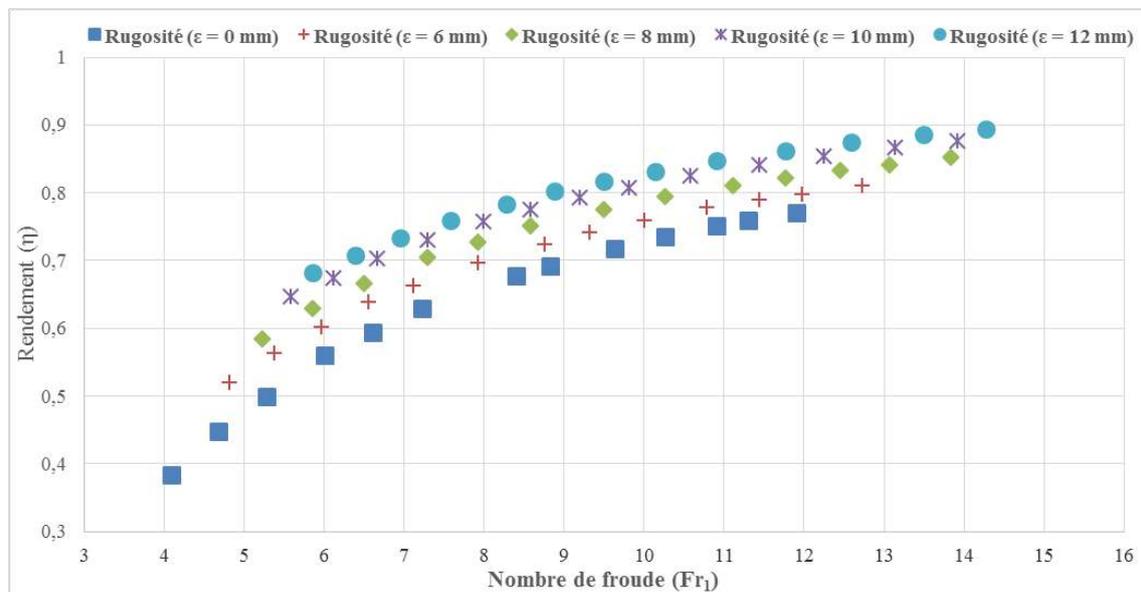


Figure 2. 20 : Relation entre le rendement du ressaut et le nombre de Froude, dans le cas aux parois rugueuses.

En outre, la figure (2.20) montre que la dissipation de la charge hydraulique croît avec l'augmentation de la rugosité. Néanmoins, pour des nombres de Froude élevés, les points de mesure se rejoignent et l'effet de la rugosité s'atténue. Ceci peut être expliqué par le fait qu'au-delà d'un certain nombre de Froude pratique, le ressaut devient clapoteux et ne peut adhérer constamment au fond canal (Selon la classification de Bradley et Peterka, 1957).

II.4. Comparaison analytique des résultats

Nous avons discuté dans ce sous-titre une comparaison analytique des résultats attendus par les essais expérimentaux, entre les deux configurations étudiées par rapport à fond lisse pour tous les paramètres pris en compte.

II.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées (Y)

On constate pour les trois configurations, que les équations déterminés la valeur du paramètre des hauteurs conjuguées (Y) sont de type linéaire. Comme indiqué dans le graphique ci-dessous :

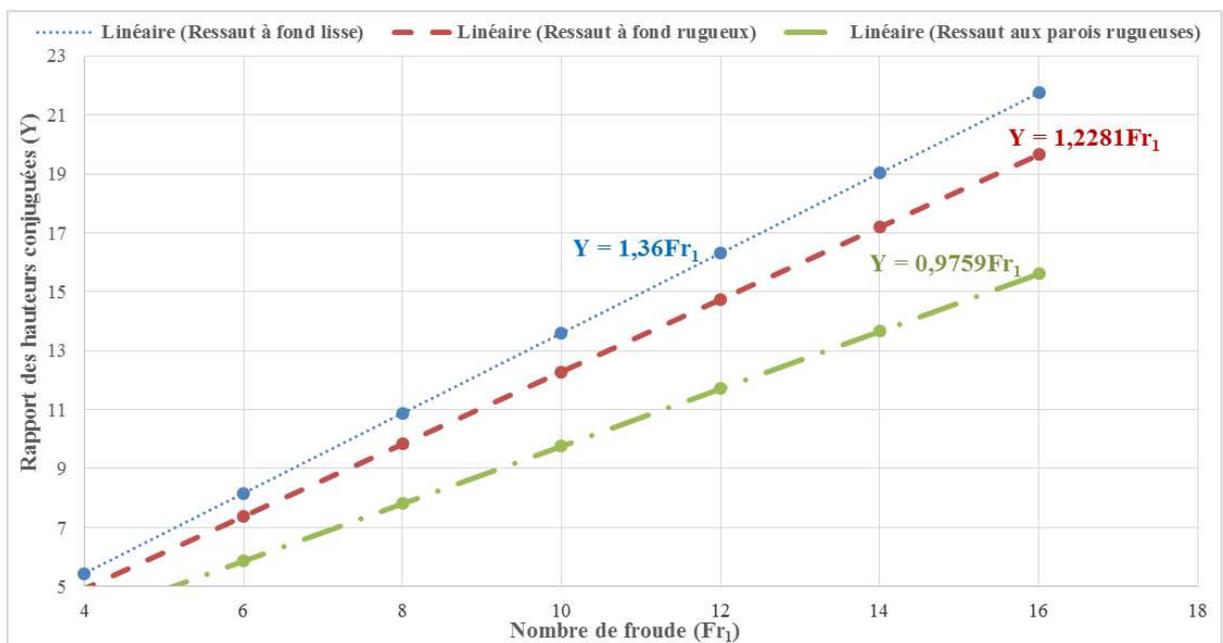


Figure 2. 21 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude, dans les cas testés.

L'interprétation graphiquement des mesures obtenues pour un nombre du Froude semblable, permet d'admettre que la courbe tracée pour la configuration aux parois rugueuses est déplacée vers le bas par rapport aux deux configurations. Ce déplacement s'explique par l'impact de la rugosité sur ce paramètre.

L'ajustement des résultats par la méthode de moindres carrés a abouti aux relations linéaires (2.1) et (2.4) de la forme : $Y = n Fr_1$.

Tableau 2. 13 : Valeurs de coefficient (n).

	Propriété lisse	Propriété à fond rugueux	Propriété aux parois rugueuses
n	1,36	1,22	0,97

II.4.2. Longueur relative du ressaut (L_j/h_1)

Pour les trois propriétés, on trouve que les relations identifiées pour avoir la longueur du ressaut sont de forme linéaire. La figure (2.22) représenté cette explication :

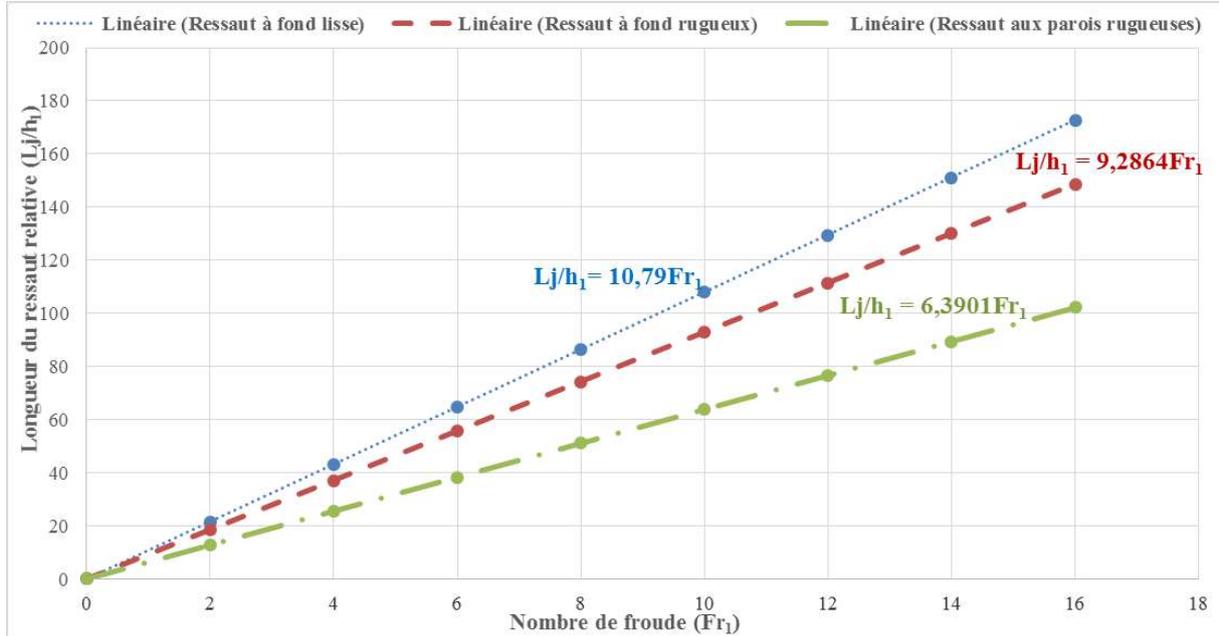


Figure 2. 22 : Relation entre la longueur du ressaut relative et le nombre du Froude, dans les cas testés.

Analysé graphiquement des résultats pour un nombre du Froude identique, permet de dire que la courbe trace pour la propriété aux parois rugueuses est déplacé vers le bas par rapport les deux propriétés. Dans ce contexte en déduire qu'il faut un débit important pour assure la création du ressaut.

L'adaptation des mesures obtenues par le procédé des moindres carrés, accepte d'exprimer le type des lignes traces : $L_j/h_1 = m Fr_1$.

Tableau 2. 14 : Valeurs de coefficient (m).

	Propriété lisse	Propriété à fond rugueux	Propriété aux parois rugueuses
m	10,79	9,28	6,39

II.4.3. Longueur relative du rouleau (L_r/h_1)

Le type des équations reconnues pour évaluer ce paramètre est linéaire, pour les trois propriétés traitées.

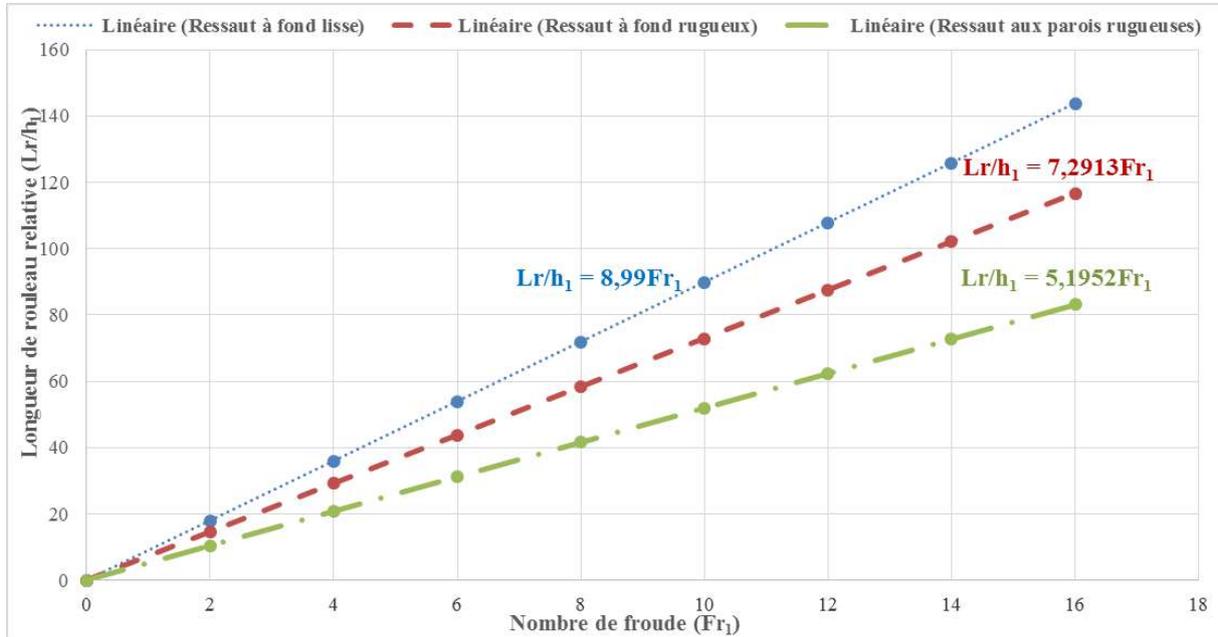


Figure 2.23 : Relation entre la longueur du rouleau relative et le nombre de Froude, dans les cas testés.

La comparaison graphique entre les trois courbes permet d'observer que la propriété aux parois rugueuses décalé par rapport les autres propriétés, ce que dire la présence de la rugosité reste toujours un impact sur cette longueur.

L'analyse des résultats par la méthode de moindre carré a aboutie aux relations linéaires (2.3) et (2.6) de la forme : $Y = s Fr_1$.

Tableau 2.15 : Valeurs de coefficient (s).

	Propriété lisse	Propriété à fond rugueux	Propriété aux parois rugueuses
s	8,99	7,29	5,19

II.4.4. Rendement du ressaut hydraulique

L'énergie déchargé par les trois configurations analysées est rapportée dans le graphique suivant sous forme des courbes, pour faciliter de lisible la différence et faire la comparaison entre les trois propriétés.

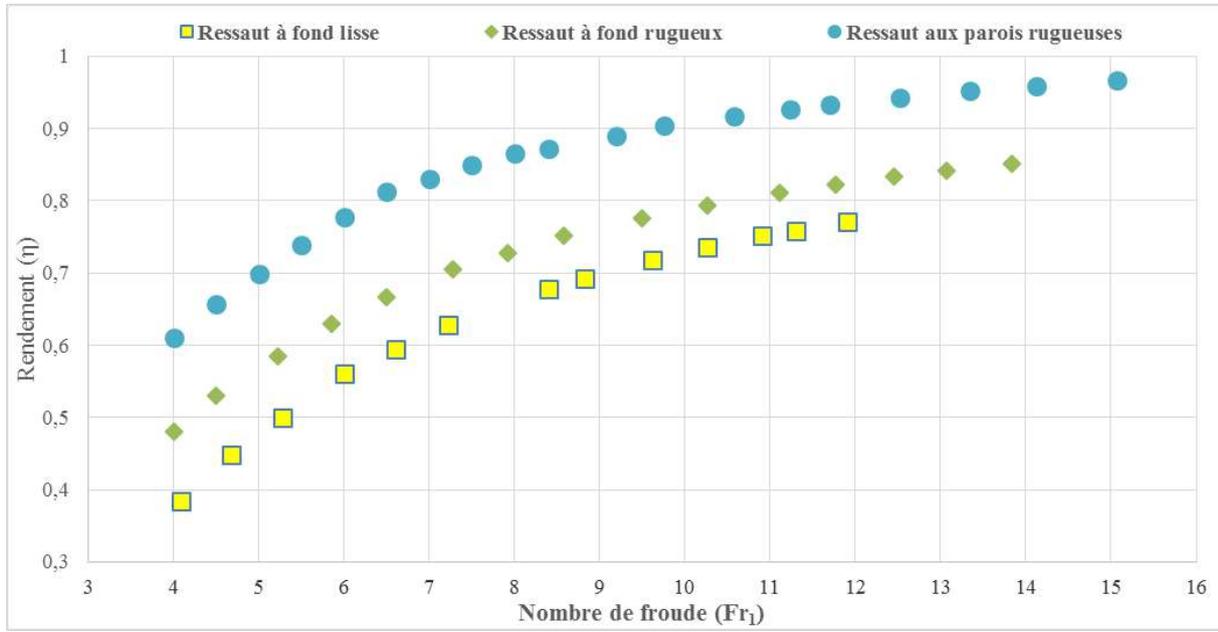


Figure 2.24 : Relation entre le rendement du ressaut et le nombre de Froude, dans les cas testés.

Si en prend une valeur du (Fr_1) dans l'axe des abscisses et projeter sur les trois courbes, on trouve dans l'axe des ordonnées que le pourcentage de décharge d'énergie est élevé pour la propriété aux parois rugueuses par rapport les autres.

II.5. Exemple d'application

Un ressaut hydraulique crée dans un canal rectangulaire de largeur $b = 3\text{m}$. Déterminer les paramètres du ressaut, sachant que la hauteur conjuguée initiale $h_1 = 1\text{m}$, le débit circulé $Q = 20\text{ m}^3/\text{s}$ et la rugosité absolue $\varepsilon = 12\text{ mm}$.

- **Evaluation du nombre de Froude (Fr_1)**

La formule de ce paramètre adimensionnel (Fr_1) pour un canal rectangulaire est donné dans le suivant :

$$Fr_1 = \left[\frac{Q^2}{gb^2h_1^3} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Après le remplacement la valeur de chaque entité on trouve : $Fr_1 = 2,13$.

II.5.1. Ressaut à fond rugueux

- **Rapport des hauteurs conjuguées (Y)**

Il calcul à partir d'équation (2.1), si on a remplacé les valeurs de (Fr_1) et (ε/b) dans cette relation en trouve :

$$Y = (1,2288 - 4,2188 (\varepsilon/b)) Fr_1 \Rightarrow Y = (1,2288 - 4,2188(0,012/3)) * 2,13 \text{ donc } Y = 2,58.$$

- **Longueur relative du ressaut hydraulique (L_j/h_1)**

Pour obtenue la valeur de (L_j/h_1), nous avons appliqué l'équation (2.2), si on a remplacé les valeurs de (Fr_1) et (ε/b) dans cette relation en trouve :

$$L_j/h_1 = (9,2873 - 33,5 (\varepsilon/b)) Fr_1 \Rightarrow L_j/h_1 = (9,2873 - 33,5(0,012/3)) * 2,13 \text{ donc } L_j/h_1 = 19,5.$$

- **Longueur relative du ressaut hydraulique (L_r/h_1)**

L'application d'équation (2.3) permet de déterminer le rapport (L_r/h_1), si on a remplacé les valeurs de (Fr_1) et (ε/b) dans cette relation en trouve :

$$L_r/h_1 = (7,2918 - 21,75 (\varepsilon/b)) Fr_1 \Rightarrow L_r/h_1 = (7,2918 - 21,75(0,012/3)) * 2,13 \text{ donc } L_r/h_1 = 15,3.$$

II.5.2. Ressaut aux parois rugueuses

- **Rapport des hauteurs conjuguées (Y)**

Il calcul à partir d'équation (2.4), si on a remplacé les valeurs de (Fr_1) et (ε/b) dans cette relation en trouve :

$$Y = (0,976 - 4,125 (\varepsilon/b)) Fr_1 \Rightarrow Y = (0,976 - 4,125(0,012/3)) * 2,13 \text{ donc } Y = 2,04.$$

- **Longueur relative du ressaut hydraulique (L_j/h_1)**

Pour obtenue la valeur de (L_j/h_1), nous avons appliqué l'équation (2.5), si on a remplacé les valeurs de (Fr_1) et (ε/b) dans cette relation en trouve :

$L_j/h_1 = (6,391 - 37,25 (\varepsilon/b)) Fr_1 \Rightarrow L_j/h_1 = (6,391 - 37,25(0,012/3)) * 2,13$ donc $L_j/h_1 = 13,3$.

- **Longueur relative du ressaut hydraulique (L_r/h_1)**

L'application d'équation (2.6) permet de déterminer le rapport (L_r/h_1), si on a remplacé les valeurs de (Fr_1) et (ε/b) dans cette relation on trouve :

$L_r/h_1 = (5,196 - 31,625 (\varepsilon/b)) Fr_1 \Rightarrow L_r/h_1 = (5,196 - 31,625(0,012/3)) * 2,13$ donc $L_r/h_1 = 10,8$.

La comparaison des résultats calculés pour le même $Fr_1 = 2,13$ et la rugosité $\varepsilon = 12$ mm, permet de remarquer que la longueur (L_j/h_1) pour la propriété aux parois rugueuses est réduit de **32%** par rapport à fond rugueux.

II.6. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons étudié et analysé les résultats expérimentaux de deux types de ressaut hydraulique, à savoir, le ressaut hydraulique contrôlé, d'un part évoluant dans un canal rectangulaire à fond rugueux, et d'autre part aux parois rugueuses.

Il a été démontré que la variation des rapports des hauteurs conjuguées (Y), la longueur relative du ressaut hydraulique (L_j/h_1) et la longueur relative du ressaut hydraulique (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude (Fr_1) pour les deux types de ressaut hydraulique étudiés, est de type linéaire.

Les essais ont permis de montrer l'influence de la rugosité absolue sur les longueurs géométriques du ressaut et le rapport des hauteurs conjuguées. Celle ces décroît avec l'accroissement de la rugosité absolue.

La comparaison analytique des résultats, entre les deux configurations de ressaut, a montré que le ressaut évoluant dans un canal aux parois rugueuses a plus d'avantage que à fond rugueux.

L'interprétation des résultats expérimentaux indiquer que le ressaut évoluant dans un canal aux parois rugueuses dissipe mieux la charge que à fond rugueux.



Conclusion
à la deuxième
partie

Conclusion à la deuxième partie

Dans cette partie, nous sommes intéressés à l'analyser les résultats expérimentaux obtenus par plusieurs graphiques, illustrant les équations adimensionnelles résultantes, sont tracés. Ces équations liant la position du ressaut hydraulique étudié aux divers paramètres qui régissent le phénomène, suite à quoi des formules ont été proposées, ces dernières mettent en jeu des paramètres tantôt dimensionnels tantôt sans dimensions tout en ayant un bon coefficient de corrélation et une erreur quadratique minimale.

Les équations trouvées sont satisfaites pour déterminer le dimensionnement de l'ouvrage de déchargé d'énergie.

L'expérimentation a montré qu'en présence de rugosité, les ressauts étaient plus stables, de distances plus courtes et de dissipations d'énergie plus importantes démontrant la conséquence positive de la rugosité sur le ressaut hydraulique.

La comparaison analytique a été examinée dans le chapitre deux de la partie expérimentale, dans l'objet d'identifier la configuration du mieux rentable et avantageux. Toutes ces comparaisons nous ont permis de valider notre choix entre tel ou tel type de ressaut hydraulique.



*Troisième
partie
Approche
théorique*

Introduction à la troisième partie

L'approche théorique est une partie importante pour développer et trouver un 'équation fonctionnelle relié les différents paramètres variables géométriques du canal et le ressaut hydraulique étudié. L'équation proposée est exprimée en terme adimensionnels afin de lui donner un caractère de validité général.

Deux chapitres on prend en considération dans cette partie. Au début nous avons traité le phénomène étudié théoriquement.

Le second nous avons ajusté à l'issue des données expérimentaux obtenus dans notre travail la relation qui est tirée par le développement théorique de l'équation de quantité de mouvement.



Chapitre I :
Développement
théorique

Chapitre I : Développement théorique

I.1. Introduction

La revue de la littérature montre que les caractéristiques adimensionnelles intervenant au phénomène du ressaut sont essentielles, le nombre de Froude de l'écoulement incident (Fr_1), les hauteurs initiale (h_1) et finale (h_2) du ressaut et le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut (Y).

L'objectif principale est d'établir une relation théorique entre des paramètres adimensionnels hydrauliques et géométriques traduites respectivement par les conditions amont et aval de l'écoulement et la nature de l'ouvrage de contrôle entre autres la hauteur en amont de l'ouvrage et le nombre de Froude et l'effet de la rugosité.

I.2. Analyse théorique

Le ressaut étudié est créé dans un canal rectangulaire, il se manifeste par une brusque surélévation d'un courant permanent, on passe à un régime de l'écoulement torrentiel à l'entrée de canal au régime fluvial à la sortie, cette transition s'appelle ressaut hydraulique. Selon cette définition, on identifie trois parties à différents caractérisés :

- La partie à l'amont du ressaut caractérise par : la hauteur conjuguée initiale (h_1) ; le nombre de Froude (Fr_1) représente la relation entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation des petites perturbations ; (ΔX) la distance sur laquelle le ressaut s'étend augmente également et pour ramener celui-ci dans sa position initiale.
- La partie transition caractérise par : la longueur de rouleau (L_r) ; la longueur du ressaut (L_j).
- La partie à l'aval du ressaut caractérise par : la hauteur conjuguée finale (h_2) ; la hauteur du seuil (h_s).

Dans notre cas les propriétés des parois de canal utilisé sont rugueuses, avec (C_R) est exprimer le coefficient de la rugosité.

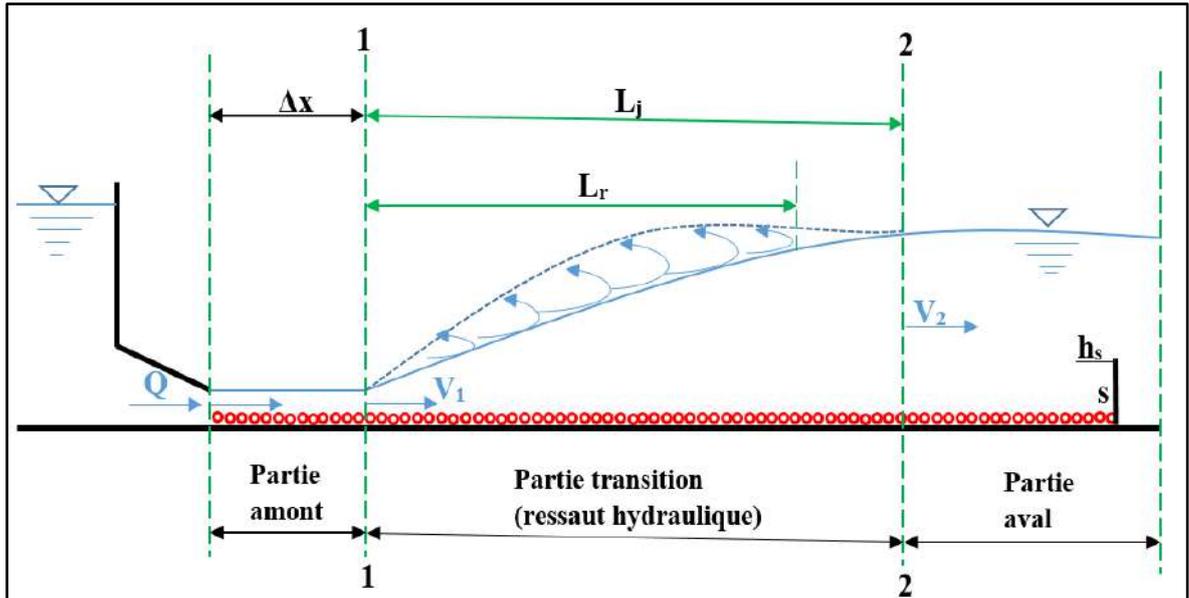


Figure 1. 1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par un seuil dans un canal rectangulaire aux parois rugueuses.

Pour la résolution du problème posé on a utilisé le théorème d'Euler, et donc l'application de la loi de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut sera égale à la somme des forces extérieures énergétique sur l'écoulement d'où l'importance de l'équation de continuité.

$$F_1 - F_2 - F_R = \rho QV_2 - \rho QV_1 \quad (1.1)$$

Où :

ρ : la masse volumique du liquide ;

Q : le débit écoule dans le canal ;

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

Les vitesses : $V_1 = \frac{Q}{bh_1}$ et $V_2 = \frac{Q}{bh_2}$ (1.2)

Chapitre I : Développement théorique

D'après Bélanger (1841) et Hager (1980), l'application du théorème d'Euler nécessite quelques hypothèses simplificatrices :

- ✓ La répartition pression hydrostatique dans les sections amont et aval, et la répartition des vitesses en profil verticale est uniforme ;
- ✓ Les frottements entre les particules d'eau sont négligeables ;
- ✓ La pente du canal est faible ou presque nulle ;
- ✓ La résistance de l'air est négligeable, et l'écoulement est permanent.

Ainsi, les forces extérieures appliquées à la masse liquide en mouvement sont :

F_1 : la force de pression s'exerce sur la section amont du ressaut, $F_1 = P_1 A_1$

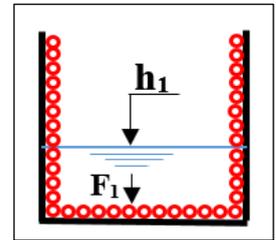
P_1 : la pression hydrostatique dans la section amont, $P_1 = \rho g \bar{h}_1$

\bar{h}_1 : la position de centre de gravité de section mouillée A_1 , $\bar{h}_1 = \frac{h_1}{2}$

A_1 : la section mouillée de la partie amont, $A_1 = h_1 b$

b : largeur de canal

En déduire : $F_1 = \rho g b \frac{h_1^2}{2}$ (1.3)



Vue de face de la partie amont.

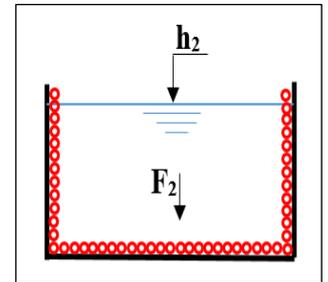
F_2 : la force de pression s'exerce sur la section aval du ressaut, $F_2 = P_2 A_2$

P_2 : la pression hydrostatique dans la section aval, $P_2 = \rho g \bar{h}_2$

\bar{h}_2 : la position de centre de gravité de section mouillée A_2 , $\bar{h}_2 = \frac{h_2}{2}$

A_2 : la section mouillée de la partie aval, $A_2 = h_2 b$

En déduire : $F_2 = \rho g b \frac{h_2^2}{2}$ (1.4)



Vue de face de la partie aval.

F_R : la force de résistance due à la rugosité des parois du canal, $F_R = C F_N$

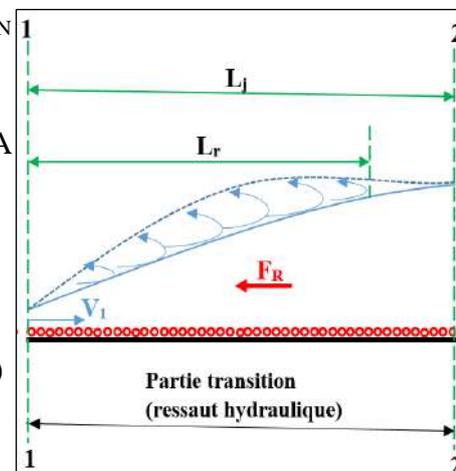
C : le coefficient de la rugosité

F_N : la force normale, dans notre cas égale la force de pression, $F_N = P_N A$

$P_N = \rho g \bar{h}$, on a : $\bar{h} = \frac{V_1^2}{2g}$

$A = L_j \cdot p$, p : périmètre mouillé du canal, $p = b + 2h_1$

En déduire : $F_R = C \rho g \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) L_j (b + 2h_1)$ (1.5)



En remplace (1.2), (1.3), (1.4) et (1.5) dans l'équation (1.1), on obtient la relation suivante :

$$\rho g b \left(\frac{h_1^2}{2} - \frac{h_2^2}{2} \right) = \rho Q^2 \left(\frac{1}{bh_2} - \frac{1}{bh_1} \right) + C \rho g L j \left(\frac{Q^2}{2gb^2h_1^2} \right) p \quad (1.6)$$

Y : étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, $Y = h_2/h_1 \Rightarrow h_2 = Y \cdot h_1$, en remplace la valeur de h_2 dans l'équation (1.6), on obtient la relation suivante :

$$\rho g b \left(\frac{h_1^2}{2} - \frac{Yh_1^2}{2} \right) = \rho Q^2 \left(\frac{1}{bYh_1} - \frac{1}{bh_1} \right) + C \rho g L j \left(\frac{Q^2}{2gb^2h_1^2} \right) p \quad (1.7)$$

On enlève ρ de deux côtés de l'équation (1.7) et prendre $\frac{Q^2}{bh_1}$ en facteur dans la deuxième partie de l'équation (1.7), alors cette dernière devient :

$$\begin{aligned} g b h_1^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{Y^2}{2} \right) &= \frac{Q^2}{bh_1} \left(\left(\frac{1}{Y} - 1 \right) + C L j \left(\frac{1}{2bh_1} \right) p \right) \Rightarrow \\ \left(\frac{1}{2} - \frac{Y^2}{2} \right) &= \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} \left(\left(\frac{1}{Y} - 1 \right) + C L j \left(\frac{1}{2bh_1} \right) p \right) \end{aligned} \quad (1.8)$$

Pour un canal rectangulaire $Fr_1^2 = \frac{Q^2}{gb^2h_1^3}$, en remplace dans l'équation (1.8) et devient :

$$\left(\frac{1}{2} - \frac{Y^2}{2} \right) = Fr_1^2 \left(\left(\frac{1}{Y} - 1 \right) + C L j \left(\frac{1}{2bh_1} \right) p \right) \quad (1.9)$$

$$\left(\frac{1}{2} - \frac{Y^2}{2} \right) = Fr_1^2 \left(\left(\frac{1}{Y} - 1 \right) + C L j \left(\frac{1}{2bh_1} \right) (2h_1 + b) \right) \Rightarrow$$

$$\left(\frac{1}{2} - \frac{Y^2}{2} \right) = Fr_1^2 \left(\left(\frac{1}{Y} - 1 \right) + C L j \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{2h_1} \right) \right) \Rightarrow$$

$$\frac{1}{2}(1 - Y^2) = Fr_1^2 \left(\left(\frac{1}{Y} - 1 \right) + C L j \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{2h_1} \right) \right) \quad (1.10)$$

On propose $K = \left(C L j \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{2h_1} \right) \right)$, l'équation (1.10) devient :

$$\frac{1}{2}(1-Y^2) = Fr_1^2 \left(\left(\frac{1}{Y} - 1 \right) + K \right) \Rightarrow (1-Y^2) = 2Fr_1^2 \left(\left(\frac{1}{Y} - 1 \right) + K \right) \quad (1.11)$$

On a $(1-Y^2) = (1-Y)(1+Y)$ remplacé cette valeur dans l'équation (1.11), et devient :

$$(1-Y)(1+Y) = 2Fr_1^2 \left(\left(\frac{1}{Y} - 1 \right) + K \right) \Rightarrow (1-Y)(1+Y) = 2Fr_1^2 \left(\left(\frac{1-Y}{Y} \right) + K \right) \quad (1.12)$$

Prendre $(1-Y)$ en facteur dans la deuxième partie de l'équation (1.12), et devient :

$$(1-Y)(1+Y) = (1-Y)2Fr_1^2 \left(\left(\frac{1}{Y} \right) + \frac{K}{(1-Y)} \right) \quad (1.13)$$

On enlève $(1-Y)$ de deux côtés de l'équation (1.13) :

$$(1+Y) = 2Fr_1^2 \left(\left(\frac{1}{Y} \right) + \frac{K}{(1-Y)} \right) \Rightarrow (1+Y) = \frac{2}{Y} Fr_1^2 \left(1 + \frac{YK}{(1-Y)} \right) \quad (1.14)$$

On propose $C_R = -\left(\frac{YK}{(Y-1)} \right)$, l'équation (1.14) devient :

$$(1+Y) = \frac{2}{Y} Fr_1^2 (1 - C_R) \Rightarrow Y(1+Y) = 2Fr_1^2 (1 - C_R) \Rightarrow Y^2 + Y = 2Fr_1^2 - 2Fr_1^2 C_R \quad (1.15)$$

Multiple l'équation (1.15) fois 4, on obtient :

$$4Y^2 + 4Y = 8Fr_1^2 - 8Fr_1^2 C_R \quad (1.16)$$

Ajoute 1 dans les deux côtés l'équation (1.16) :

$$4Y^2 + 4Y + 1 = 8Fr_1^2 - 8Fr_1^2 C_R + 1 \Rightarrow (2Y + 1)^2 = 8Fr_1^2 - 8Fr_1^2 C_R + 1 \Rightarrow$$

$$2Y + 1 = \sqrt{8Fr_1^2 - 8Fr_1^2 C_R + 1} \Rightarrow Y = \frac{1}{2} \sqrt{8Fr_1^2 - 8Fr_1^2 C_R + 1} - 1 \Rightarrow$$

$$Y = \frac{1}{2} \sqrt{8Fr_1^2 (1 - C_R) + 1} - 1 \quad (1.17)$$

Pour un coefficient C_R nul, l'expression (1.17) revient à l'équation de Bélanger (1841) pour la détermination des hauteurs conjuguées d'un ressaut hydraulique classique sans obstacle en aval.

$$Fr_1^2 = \frac{[(Y + 1)2]^2 - 1}{8}$$

I.3. Conclusion

L'équation théorique élaboré dans notre thèse permet d'écrire le paramètre des hauteurs conjuguées (Y) en relation le paramètre adimensionnel d'écoulement (Fr_1), et aussi en prend en considération l'impact de la rugosité des parois.

Il est primordial d'ajuster à l'issue de cette expérimentation la relation qui est tirée par l'analyser de deuxième loi de Newton de cas étudié.



Chapitre II :
Analyse
expérimentale de
l'équation
théorique

Chapitre II : Analyse expérimentale de l'équation théorique

II.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif principal d'analyser expérimentalement la relation théorique (1.17), développé au chapitre précédent, afin d'évaluer la relation qui lie le coefficient (C_R) de résistance à la rugosité relative (ε/b).

II.2. Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le coefficient de résistance et le nombre de Froude

L'équation théorique (1.17) étant implicite en (Y), nous avons trouvé une relation approchée qui permet de trouver aisément le rapport (Y) en fonction du coefficient (C_R) de résistance des parois du canal et du nombre de Froude (Fr_1) de l'écoulement incident.

La figure (2.1) montre un nuage de points qui suit parfaitement l'allure d'une courbe unique. L'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés non linéaire donne avec une très bonne corrélation la relation puissance suivante :

$$Y = 0,7348 Fr_1^{1,1644} (1 - C_R)^{0,5822} \quad (2.1)$$

$6 \leq \varepsilon(\text{mm}) \leq 12$

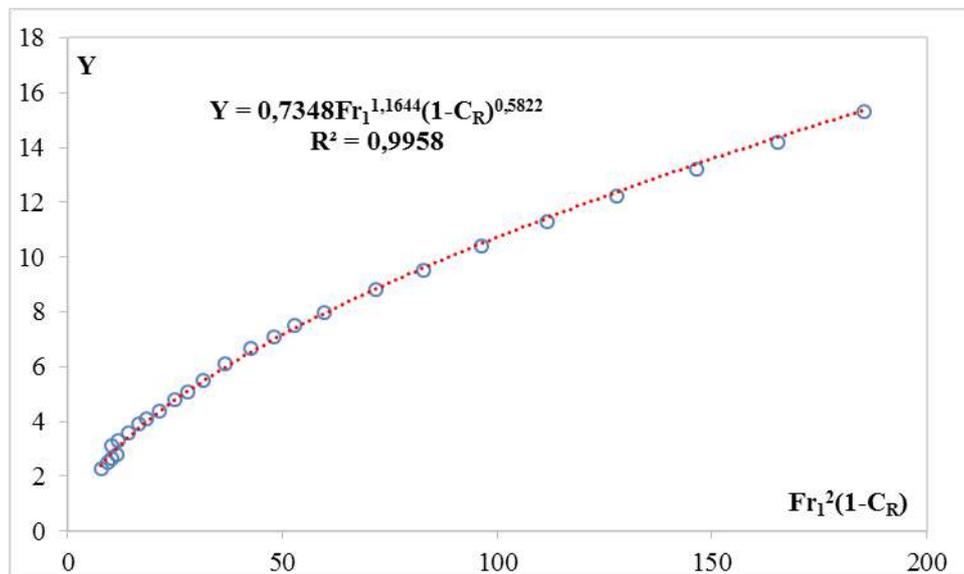


Figure 2. 1 : Relation entre le paramètre des hauteurs conjuguées et le terme $Fr_1^2 (1-C_R)$.

La figure (2.2) montre la comparaison du terme $(1-C_R)$ issue de l'équation théorique (1.17) avec celui de la relation approchée (2.1). On remarque que le nuage de points suit

parfaitement la première bissectrice, montrant ainsi que la relation (2.1) représente très bien la relation théorique.

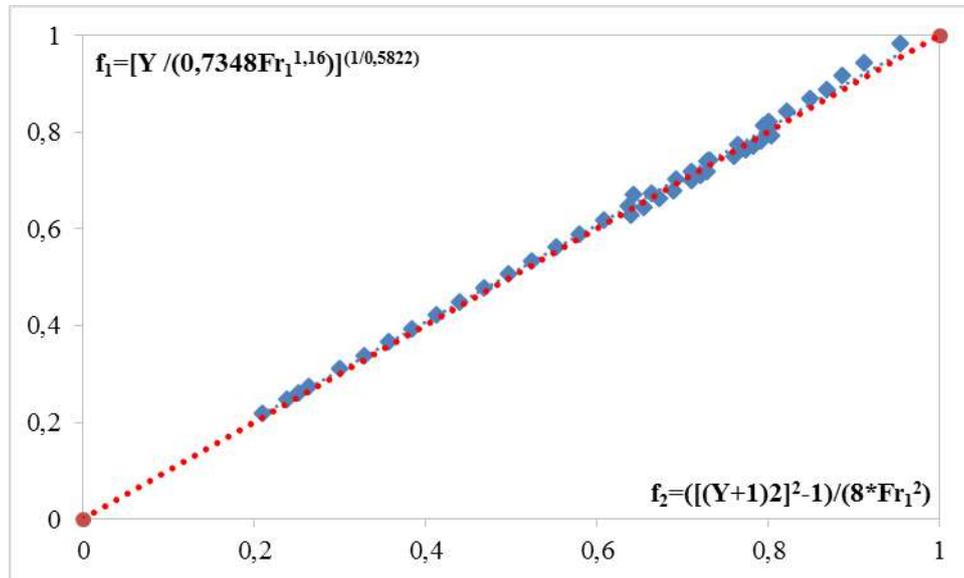


Figure 2. 2 : Relation entre le terme $(1-C_R)$ de l'équation f_1 et même terme de l'équation f_2 .

II.3. Relation entre le coefficient de résistance et la rugosité relative

Afin de trouver l'expression du coefficient (C_R) de résistance en fonction de la rugosité absolue (ε), nous allons représenter sur la figure (2.3), la variation du terme

$\frac{[(Y+1)^2 - 1]}{8}$ en fonction de Fr_1^2 pour les quatre ouvertures de la vannée :

h_1 (cm) = 2, 3, 4 et 5.

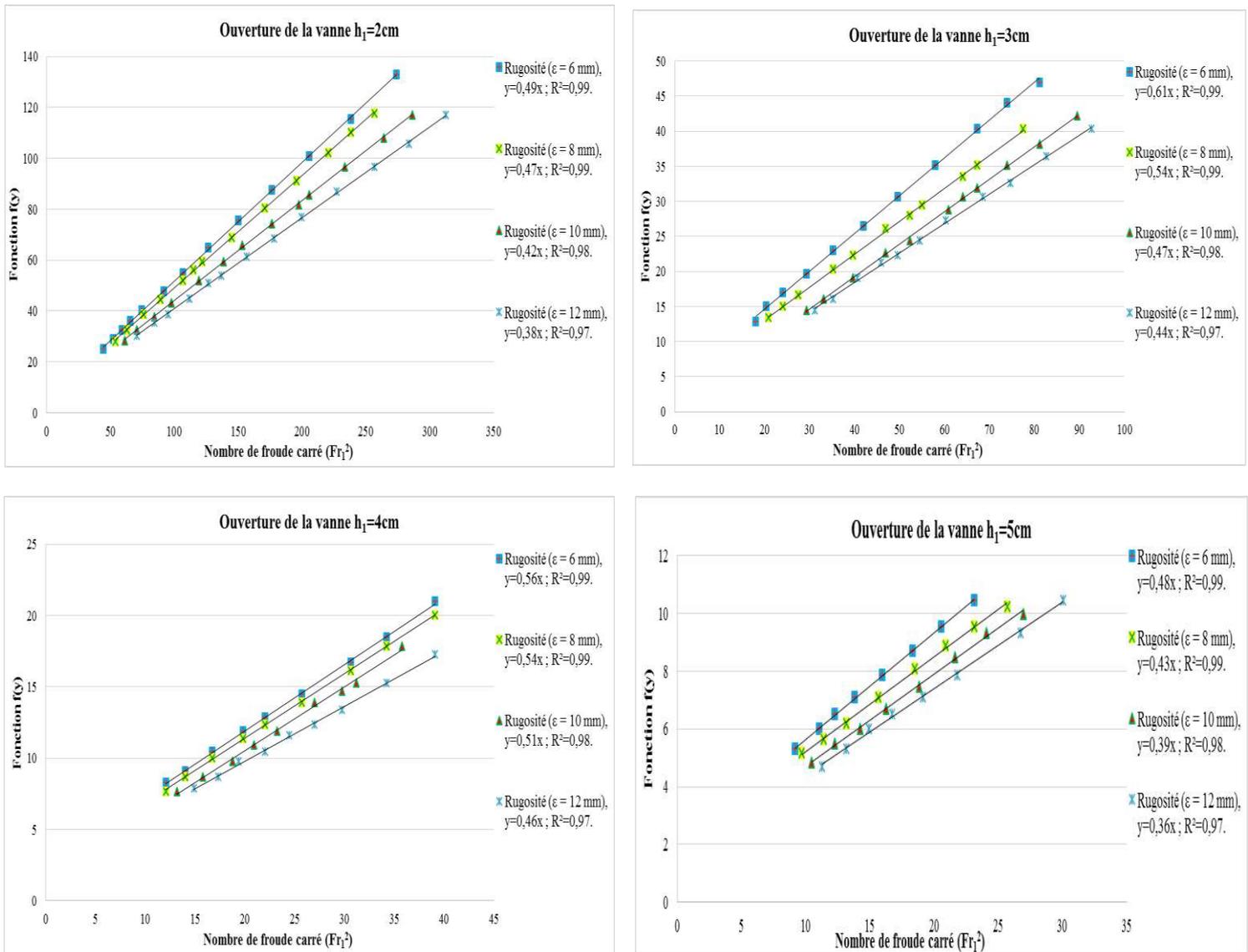


Figure 2. 3 : Relation entre la fonction $f(Y)$ et le nombre de Froude au carré.

La figure (2.3) montre quatre nuages de points distincts, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la rugosité absolue (ϵ).

L'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut, montre que chaque nuage de points peut s'ajuster avec une droite de la forme $([(Y+1)*2]^2-1)/(8) = d Fr_1^2$. En comparant avec la relation (1.17), le terme « d » représente le facteur $(1-C_R)$.

Chapitre II : Analyse expérimentale de l'équation théorique

Le tableau (2.1) regroupe les valeurs des coefficients (C_R).

Tableau 2. 1 : Valeur ajustée du coefficient (C_R).

Rugosité absolue ϵ (mm)	Ouverture de la vanne $h_1=2\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=3\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=4\text{cm}$		Ouverture de la vanne $h_1=5\text{cm}$		Rugosité relative ϵ/b	Moyen C_R
	C_R	R^2	C_R	R^2	C_R	R^2	C_R	R^2		
06	0,51	0,99	0,39	0,99	0,44	0,99	0,52	0,99	0,024	0,46
08	0,53	0,99	0,46	0,99	0,46	0,99	0,57	0,99	0,032	0,51
10	0,58	0,98	0,53	0,98	0,49	0,99	0,61	0,99	0,04	0,55
12	0,62	0,97	0,56	0,99	0,54	0,99	0,64	0,99	0,048	0,59

Le tableau (2.1) montre que le coefficient (C_R) augmente avec l'augmentation de la rugosité relative (ϵ/b). L'ajustement statistique des couples des valeurs ((ϵ/b) , C_R) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire d'équation : $C_R=14,11 (\epsilon/b)$. Celle-ci est représentée à la figure (2.4).

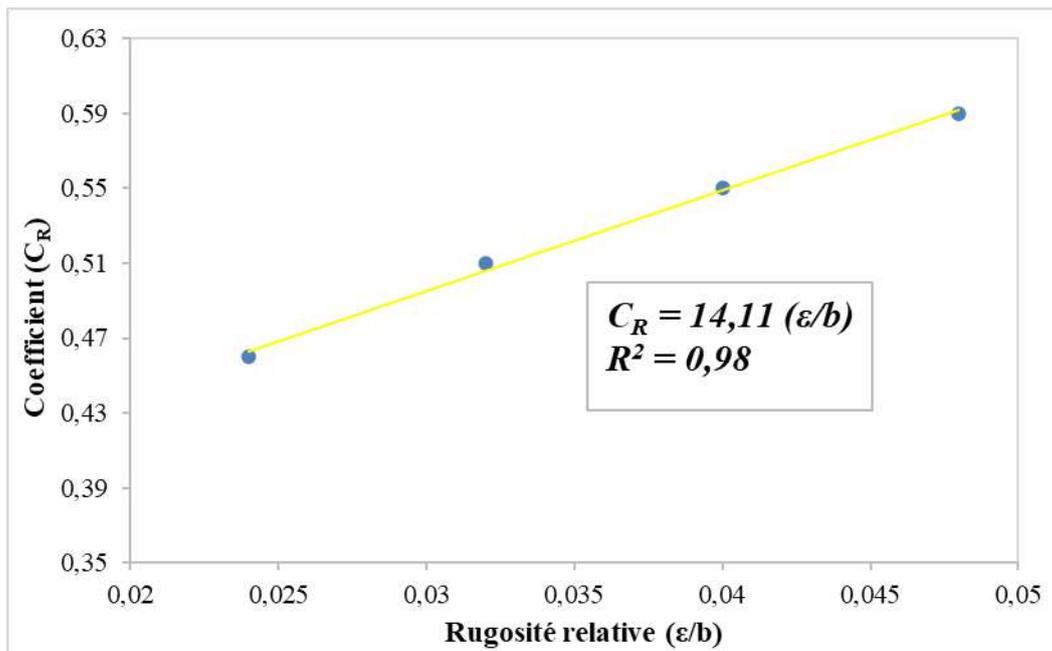


Figure 2. 4 : Relation entre le coefficient (C_R) et la rugosité relative (ϵ/b).

En remplaçant le coefficient (C_R) par son expression dans la relation :

$([(Y+1)*2]^2-1)/(8) = (1-C_R) Fr_1^2$, l'équation semi-théorique devient :

$$([(Y+1)*2]^2-1)/(8) = (1-(14,11*(\epsilon/b))) Fr_1^2 \quad (2.2)$$

$$0,024 \leq \epsilon/b \leq 0,048.$$

Chapitre II : Analyse expérimentale de l'équation théorique

La figure (2.5) montre que la relation $f(Y) = \xi((\varepsilon/b), Fr_1)$ ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice, montrant ainsi la fiabilité de la relation (2.2).

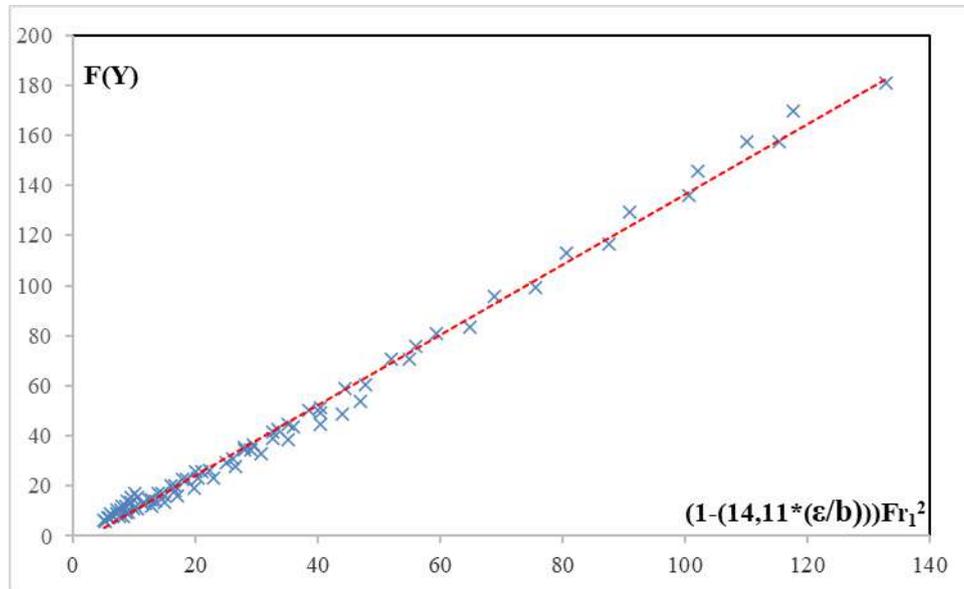


Figure 2. 5 : Relation entre la fonction $f(Y)$ et la fonction de $\xi((\varepsilon/b), Fr_1)$.

II.4. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'une part, de trouver une relation approchée en remplacement à la relation semi-théorique très implicite en Y . Celle-ci permet de trouver le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient C_R de résistance des parois du canal et du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident. D'autre part, nous avons pu évaluer la relation liant le coefficient C_R de résistance à la rugosité relative (ε/b) et l'expression semi-théorique $f(Y, Fr_1, C_R)$ devient de la forme $f(Y, Fr_1, (\varepsilon/b))$.



Conclusion
à la troisième
partie

Conclusion à la troisième partie

Une nouvelle approche théorique du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à parois mince dans un canal rectangulaire aux parois rugueuses a été proposée. Elle a déterminé, à travers une relation (1.17) cependant implicite, le rapport des hauteurs conjuguées (Y) connaissant le coefficient de résistance (C_R) et le nombre de Froude d'écoulement incident (Fr_1).

En outre, si (C_R) égal à zéro la relation (1.17) mène du ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal rectangulaire, cette condition conforme la validation de la relation théorique a été trouvée.

Une formule de type linéaire a été établie par l'ajustement de l'approche théorique découverte avec les mesures expérimentales obtenues, elle exprime le coefficient de résistance (C_R) en fonction de la rugosité relative (ϵ/b).

Le remplacement la valeur de coefficient de résistance dans la relation théorique permet de donner une relation fiable et plus simple pour la détermination de la valeur du rapport des hauteurs conjuguées (Y).



Conclusion

générale

Conclusion générale

Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire aux parois rugueuses et contrôlé par seuil à parois mince a été traité par voie théorique et expérimentale. Dans le but de contribution ce travail à la détermination des caractéristiques et les paramétrés du positionnement de ce type du ressaut, afin de connue la taille de l'ouvrage de réduction ou bien de décharge d'énergie si le flux transporté est donné.

La recherche bibliographique a montré que le phénomène du ressaut a été étudié expérimentalement et théoriquement par certains chercheurs, à savoir :

- ❖ Belanger (1841) est le premier chercheur à examiner le phénomène de manière théorique, il utilise le théorème d'Euler pour aboutir à une équation liant différentes variables géométriques du canal rectangulaire et hydraulique du ressaut classique. L'équation est présentée en terme adimensionnel afin de lui donner un caractère de validité général ;
- ❖ En 1950, Forster et Skrinde effectuent des mesures sur les ressauts contrôlés par un seuil dans un canal rectangulaire, ils déterminent les relations empiriques de la hauteur relative et la position relative du seuil ;
- ❖ Rajaratnam est un grand chercheur dans le domaine du ressaut, il étudie divers types de ressauts. En 1968, il analyse expérimentale le ressaut hydraulique dans canal rectangulaire à fond rugueux ;
- ❖ Hager et Wanoschek (1987) ayant testé, de point de vue théorique et expérimental, le ressaut hydraulique classique produit dans canal triangulaire ;
- ❖ Hager et al (1990) contribuent à leurs expressions pour établir des équations expérimentales déterminent les longueurs géométriques et le rendement de dissipation d'énergie du ressaut hydraulique classique dans un canal rectangulaire ;
- ❖ L'influence de différent type du seuil sur les caractéristiques du ressaut hydraulique en canal de section droite triangulaire a été étudié par Debabeche et Achour en 2001 ;
- ❖ Le travail d'Achour, Sedira et Debabeche (2002) s'intéresse au ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal de section droite rectangulaire à fond lisse. Deux configurations du ressaut sont observées. La première configuration répond aux conditions expérimentales ($X \cong L_r$) de Forster et Skrinde (1950) pour

Conclusion générale

un grand nombre de valeurs de la position relative ($X=x/h_2$). Et la deuxième phase exige la position relative du seuil correspond à la longueur du ressaut (L_j). Et aussi, il a montré que la largeur du seuil n'a qu'une influence sur les hauteurs conjuguées, comparée à celle de sa hauteur ;

- ❖ L'étude de Kateb (2006) déterminé la position du ressaut crée dans canal triangulaire aux parois rugueuses ;
- ❖ L'artici la publié par Ghamri en 2012 examiné l'effet de la rugosité du fond de canal de profilé en U sur les paramétrés du ressaut hydraulique.

L'analyse et l'interprétation des mesures expérimentales de mon thèse ont abouti aux résultats suivants :

- ✚ Le rapport des hauteurs conjuguées (Y) du ressaut en canal aux parois rugueuses pour diverse valeur de la rugosité relative (ε/b) est approché par des courbes parallèles à celle de référence du ressaut en canal à fond lisse. Lorsque la rugosité augmente, l'écart entre les diverses courbes diminue. L'effet de la rugosité relative sur le rapport des hauteurs conjuguées est mis en évidence et s'est avéré ne dépendre que de la rugosité et du nombre de Froude ;
- ✚ Dans tous les cas, le rapport des hauteurs conjuguées pour le ressaut en canal rectangulaire aux parois rugueuses est inférieur à celui du ressaut en canal à fond lisse ;
- ✚ Les longueurs géométriques du ressaut fixant la position du seuil par rapport au pied du ressaut et la distance entre celui-ci et la fin du rouleau de fond, sont approchées par des relations sous forme droite ;
- ✚ Les longueurs du ressaut en canal rectangulaire aux parois rugueuses sont dans tous les cas inférieurs à celles du ressaut en canal à fond lisse, pour le domaine $2 < Fr_1 < 17$. Il est à noter que les longueurs sont indépendantes du nombre de Froude d'écoulement à l'amont et de la rugosité relative ;
- ✚ L'efficacité d'un dissipateur aux parois rugueuses est d'autant plus élevée que la rugosité relative est importante et toujours supérieure à celle du ressaut en canal à fond rugueux. D'autre part, elle est la plus grande pour le ressaut en canal à fond lisse ;
- ✚ L'étude montre pour un cas d'exemple d'application que la longueur du bassin pour un ressaut hydraulique évaluant en canal rectangulaire aux parois rugueuses est réduite d'au moins 32% par rapport à fond rugueux ;

Conclusion générale

- Comparé au ressaut à fond rugueux dans des conditions amont identiques, le ressaut aux parois rugueuses a donc prouvé ses avantages : il requiert une moindre hauteur d'eau aval, la longueur de bassin nécessaire est inférieure et son efficacité est plus élevée.

Tenant compte de l'influence de la rugosité relative (ε/b) des parois de canal sur le ressaut hydraulique, l'application du théorème de la quantité de mouvement dans le sens longitudinal a permis d'établir la relation du rapport des hauteurs conjuguées (Y), qui provoque un décalage remarquable comparé avec le Bélanger. Une relation généralisée pour le ressaut examiné a pu être approchée par :

$$Y = \frac{1}{2} \sqrt{8Fr_1^2(1 - C_R) + 1} - 1$$

Dans laquelle on reconnaît l'équation de Bélanger pour $C_R=0$, avec $4 < Fr_1 < 17$. C_R est défini par $C_R = 14,11 (\varepsilon/b)$.

La relation théorique peut donc s'exprimer sous la forme $Y = f(Fr_1, (\varepsilon/b))$.

L'effet de la rugosité relative sur les hauteurs conjuguées peut alors s'écrire sur la base de la relation :

$$Y = \frac{1}{2} \sqrt{8Fr_1^2(1 - 14,11(\frac{\varepsilon}{b})) + 1} - 1$$

Les résultats présentés permettent de dimensionner un bassin amortisseur avec seuil dans son ensemble lorsque les données principales de l'écoulement au début du ressaut sont connues.

Suite à ce travail accompli, nous recommandons d'étudier sa compacité. Celle-ci permettrait de déterminer la position d'un seuil, assurant le contrôle du ressaut, pour avoir simultanément une dissipation importante et une longueur minimale du bassin. Autrement dit, il s'agit de déterminer le bassin de dissipation technico-économique.

Le même travail entrepris dans cette recherche peut être également réalisé sur les autres formes. Néanmoins des essais doivent être réalisés à chaque fois. La finalité est d'arriver à déterminer la forme du bassin de dissipation le plus rentable et le plus économique.



Références

bibliographiques

Références bibliographiques

A

Achour, B., (1997), Dissipateurs d'énergie par ressaut, Thèse de Doctorat, Institut de Génie Civil, Université de Tizi-Ouzou.

Achour, B., Debabeche, M., (2003), Ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41(3), pp. 319-325.

Andersen J.V. M., (1978), Undular hydraulic jump, *Proc, ASCE, j, Hydraulics Division*, Vol. 104.

B

Belanger, J., B., (1841), Notes sur l'Hydraulique. Ecole Royale des Ponts et Chaussées, Paris, France, session 1841-1842, 223.

Benmalek, A., (2018), Étude de la compacité du ressaut hydraulique dans quelques profils de canaux à ciel ouvert, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra.

Bradley J.N., (1957), The hydraulic design of stilling basins: Hydraulic jumps on a horizontal apron, paper 1401, *Proc. ASCE, J. Hyd. Div.*, Vol. 83.

Brahimi, A., Kateb, S., Nouacer, B., Saggai, S., (2023), A theoretical and experimental study of the hydraulic jump evolving in a rough bottom channel, *Tob Regul Sci*, Vol. 9(1), pp. 3712-3722.

C

Carlier, M., (1972), *Livre d'Hydraulique générale et appliquée*, édition Eyrolles, Paris.

Carlier, M., (1980), *Hydraulique Générale et Appliquée*, 1^{ère} édition.

Chachereau, Y., Chanson, H., (2011), Free-surface fluctuations and turbulence in hydraulic jumps, *Exp. Therm. Fluid. Sci*, 2011, Vol. 35, pp. 896-909.

Chow, V., T., (1959), *Open-channel Hydraulics*, McGraw Hill, New York.

Comolet, R., (1982), *Mécanique expérimentale des fluides*, Masson.

Références bibliographiques

D

Debabeche, M., (2003), Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques, Thèse de Doctorat, Département d'Hydraulique, Université Mohamed Khider Biskra.

Debabeche, M., Bachir, A., (2007), Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45(1), pp. 135-139.

Debabeche, M., Ghomri, A., Sahnoune, C., Ismail, K., (2005), Effet de la rugosité sur le ressaut hydraulique dans un canal profilé en U - partie1, *Larhyss journal*, Vol. 004, pp.107-118.

Debabeche, M., Kateb, S., Ghomri, A., (2006), Etude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses, *Larhyss Journal*, Vol. 005, pp. 187-196.

F

Forster, J., W., Skrinde, R., A., (1950), Control of the hydraulic jump by sills, *Transactions, ASCE*, Vol. (115), pp. 973-987.

G

Ghomri, A., (2005), Ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant en canal profilé en U, Thèse de Magister, Département d'Hydraulique, Université Mohamed Khider Biskra.

Ghomri, A., (2012), Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à parois rugueuses, Thèse de Doctorat, Département d'Hydraulique, Université Mohamed Khider Biskra.

Ghomri, A., Riguet, F., Debabeche, M., (2013), Approche expérimentale de la longueur du rouleau du surface du ressaut hydraulique dans un canal profilé en U à fond rugueux, *International Journal of Chemical and Petroleum Sciences*, Vol. 2(1), pp. 20-26.

H

Hager, W., H., Bremen R., H., (1989), Classical Hydraulic jump sequent depth, *J. Hydraulic Research*, Vol. 27(5), pp. 565-585.

Hager, W., H., Bremen R., H., Kawogoshi, N., (1990), Classical hydraulic jump ; length of roller, *J. Hydraulic research*, Vol. 28(5), pp. 591-608.

Hager, W., H., Sinniger, R., (1985,1986), Flow Characteristics of the hydraulic Jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise, *J. Hydraulic Research*, Vol. 23, pp. 101-113. Vol. 24, pp. 207-215.

Références bibliographiques

Hager, W., H., Wanoschek, R., (1987), Hydraulic Jump in Triangular Channel, J. Hydraulic Research, Vol. 25(5), pp. 549-564.

Hughes, W., C., Flack, J., E., (1984), Hydraulic jump properties over a rough bed, Journal of Hydraulical Engineering, Vol. 110(12), pp. 1755-1771.

K

Kateb, S., (2006), Ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant dans un canal triangulaire à parois rugueuses, Thèse de Magister, Département d'Hydraulique, Université Mohamed Khider Biskra.

Kateb, S., (2014), Etude théorique et expérimentale de quelques types de ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, Thèse de Doctorat, Département d'Hydraulique, Université Mohamed Khider Biskra.

Kateb, S., Debabeche, M., Zegait, R., Baouia, K., (2018), Approche expérimentale de la longueur du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses, Journal of Advanced Research in science and Technologie, Vol. 5(1), pp. 717-726.

L

Landau, L., Lifchitz, E., (1989) Mécanique des fluides, Éditions Moscou.

Div., Vol. 98, n°8.

Lencastre, A., (1983), Livre d'Hydraulique générale, édition Eyrolles, Paris.

Lencastre, A., (1996) Hydraulique générale, Editions Eyrolles.

Leutheusser, Kartha, (1972), Effects on inflow condition on hydraulic jump. J. Hydraulic.

N

Nouacer, B., Kateb, S., Brahim, A., (2021), Experimental approach to the length of the threshold-controlled hydraulic flow in a rectangular channel with a rough bottom, Journal of Fundamental and Applied Sciences, Vol. 13(1), pp. 648-661.

P

Peterka, A., J., (1964), Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators, US Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No. 25.

Références bibliographiques

Posey C.J., Hsing P.S., (1938), The hydraulic jump in trapezoidal channel. Engineering News Record 121, 797-798.

R

Rachedi, H., L., (2006), Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, Thèse de Magister, Département d'Hydraulique, Université Mohamed Khider Biskra.

Rajaratnam, N., (1966), Hydraulic jump in sloping channel, J. irrigation and Power (India), Vol. 23, pp.137-149.

Rajaratnam, N., (1967), Hydraulic jumps, Advances in Hydro science, Vol. 4, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York.

Rajaratnam, N., (1968), Hydraulic jumps on rough beds, Transaction of the engineering institute of Canada, Vol. (11), pp. A-2/ I-VII.

Rajaratnam, N., Subramania, K., (1968, 1969, 1970), Profil of the hydraulic jump, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, Vol. 94(1968), pp. 663-673; Vol. 95(1969), pp. 546-557, pp. 725-727 ; Vol. 96(1970), pp. 579-581.

Richard, G., (2013), Elaboration d'un modèle d'écoulements turbulents en faible profondeur : application au ressaut hydraulique et aux trains de rouleaux, Thèse de Doctorat, Institut universitaire des systèmes thermique industriels, Université d'Aix-marseille.

Rouse, H., Ince, S., (1957), History of hydraulics, Iowa Inst. Of hydraulics. Res., The university of Iowa, Iowa city, Iowa.

S

Silvester, R., (1964), Hydraulic jump in all shapes of horizontal channels, Proc. ASCE, J. Hyd. Div., 90, (HY1), pp. 23–55.

Stevens, (1927), Determining the energy lost in the hydraulic jump, Eng, News-Record, Vol. 98, 3, 126; 13, pp. 538-539.

Z

Ziani, S., (2015), Dissipation d'énergie par Ressaut Hydraulique dans une conduite circulaire avec banquettes, Thèse de Magister, Département d'Hydraulique, Université de Bejaia.