

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie civil et Hydraulique

Année 2022/2023



N° d'enregistrement :

/...../...../...../...../

THESE

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat

en Ressources hydrauliques

**CONTRIBUTION A L'ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE
DE RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL
RECTANGULAIRE INCLINE A FOND RUGUEUX**

Présenté et soutenue publiquement

Par :

NOUACER Belkacem

Le.....

Devant le jury composé de :

| | | | |
|---------------------------------|-------------------|------------------------|---------------------|
| SAGGAI SOFIANE | Professeur | U.K.M. Ouargla | Président |
| KATEB SAMIR | Professeur | U.K.M. Ouargla | Promoteur |
| OULED BELKHIR Cheikh | MCA | U.K.M. Ghardaïa | Co-Promoteur |
| GHOMRI ALI | Professeur | U.H.L. El Oued | Examineur |
| DERDOUS OUSSAMA | MCA | U.K.M. Ouargla | Examineur |
| BOUAMRANE ALI | MCA | U.K.M. Ouargla | Examineur |

REMERCIEMENTS

Pour le présent travail, j'ai bénéficié de la collaboration, orientations, encouragements et les précieux conseils de mon encadreur, Professeur Samir KATEB, Professeur à l'Université d'Ouargla et Professeur OULED BELKHIR Cheikh Professeur à l'Université de Ghardaïa, je remercie vivement. Je tiens à lui exprimer également mes plus profondes reconnaissances pour l'aide scientifique et morale qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Je tiens à remercier le Professeur Sofiane SAGGAI en sa qualité de président de Jury, ainsi que le professeur Ali GHOMRI, Dr Oussama DERDOUS et Dr Ali BOUAMRANE en leur qualité de membre de jury, pour avoir daigné accepter d'examiner mon mémoire de magistère.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser mes recherches afin de terminer ce travail, en particulier :

- Mes amis et collègues du Département d'Hydraulique et de l'Université de Ghardaïa ;*
- Mes Enseignants, Amis et Collègues du Département Génie civil et Hydraulique de l'Université de Ouargla et toutes les personnes que je ne peux citer et qui m'ont aidé de près ou de loin, qu'ils trouvent tous ici, mes sincères remerciements et reconnaissances.*



Dédicaces



dédie ce modeste travail à ceux qui sont toujours

présents dans mon Cœur

A ma très chère mère, A mon très cher père

Ma femme qui m'a encouragé beaucoup. Mes fils, mes filles

*Pour tous les sacrifices et leur soutien moral et matériel dont ils
ont fait preuve pour que je réussisse.*

A toute ma famille

A mes sœurs

A tous mes professeurs

A tous mes collègues et mes amis sans exception

Et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin.



Sommaire

REMERCIEMENTS

DEDICACES

INTRODUCTION GENERALE

Première partie : Recherche bibliographique

Partie I : Etude bibliographique

INTRODUCTION A LA PARTIER BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

| | |
|--|----|
| I.1. INTRODUCTION..... | 2 |
| I.2. CLASSIFICATION DU RESSAUT CLASSIQUE | 3 |
| I.3. LES PARAMETRES HYDRAULIQUES DU RESSAUT..... | 4 |
| I.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut..... | 4 |
| I.3.2. Longueurs caractéristiques du ressaut..... | 7 |
| I.3.2.1. Longueur Du Rouleau | 7 |
| I.3.2.2. Longueur du ressaut | 8 |
| I. 4. RENDEMENT DU RESSAUT..... | 8 |
| I.5.CONCLUSION..... | 11 |

Chapitre II : Ressaut hydraulique dans un canal incline

| | |
|--|----|
| II.1. INTRODUCTION | 13 |
| II.2. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINE À PENTE POSITIVE. | 13 |
| II.2.1. Classification des ressauts inclinés..... | 13 |
| II.2.2. Ressaut hydraulique de type C et de type D..... | 14 |
| II.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINE A PENTE NEGATIVE..... | 16 |
| II.3.1Classification du ressaut à pente négative | 16 |
| II.4. ETUDE DE DE MC CORCODAL ET AL (1994) | 17 |
| II.5. ETUDE DE DEBACHE ET AL (2009) ET CHERHABIL (2010) | 20 |
| II.5.1. Analyse théorique | 20 |
| II.5.2.Analyse expérimentale | 22 |

| | |
|--|----|
| II.5.2.1. Détermination du coefficient k | 22 |
| II.5.2.2. Relation explicite du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal | 22 |
| II.5.3 : Longueurs caractéristiques du ressaut | 22 |
| II.5.3.1. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 | 23 |
| II.5.3.2. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de F_1 | 23 |
| II.6. CONCLUSION | 25 |

Chapitre III : Ressaut hydraulique dans un canal Rectangulaire à fond rugueux

| | |
|---|----|
| III.1. INTRODUCTION..... | 27 |
| III.2. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A FOND RUGUEUX | 27 |
| III.2.1. approche de Rajaratnam (1968) | 27 |
| III.2.1.1. Description Des Essais | 27 |
| III.2.1.2. Analyse des résultats | 27 |
| III.2.1.2.1. Hauteur finale h_2 | 27 |
| III.2.1.2.2. Longueur caractéristique | 29 |
| III.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE | 30 |
| III.3.1. Approche de RAJARATNAM (2002) | 30 |
| III.3.1.1. Description des essais..... | 30 |
| III.3.1.2. Résultats expérimentaux | 31 |
| III.4. CONCLUSION | 34 |
| CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE | 35 |

Deuxième partie : Contribution à l'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à fond rugueux

Chapitre I : Étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à fond rugueux

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE | 39 |
| I.1. INTRODUCTION | 40 |
| I.2. POSITION DU PROBLÈME | 41 |
| I.3. DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPERIMENTALE | 42 |
| I.3.1. Description du Canal..... | 42 |
| I.3.2. Mesure de l'angle d'inclinaison | 44 |

| | |
|---|----|
| I.3.3. Appareillages de mesure | 44 |
| I.3.3.1. Mesure de débit | 44 |
| I.3.3.2. Limnimétrie | 45 |
| I.3.4. Expérimentation | 46 |
| I.3.5. Protocole Expérimental | 47 |
| I.3.6. Mode de préparation de la rugosité utilisée | 48 |
| I.4. RÉSULTATS ET DISCUSSION | 50 |
| I.4.1. Longueur relative L_j/h_1 de la projection en fonction du nombre de Froude F_1 | 50 |
| I.4.2. Rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 | 53 |
| I.5. EXEMPLE D'APPLICATION | 57 |
| I.5.1. Calcul du nombre de Froude F_1 | 57 |
| I.5.2. Ressaut à fond rugueux $\varepsilon = 0$ | 57 |
| I.5.3.1. Relative length of hydraulic jump L_j/h_1 | 57 |
| I.5.2.2. Rapport des hauteurs combinées | 58 |
| I.5.3 Ressaut à fond rugueux $\varepsilon = 12\text{mm}$ | 58 |
| I.5.3.1. Longueur relative du ressaut hydraulique L_j/h_1 | 58 |
| I.5.3.2. Rapport des hauteurs combinées | 58 |
| I.6. CONCLUSION | 59 |

Chapitre II : Étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à pente incline

| | |
|---|----|
| I.1. INTRODUCTION | 61 |
| II.2. RESULTATS EXPERIMENTAUX | 61 |
| II.2.2. Analyse des résultats expérimentaux | 61 |
| II.2.2.1. Ressaut hydraulique a pente positive | 61 |
| II.2.2.1.1. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal | 61 |
| II.2.2.2. Longueurs caractéristiques du ressaut | 65 |
| II.2.2.2.1. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 | 65 |
| II.2.2.2.2. Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 | 69 |
| II.2.2.2.2. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F_1 | 73 |
| II.3. RENDEMENT DU RESSAUT HYDRAULIQUE | 74 |
| II.4. Exemple d'application | 77 |

| | |
|--|----|
| II.4.1. Ressaut contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire à pente nulle : ($a=0\%$)..... | 77 |
| II.4.2. Ressaut contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire à pente positive : ($a=1,5\%$) .. | 77 |
| II.5. CONCLUSION | 78 |
| II.6. ANALYSE THEORIQUE DE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A PENTE VARIABLE..... | 79 |
| II.6.1. INTRODUCTION | 79 |
| II.6.2. L'équation de la quantité de mouvement | 79 |
| II.6.3. Détermination du volume du ressaut | 83 |
| II.6.3.1. Détermination analytique du volume du ressaut | 83 |
| II.6.3.2. Détermination géométrique du volume de ressaut | 84 |
| II.6.4. Le Facteur De Correction | 85 |
| II.6.5. Le nombre de Froude | 85 |
| II.6.6. Validation de l'approche théorique proposée | 87 |
| II.8. CONCLUSION | 90 |

Chapitre III : Étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire pente incline à fond rugueux

| | |
|---|-----|
| III.1. INTRODUCTION | 92 |
| III.2. RESULTATS EXPERIMENTAUX | 92 |
| III.2.2. Ressaut hydraulique incliné rugueux | 92 |
| III.2.2.1. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison a du canal | 92 |
| III.2.2.2. Longueurs caractéristiques du ressaut | 102 |
| III.2.2.2.1. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 | 102 |
| III.2.2.2.2. Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 | 111 |
| III.3. EXEMPLE D'APPLICATION | 121 |
| III.3.1. Calcul du nombre de Froude F_1 | 121 |
| III.3.2. Ressaut à fond incline rugueux : $\varepsilon = 0$; $a = 0.005$ | 121 |
| III.3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut | 121 |
| III.3.2.2. Longueur relative du ressaut hydraulique L_j/h_1 | 121 |
| III.3.2.3 La hauteur relative du seuil s/h_1 | 122 |
| III.3.3. Ressaut à fond incline rugueux. $\varepsilon = 12$; $a = 0.005$ | 122 |
| III.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut | 122 |

| | |
|--|-----|
| III.3.3.2. Longueur relative du ressaut hydraulique L_j/h_1 | 122 |
| III.3.3.3. La hauteur relative du seuil s/h_1 | 122 |
| III.4. CONCLUSION | 123 |
| III.5. ANALYSE THEORIQUE DE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A PENTE INCLINE RUGUEUX | 124 |
| III.5.1. INTRODUCTION..... | 124 |
| III.5.2. Analyse théorique | 124 |
| III.5.3. Détermination du volume du ressaut | 126 |
| III.5.3.1. Détermination analytique du volume du ressaut | 126 |
| III.5.3.2. Détermination géométrique du volume de ressaut | 127 |
| III.5.3.3. Le Facteur De Correction | 128 |
| III.5.3.4. Le nombre de Froude | 128 |
| III.6. Validation de l'approche théorique proposée | 130 |
| III.7. CONCLUSION | 133 |
| CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE | 135 |
| CONCLUSION GENERALE | 138 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 143 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1.1. Ressaut hydraulique..... | 2 |
| Figure 1.2.a : Le Pré-ressaut | 3 |
| Figure 1.3.b : Le ressaut de transition..... | 3 |
| Figure 1.4.c : Le ressaut stable..... | 4 |
| Figure 1.5.d : Le ressaut agité..... | 4 |
| Figure 1.6 : Ressaut hydraulique classique. | 4 |
| Figure 1.7 : Rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbe tracée selon la relation [1.7] | 6 |
| Figure 1.8 : Aspect du ressaut classique | 7 |
| Figure 1.9 : Ligne de charge totale le long du ressaut classique | 8 |
| Figure 1.10 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 (—) Courbe tracée selon la relation (1.22), (—) courbe tracée Selon la relation (1.23) | 10 |
| Figure 2.1 : Classification des ressauts inclinés selon Kindsvater (1944) | 14 |
| Figure 2.2 : Notation du ressaut incliné. | 15 |
| Figure 2.3 : Classification du ressaut à pente négative..... | 16 |
| Figure 2.4 : Schéma de définition et volume de contrôle pour le ressaut en contre pente | 17 |
| Figure 2.5 : Rapport de hauteurs conjuguées expérimentales et théoriques pour des cas limites et des cas stabilisés de ressaut en contre pente, provenant de l'étude de Mc Corcodal et al (1994), ainsi que celle de Okada et Aki (1959) .tg $\theta = (+) 0,0; (\square) -0,1; (\blacktriangle) -1,6; \dots$ | 18 |
| Figure 2.6 : longueurs du rouleau mesurées dans les cas limites et des cas stabilisés de ressaut en contre pente, provenant de l'étude de Mc Corcodal et al (1994), ainsi que celle de Okada et Aki (1955) .tg $\theta = (+) 0,0; (\square) -0,1; (\blacktriangle) -1,6; (\nabla) -1/5; (\blacksquare) -1/4$ Equation théorique. | 19 |
| Figure 2.7 : Ressaut hydraulique sur une pente positive | 20 |
| Figure 2.8 : variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude semi théorique F_1 selon la relation (2.18) ,pour six valeur de la tangente de l'angle d'inclinaison du canal, tels que : $\tan(\alpha) = (\square) 0,00$ (selon debabeche et achour(2007) $(\circ) 0,01, 0,02, (-) \dots$ | 22 |
| Figure 2.9 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$ | 23 |
| Figure 2.10 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$ | 24 |
| Figure 2.1 : Variation de h_2/h_1 en fonction de F_1 | 28 |
| Figure 3.2 : Variation de h_2/h_2^* en fonction de ε/h_1 | 29 |
| Figure 3.3 : Variation de la longueur relative : (a) L_r/h_2 en fonction de F_1 ; (b) L_j/h_2^* en fonction de F_1 | 30 |
| Figure 3.4 : Schéma de définition du ressaut hydraulique à fond nodule..... | 30 |
| Figure 3.5 : (a) Profils de surface du ressaut ; (b) Profil généralisé de surface du ressaut | 31 |
| Figure 3.6 : Variation h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 | 32 |

| | |
|--|----|
| Figure 3.7 : Variation de la longueur relative en fonction du nombre de Froude F_1 . (a) Du rouleau de surface ; (b) du ressaut | 33 |
| Figure 1.1 : Ressaut contrôlé par seuil mince. h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur seuil, L_j longueur du ressaut hydraulique. | 41 |
| Figure 1.2 : Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire, ayant servi à L'expérimentation..... | 43 |
| Figure 1.4:Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour cinq valeurs différentes de rugosité absolue : ε (mm) = (o) 0,00 (lisse), (\square) 6mm, (Δ) 8mm, (*) 10 mm et (\bullet) 12 mm..... | 50 |
| Figure 1.5 : Variation du coefficient 'a' en fonction de la rugosité absolue 'ε' | 52 |
| Figure 1.6:Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de (ε , F_1). (\square) Points expérimentaux de la projection contrôlée avec parois brutes. (—) Première bissectrice de l'équation $L_j / h_1 = (12,73 - 0,532 \varepsilon)$ | 52 |
| Figure I.7 : Variation du rapport Y des hauteurs combinées en fonction de F_1 , pour cinq valeurs différentes de rugosité absolue : ε (mm) = (o) 0,00 (lisse), (\square) 6mm, (Δ) 8mm, (*) 10mm et (\bullet) 12mm. | 53 |
| Figure 1.8 : Variation du coefficient b en fonction de la rugosité absolue ε pour cinq valeurs différentes de la rugosité absolue : ε (mm) = (o) 0,00 (lisse), (\square) 6mm, (Δ) 8mm, (*) 10 mm et (\bullet) 12mm | 54 |
| Figure 1.9 : Variation de le Rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre (ε , F_1). (\square) Points expérimentaux de la projection contrôlée avec parois brutes. (—) Première bissectrice de l'équation $Y = (1,332 - 0,0556 \varepsilon) F_1$ | 55 |
| Figure 1.10:Variation du rendement en fonction du nombre de Froude F_1 , pour cinq valeurs différentes de rugosité absolue : ε (mm) = (o) 0,00 (lisse), (\square) 6, (Δ) 8, (*) 10 et (\bullet) 12..... | 56 |
| Figure 2.1 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,00$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement. | 61 |
| Figure 2.2 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,005$. (o) points expérimentaux; (—) Courbes d'ajustement. | 62 |
| Figure 2.3 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,01$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement. | 62 |
| Figure 2.4 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,015$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement..... | 62 |
| Figure 2.5 : Variation du paramètre a en fonction de $\tan(\alpha)$ | 63 |
| Figure 2.6 : Variation de rapport des hauteurs conjuguées expérimentales $F_1 \text{ exp}$ en fonction Rapport des hauteurs conjuguées théorique $Y \text{ th}$ calculée selon la relation (2.2). (—) Première bissectrice d'équation : $Y_{\text{exp}} = Y_{\text{the}}$ | 64 |
| Figure 2.7 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour $\tan(\alpha) \tan\alpha = 0,00$ (o); $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = 0,015$ (*) points expérimentaux(—) Courbes d'ajustement..... | 65 |
| Figure 2.8 : Variation du rapport L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour $\tan(\alpha) = 0,00$. (\square) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement | 66 |
| Figure 2.9 : Variation du rapport L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour $\tan(\alpha) = 0,005$. (\square) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement | 66 |
| Figure 2.10 : Variation du rapport L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour $\tan(\alpha) = 0,015$. (\square) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement..... | 66 |
| Figure 2.11 : Variation du rapport L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 pour $\tan(\alpha) = 0,015$. (\square) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement..... | 67 |
| Figure 2.12 : Variation expérimentale de L_j/h_1 pour différentes valeurs de $\tan(\alpha)$. (—) courbe tracé selon la relation (2.3). | 67 |

| | |
|--|-----|
| Figure 2.13 : Variation du paramètre 'a' en fonction de $\tan(\alpha)$ | 68 |
| Figure 2.14 : Variation de la relation $f(F_1, a)$ en fonction de la hauteur relative L_j/h_1 du seuil. (\square) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $f(F_1, a) = L_j/h_1$ | 69 |
| Figure 2.15 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , Pour $\tan(\alpha) = 0,00$. (\square) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement | 69 |
| Figure 2.16 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , Pour $\tan(\alpha) = 0,005$. (\square) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement. | 70 |
| Figure 2.17 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , | 70 |
| Figure 2.18 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , Pour $\tan(\alpha) = 0,015$. (\square) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement. | 70 |
| Figure 2.19 : Variation du paramètre 'b' en fonction de $\tan(\alpha)$ | 72 |
| Figure 2.20 : Variation de la relation $f(F_1, a)$ en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil. (\square) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $f(F_1, a) = s/h_1$ | 72 |
| Figure 2.21 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\tan(\alpha) = 0,00$ (\circ) ; $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 73 |
| Figure 2.22 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0,00 \leq \tan(\alpha) \leq 0,015$ | 73 |
| Figure 2.23 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . $\tan\alpha = 0,00$ (\circ) ; $\tan\alpha = 0,005$ (*) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (\square) | 76 |
| Figure 2.24 : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à pente variable. | 80 |
| Figure 2.25 : a) Représentation géométrique du volume d'eau engendré par le ressaut | 82 |
| Figure 2.26 : schéma descriptif de la forme géométrique du volume V du ressaut accompagné par les vues de profil et de la surface | 83 |
| Figure 2.27 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour $\tan(\alpha)$ $\tan\alpha = 0,00$ (\circ) ; $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 89 |
| Figure 3.1 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour $\tan(\alpha)$ $\tan\alpha = 0,00$ (\circ) ; $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 92 |
| Figure 3.2 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour $\tan(\alpha)$ $\tan\alpha = 0,00$ (\circ) ; $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 93 |
| Figure 3.3 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour $\tan(\alpha)$ $\tan\alpha = 0,00$ (\circ) ; $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 93 |
| Figure 3.4 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour $\tan(\alpha)$ $\tan\alpha = 0,00$ (\circ) ; $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 94 |
| Figure 3.5 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour $\tan(\alpha)$ $\tan\alpha = 0,00$ (\circ) ; $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 94 |
| Figure 3.6 : Variation du paramètre a en fonction de $\tan(\alpha)$ dans la rugosité (0 mm). | 98 |
| Figure 3.7 : Variation du paramètre a en fonction de $\tan(\alpha)$ dans la rugosité (6 mm). | 98 |
| Figure 3.8 : Variation du paramètre a en fonction de $\tan(\alpha)$ dans la rugosité (8 mm). | 99 |
| Figure 3.9 : Variation du paramètre a en fonction de $\tan(\alpha)$ dans la rugosité (10 mm). | 99 |
| Figure 3.10 : Variation du paramètre a en fonction de $\tan(\alpha)$ dans la rugosité (12 mm). ... | 100 |

| | |
|--|-----|
| Figure 3.11 : Variation du paramètre 'a' et 'b' en fonction de Rugosité | 101 |
| Figure 3.12 : Variation de rapport des hauteurs conjuguées expérimentales F_{1exp} en fonction Rapport des hauteurs conjuguées théorique Y_{th} calculée selon la relation (3.5). (—) Première bissectrice d'équation : $Y_{exp} = Y_{the}$ | 101 |
| Figure 3.13 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (o); $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01(\Delta)$; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement. | 102 |
| Figure 3.14 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (o); $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01(\Delta)$; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 103 |
| Figure 3.15 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (o); $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01(\Delta)$; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 103 |
| Figure 3.16 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (o); $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01(\Delta)$; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 104 |
| Figure 3.17 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour tang (α) $\tan\alpha = 0,00$ (o); $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01(\Delta)$; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 104 |
| Figure 3.18 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α). | 107 |
| Figure 3.19 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α). | 108 |
| Figure 3.20 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α). | 108 |
| Figure 3.21 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α). | 109 |
| Figure 3.22 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α). | 109 |
| Figure 3.23 : Variation du paramètre 'a' et 'b' en fonction de Rugosité | 110 |
| Figure 3.24 : Variation de la relation $f(F_1, a)$ en fonction de la hauteur relative L_j/h_1 du seuil. (\square) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $f(F_1, a) = L_j/h_1$ | 111 |
| Figure 3.25 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (o); $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01(\Delta)$; $\tan\alpha = -0,015$ (\times) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 112 |
| Figure 3.26 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (o); $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01(\Delta)$; $\tan\alpha = -0,015$ (\times) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 112 |
| Figure 3.27 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (o); $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01(\Delta)$; $\tan\alpha = -0,015$ (\times) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 113 |
| Figure 3.28 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (o); $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01(\Delta)$; $\tan\alpha = -0,015$ (\times) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 113 |
| Figure 3.29 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (o); $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01(\Delta)$; $\tan\alpha = -0,015$ (\times) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement | 114 |
| Figure 3.30 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang(α). | 117 |
| Figure 3.31 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang(α) | 117 |
| Figure 3.32 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang(α) | 118 |
| Figure 3.34 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang(α) | 119 |
| Figure 3.35 : Variation du paramètre " en fonction de Rugosité (ϵ) | 120 |

| | |
|---|-----|
| Figure 3.36 : Ressaut contrôlé par un seuil un canal rectangulaire. | 124 |
| Figure 3.37 : a) Représentation géométrique du volume d'eau engendré par le ressaut b) Représentation géométrique des sections amont et avalé | 126 |
| Figure 3.38 : Variation du nombre de Froude expérimental F_{1exp} en fonction du nombre de Froude théorique F_{1th} calculée selon la relation (3.43). (—) Première bissectrice d'équation : $F_{1exp} = F_{1th}$ | 133 |

LISTE DES PHOTOS

| | |
|---|----|
| Photo 1.1: Photographie du canal de mesure de section | 47 |
| Photo 1.2: la boit en charge..... | 48 |
| Photo 1.3: vanne de réglage et pompe | 48 |
| Photo 1.5: du bassin d'accumulation (Vue de dessus)..... | 49 |
| Photo I.4: de la Vanne murale..... | 49 |
| Photo 1.8: Photographie du déversoir rectangulaire mesurant les débits | 50 |
| Photo 1.9: Série de seuils minces ayant servi au contrôle du ressaut | 52 |
| Photo I.10: Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé..... | 52 |
| Photo I.1: Photographie Echantillon de grains de perles de rugosité | 53 |
| Photo I.12: Photographie tapis pliable en plastique souple | 53 |
| Photo 1.13: Echantillons de grains de perles de rugosités (ϵ mm) =10 | 54 |
| Photo I.14 : ressaut hydraulique évoluant dans canal rectangulaire a fond rugueux. Vue à l'amont du ressaut. (b) Vue à l'aval du ressaut..... | 54 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| Tableau 1.1 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 avec la rugosité (ϵ mm) = 0 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12), $Tang(\square) = 0$ | 56 |
| Tableau 1.2 : coefficients des courbes d'ajustement | 56 |
| Tableau 1.3 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1 avec la rugosité (ϵ mm) = 0 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12), $Tang(\square) = 0$ | 58 |
| Tableau 1.4 : Coefficients b des courbes d'ajustement | 59 |
| Tableau 1.5 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage de la figure (1.10) avec (ϵ mm) = 0 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12), $Tang(\square) = 0$ | 61 |
| Tableau 2.1 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1 | 68 |
| Tableau 2.3 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage de la figure (2.8) à (2,11)..... | 72 |
| Tableau 2.4 : regroupe les valeurs des coefficients a_1 | 73 |
| Tableau 2.5 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F_1 | 76 |
| Tableau 2.6 : Valeurs des paramètres a et b | 76 |
| Tableau 2.7 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage de la figure (2.22) | 79 |
| Tableau 2.8 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage de la figure (2.23) | 81 |
| Tableau 2.9 : Valeurs du coefficient k selon la relation (2.58) de la pente positive..... | 93 |
| Tableau 3.1 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1 avec la rugosité (0 mm)..... | 100 |
| Tableau 3.2 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1 avec la rugosité (6 mm)..... | 100 |
| Tableau 3.3 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1 avec la rugosité (8 mm)..... | 101 |
| Tableau 3.4 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1 avec la rugosité (10 mm)..... | 101 |
| Tableau 3.5 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1 avec la rugosité (12 mm)..... | 102 |
| Tableau 3.6 : Valeurs des paramètres a_1 | 102 |
| Tableau 3.7 : Valeurs des paramètres a_2 | 103 |
| Tableau 3.8 : Valeurs des paramètres a_3 | 103 |
| Tableau 3.9 : Valeurs des paramètres a_4 | 104 |
| Tableau 3.10 : Valeurs des paramètres a_5 | 104 |
| Tableau 3.11 : Valeurs des paramètres a et b | 105 |
| Tableau 3.12 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 avec la rugosité (0 mm). | 110 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 3.13 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 avec la rugosité (6 mm). | 110 |
| Tableau 3.14 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 avec la rugosité (8mm). | 111 |
| Tableau 3.15 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 avec la rugosité (10mm). | 111 |
| Tableau 3.16 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 avec la rugosité (12mm). | 112 |
| Tableau 3.17 : Valeurs des paramètres a_1 | 112 |
| Tableau 3.18 : Valeurs des paramètres a_2 | 113 |
| Tableau 3.19 : Valeurs des paramètres a_3 | 113 |
| Tableau 3.20 : Valeurs des paramètres a_4 | 114 |
| Tableau 3.21 : Valeurs des paramètres a_5 | 114 |
| Tableau 3.22 : Valeurs des paramètres a et b..... | 115 |
| Tableau 2.23 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F_1 | 119 |
| Tableau 2.24 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F_1 | 120 |
| Tableau 3.25 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F_1 | 120 |
| Tableau 3.26 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F_1 | 121 |
| Tableau 3.27 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F_1 | 121 |
| Tableau 3.28 : Valeurs des paramètres a et b_1 | 122 |
| Tableau 3.29 : Valeurs des paramètres a et b_2 | 122 |
| Tableau 3.30 : Valeurs des paramètres a et b_3 | 123 |
| Tableau 3.31 : Valeurs des paramètres a et b_4 | 123 |
| Tableau 3.32 : Valeurs des paramètres a et b_5 | 124 |
| Tableau 3.33 : Valeurs des paramètres b | 125 |
| Tableau 3.34 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (0 mm) de lapent positive | 136 |
| Tableau 3.35 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (6 mm) de lapent positive | 136 |
| Tableau 3.36 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (8 mm) de lapent positive | 137 |
| Tableau 3.37 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (10 mm) de lapent positive | 137 |
| Tableau 3.38 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (12 mm) de lapent positive | 138 |

PRINCIPALES NOTATIONS

| | | |
|-------------|---|----------------|
| A_1 | L'aire de la section mouillée initial | $[m^2]$ |
| A_2 | L'aire de la section mouillée finale | $[m^2]$ |
| F_1, IF_1 | Nombre de Froude incident | $[-]$ |
| P_1 | Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut | $[N]$ |
| P_2 | Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut | $[N]$ |
| g | Accélération de la pesanteur | $[m.s^{-2}]$ |
| h_1 | Hauteur initiale du ressaut | $[m]$ |
| h_2^* | Hauteur finale du ressaut classique rectangulaire | $[m]$ |
| $h(x)$ | Profondeur de l'eau à la distance x du pied du ressaut | $[m]$ |
| h_b | hauteur maximal du rouleau de fond | $[m]$ |
| k | coefficient de correction du volume du ressaut | $[-]$ |
| L_r | Longueur du rouleau | $[m]$ |
| L_j | Longueur du ressaut | $[m]$ |
| L_r^* | Longueur du rouleau classique rectangulaire | $[m]$ |
| L_j^* | Longueur du ressaut classique rectangulaire | $[m]$ |
| L_u | la distance du pied du ressaut au début du rouleau de fond | $[m]$ |
| Q | Débit volume | $[m^3.s^{-1}]$ |
| Re | Nombre de Reynolds | $[-]$ |
| R_h | Rayon hydraulique correspondant au profil triangulaire | $[-]$ |
| S | Hauteur du seuil | $[m]$ |
| S | Hauteur relative du seuil | $[-]$ |
| S_f | Gradient de perte de charge | $[-]$ |
| W_x | Force de frottement agissant sur le volume de liquide | $[N]$ |
| V | Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiale et finale | $[m^3]$ |
| v_1 | Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale | $[m.s^{-1}]$ |
| v_2 | Vitesse moyenne dans la section mouillée | $[m.s^{-1}]$ |
| x | Position de seuil | $[m]$ |
| X | Position relative de seuil | $[-]$ |
| Y^* | Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique | $[-]$ |
| Y_s | Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil | $[-]$ |
| ν | Viscosité cinématique | $[m^2.s^{-1}]$ |
| λ_j | longueur relative du ressaut | $[-]$ |
| λ_r | longueur relative du rouleau | $[-]$ |
| λ_b | longueur relative du rouleau de fond | $[-]$ |
| λ_u | longueur relative du distance d'approche | $[-]$ |

| | | |
|----------|---|----------|
| ω | Poids spécifique du liquide | [N.m-3] |
| ρ | Masse volumique du liquide | [kg.m-3] |
| η | Rendement du ressaut | [-] |
| α | Angle d'inclinaison du fond du canal par rapport à l'horizontal | [rd] |

ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى الدراسة النظرية والتجريبية للقفز الهيدروليكي المتحكم فيه بسد رقيق الجدران تتطور في قناة مستطيلة ذات قاع خشن ومنحدر موجب متغير. ركز الجزء الأول من الدراسة على التحليل النظري المدعوم ببيانات تجريبية معينة للقناة ، أما الجزء الثاني فهو تجريبي بطبيعته مما سمح لنا بإيجاد علاقة بالشكل $f(Y, Fr, \alpha, Cr)$ توضح تأثير عامل الخشونة المطلق على خصائص القناة. القفز الهيدروليكي وكذلك المنحدر الإيجابي المتغير. المعادلات التي تم الحصول عليها بدون أبعاد واستخدامها في الواقع تجعل من الممكن تحديد أبعاد أحواض التهدئة.

الكلمات المفتاحية : قفزة هيدروليكية ، قناة مستطيلة ذات قاع خشن ، انحدار إيجابي متغير ، تشتت طاقة الحوض.

Résumé :

Cette présente thèse a pour but d'étudier d'une manière théorique et expérimentale, le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince évolue dans un canal rectangulaire à fond rugueux et à pente positive variable. La première partie de l'étude a porté sur l'analyse théorique étayée par les données expérimentales particulières du canal, La deuxième partie est de nature expérimentale, ce qui nous a permis de trouver une relation de la forme $f(Y, Fr, \alpha, Cr)$ qui montre l'effet du facteur de rugosité absolue sur les caractéristiques du ressaut hydraulique ainsi que la pente positive variable Les équations obtenues sans dimensions et leur utilisation dans la réalité permet de déterminer les dimensions des bassins d'apaisement.

Mots clés : ressaut hydraulique, canal rectangulaire à fond rugueux, pente positive variable, bassin dissipation d'énergie.

Abstract:

This thesis aims to study theoretically and experimentally, how the hydraulic jump controlled by a thin-walled weir evolves in a rectangular channel with a rough bottom and a variable positive slope. The first part of the study focused on the theoretical analysis supported by the particular experimental data of the channel. The second part is experimental in nature, which allowed us to the form $f(Y, Fr, \alpha, Cr)$ relation that shows the effect of the roughness factor absolute on the characteristics of the hydraulic jump as well as the variable positive slope. The equations obtained without dimensions and their use in reality makes it possible to determine the dimensions of the calming basins.

Key words: hydraulic jump, rectangular channel with rough bottom, variable positive slope, energy dissipation basin.

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Fréquemment, les ouvrages de soutènement sont soumis à des crues excessives, qui doivent être évacuées pour la protection de l'ouvrage. Des forces de traction sont à l'œuvre dans l'eau jaillissante qui jaillit du déversoir du barrage. Pour cette raison, les barrages et autres structures de retenue sont équipés de dissipateurs de charge hydraulique, qui sont utilisés pour disperser l'eau libérée du barrage et la restituer à la rivière dans son état fluvial naturel. Il existe plusieurs moyens pour dissiper cette charge hydraulique, mais selon la bibliographie le moyen le moins onéreux et le plus pratique est certainement le ressaut hydraulique. Le ressaut hydraulique est la conséquence du passage de l'écoulement d'un régime torrentiel vers un régime fluvial. Le ressaut hydraulique trouve son application non seulement dans les barrages hydrauliques mais aussi dans d'autres domaines, tel que les canaux d'irrigation.

Depuis les années 80, l'étude de ce phénomène hydraulique a connue de nombreuses recherches, visant d'une part à décrire le ressaut hydraulique, et d'autre part à trouver les relations liant ses caractéristiques dans le but de dimensionner l'ouvrage de dissipation de charge.

Les chercheurs ont également catégorisé le saut hydraulique en sous-types en fonction de sa conception. En effet, la modification des circonstances en amont (débit, altitudes, etc.) et des conditions en aval (type d'obstacle, position de l'obstacle, hauteur de l'obstacle, pente du chenal, etc.) peut conduire à différentes configurations du ressaut (Debabeche et al, 2009).

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

L'ensemble des chercheurs ont confirmé que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. C'est en d'autres termes la seconde loi de Newton qui est appliquée, qui montre que la variation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut est égale à la résultante des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement (Debabeche et al, 2009).

L'application de la quantité de mouvement a eu pour but d'évaluer le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 incident caractérisant l'écoulement à l'amont. La relation la plus simple est celle obtenue par Bélanger pour le cas du

INTRODUCTION GÉNÉRALE

ressaut classique en canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible et dont la validité a été vérifiée par plusieurs auteurs (Debabeche et Achour ,2007). En effet, Bélanger (1928) est le premier à avoir présenté une relation exprimant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, appliquée au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal.

Dans l'étude du ressaut hydraulique, ce qui a toujours intéressé les chercheurs c'est la détermination des dimensions du bassin de dissipation, afin d'assurer une dissipation complète de la charge hydraulique. Ces dimensions sont étroitement liées aux caractéristiques du ressaut et à la forme géométrique de la section du canal dans lequel il évolue.

Parmi les travaux les plus intéressants sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire on peut citer ceux effectués par (Ali ghomri, s kateb, f riguet ,2018) La présente étude s'intéresse à l'analyse et l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire à pente positive.

Récemment plusieurs chercheurs ont abordé la question du ressaut hydraulique d'un point de vue théorique et appliqué, les plus importants et les plus récents d'entre eux sont certainement Hager et (Sinniger ,1990), (Hager et Bretz ,1987) et (Rajaratnam ,2002) qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal, (Hager et Wanoschek ,1987), (Achour et Debabeche ,2003) et (Debabeche et Achour ,2007) dont les travaux sont relatifs au ressaut triangulaire horizontal. Par ailleurs, (Rajaratnam, 1966; Mc Corcodal, 1994; (Pagliara. S. et Peruginelli, 2000 ; Beiram et Chamani, 2006) ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Parmi les travaux les plus intéressants sur le ressaut hydraulique en canal incliné fut celle de(Bakhmeteff et Matzké, 1938), qui ont évoqué dans leur étude, le profil de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. (Kindsvater ,1944) classifiât les ressauts à pente positive en quatre principaux types : le type A, type B, type C et type D.

Les études récentes concernant le ressaut dans les canaux inclinés ont été dirigées par (Hager ,1988) et (Ohtsu et Yasuda 1991) mais toujours dans un canal rectangulaire. (Debabeche et al 2009) ont étudié théoriquement le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° incliné d'une pente positive. (En 2010, Cherhabil)a abordé dans sa thèse de doctorat le ressaut hydraulique dans deux profils de canaux inclinés : le canal triangulaire et le canal profilé en "U".

Cette dernière étude a abordé le sujet d'un point de vue théorique et expérimental. Par ailleurs, pour ce qui concerne le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, la première étude

INTRODUCTION GÉNÉRALE

devrait être attribuée à (Posey et Hsing, 1938). Par la suite (Sandover et Holmes ,1962) ont étudié le ressaut hydraulique dans des canaux trapézoïdaux pour des inclinaisons de parois latérales de 30°, 45°, 60°. Hager et Wanoschek ont étudié en 1989 le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique à angle d'ouverture de 45°.

Cette présente thèse a pour objectif d'étudier, d'un point de vue théorique et expérimental, le ressaut hydraulique, contrôlé par un seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire incliné à fond rugueux. Des relations fonctionnelles, en terme adimensionnel, liant les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'influence de la rugosité du fond du canal sur les caractéristiques du ressaut, seront proposées. Il est nécessaire de noter que le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à fond rugueux n'a jamais fait l'objet d'études antérieures, et c'est d'ailleurs ce qui nous a motivés à entreprendre ce sujet.

- à première partie, travers laquelle nous passerons en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans les canaux inclinés d'une part, et les études relatives au ressaut hydraulique à fond rugueux . Cette partie bibliographique sera divisée en trois chapitres
- ✓ Dans le premier chapitre nous allons donner un bref aperçu sur le ressaut hydraulique classique.
- ✓ Le second chapitre présente les travaux les plus intéressants dans le domaine du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince dans les canaux inclinés.
- ✓ Le troisième chapitre sera consacré à l'étude du ressaut hydraulique à fond rugueux, les travaux de (Rajaratnam ,1968) et (Rajaratnam ,2002) relatifs au ressaut hydraulique en canal rectangulaire respectivement à fond rugueux et à fond ondulé. Il est nécessaire de noter qu'à l'exception des travaux de Rajaratnam le ressaut hydraulique dans les canaux à fond rugueux n'a pas reçu une attention particulière.
- La deuxième partie de notre étude, consiste à analyser expérimentalement et théoriquement les caractéristiques des ressauts hydrauliques évoluant dans un canal rectangulaire à pente variable à fond rugueux. L'objectif principal de cette étude est de déterminer expérimentalement les relations fonctionnelles liant les différents paramètres.
- Le premier chapitre a pour objectif d'étudier, expérimentalement, le ressaut hydraulique, dans un canal rectangulaire. Des relations fonctionnelles, en terme adimensionnel, liant

INTRODUCTION GÉNÉRALE

les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'influence de la rugosité du fond du canal sur les caractéristiques du ressaut, seront proposées.

- ✓ Le deuxième chapitre sera consacré à l'établissement des relations théoriques et expérimental qui régissent le ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant dans un canal de section droite rectangulaire à pente variable. L'application de l'équation de la quantité de mouvement montre que ce type de ressaut est régi par trois paramètres pouvant former une relation fonctionnelle de la forme : $f(Fr, Y, \alpha) = 0$.
- ✓ Le troisième et dernier chapitre L'objectif principal étant la détermination des relations fonctionnelles pratiques permettant le dimensionnement des bassins de dissipation de charge hydraulique à l'aval des barrages, ainsi que le dimensionnement des canaux d'irrigation. En effet, il a été étudié d'une manière théorique. Le développement théorique, permettant de trouver une relation semi-théorique de la forme $f(Y, Fr, \alpha, Cr)$, tels que Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, $F1$ est le nombre de Froude incident et Cr est le coefficient de résistance et α la pente du canal.

Chapitre I :
Ressaut Hydraulique Dans un
Canal Rectangulaire

INTRODUCTION A LA PARTIER BIBLIOGRAPHIQUE

Cette première partie de notre étude bibliographique a pour but principal, de passer en revue les travaux les plus intéressants, ayant abordé le ressaut hydraulique en canal rectangulaire et triangulaire d'une part, incliné. Cette partie est scindée en trois chapitres.

- Le premier chapitre de cette section de nos recherches sera consacré à l'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons principalement aux travaux (Bradley et Peterka, 1957) concernant la forme du saut, ainsi qu'aux travaux de (Hager, 1990) concernant les caractéristiques du saut classique. En d'autres termes, ce chapitre se concentrera sur le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire
- Le deuxième chapitre, nous permettra d'aborder les travaux relatifs au ressaut incliné
 - Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à pente positive, où on abordera les travaux de (Kindsvater, 1944) qui concernent le ressaut hydraulique en canal rectangulaire à pente positive.
 - Le ressaut hydraulique dans un chenal rectangulaire incliné à pente négative, sur lequel nous porterons plus particulièrement notre attention sur l'étude menée par (McCorquodale et Mohamed, 1994) qui ont voué leur temps et leur énergie à l'investigation.

À fois théorique et expérimentale, de ce sorte de ressaut particulier.

L'étude des nombreuses différentes caractéristiques qui déterminent la régulation du saut sera l'objectif principal de l'étude. Après cela, des propositions de relations qui lient des paramètres sans dimension seront faites.

- Le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire incliné à pente positive, où on va aborder les travaux de (M. Debabeche *et al.*, 2009) et (Cherhabil, 2010), qui ont traité à l'étude, théorique et expérimentale, du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire et profilé en 'U' à pente positive.
- Dans le troisième chapitre de recherche bibliographique rappellera les deux méthodologies proposées par (N. Rajaratnam, 1968) et (Rajaratnam, 2002), qui traitent le saut hydraulique comme se produisant dans un canal rectangulaire au fond rugueux et ondulé.

I.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous allons donner un bref aperçu sur le ressaut hydraulique classique. Le ressaut hydraulique est une élévation rapide de la surface libre d'un écoulement persistant qui se produit lors du passage du régime torrentiel au régime fluvial. Elle s'accompagne d'une agitation et de pertes d'énergie considérables. (Figure 1.1).

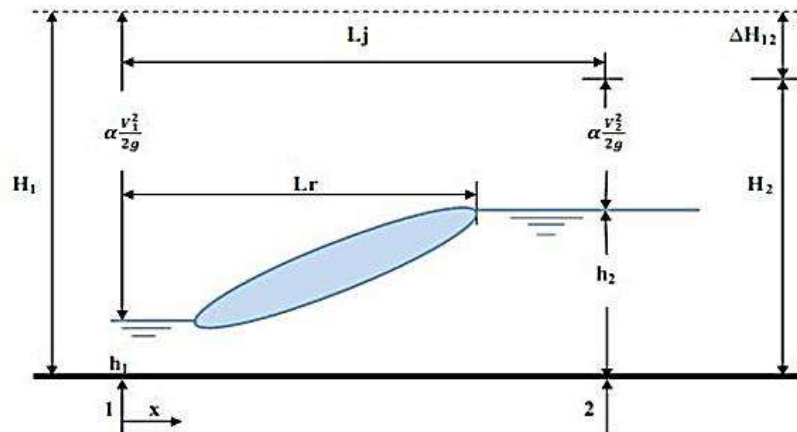


Figure 1.1. Ressaut hydraulique

Le ressaut du point de vue hydraulique, se distingue par un ensemble de paramètres qui sont ;

- La hauteur initiale marquée h_1 et la hauteur finale marquée h_2 . Ces deux paramètres sont appelés également hauteurs conjuguées du ressaut.
- Longueur du ressaut marquée L_j est représentée par la distance entre la section 1 et 2.
- Par contre la distance L_r est appelée la longueur du rouleau.
- Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut
- Les pertes de charge sont représentées par le paramètre ΔH_{12} .
- L'énergie dissipée par ce phénomène, est appelée la capacité de dissipation du ressaut. Elle est évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ces sections initiales et finales à la charge totale dans sa section initiale.

En amont d'un ressaut, l'écoulement torrentiel est généralement caractérisé par coefficient cinétique appelé souvent le nombre de FROUDE ($F_1 > 1$). Il est matérialisé

Par la formule : $F_1 = \frac{v}{\sqrt{gh}}$

Le nombre de Froude (F_1) mis en relation les forces d'inertie et les forces de la pesanteur. En d'autres termes, ce nombre représente la relation entre la vitesse de l'écoulement et celle de la propagation des petites ondes (célérité d'onde) où

V : est la vitesse moyenne de l'écoulement.

$V_c = \sqrt{gh}$: la célérité des petites ondes, dans un canal rectangulaire d'une largeur infinie.

Que l'on peut interpréter comme le rapport des forces d'inertie aux forces de gravité ou comme la racine carrée du rapport de l'énergie cinétique à l'énergie potentielle.

I.2.CLASSIFICATION DU RESSAUT CLASSIQUE :

Les auteurs (Bradley et Peterka, 1957), ont mis en évidence quatre types de ressaut classique, en se basant sur le nombre de Froude ;

a. Le pré – ressaut.

Le Pré-ressaut où F_1 est compris entre 1.7 et 2.5 ; Dans ce cas la surface est composée d'une série de petits rouleaux pour $F_1 = 1,7$; ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible.

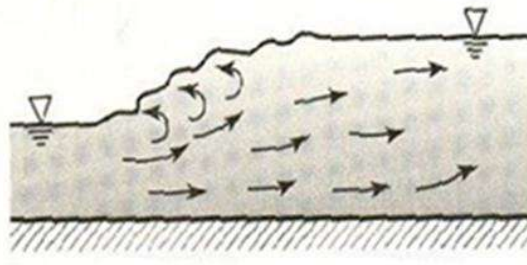


Figure 1.2.a : Le Pré-ressaut

b. Ressaut de transition.

Le ressaut de transition où F_1 est compris entre 2.5 et 4.5 ; Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

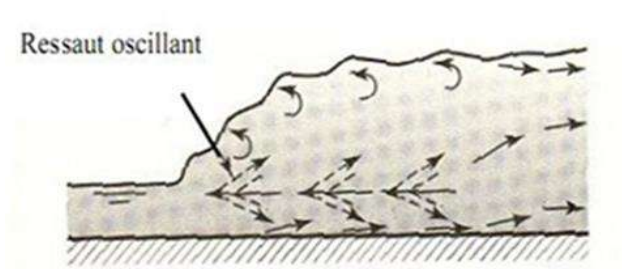


Figure 1.3.b : Le ressaut de transition

C. Ressaut stable.

Le Ressaut stable où F_1 est compris entre 4.5 et 9 C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans le bassin de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

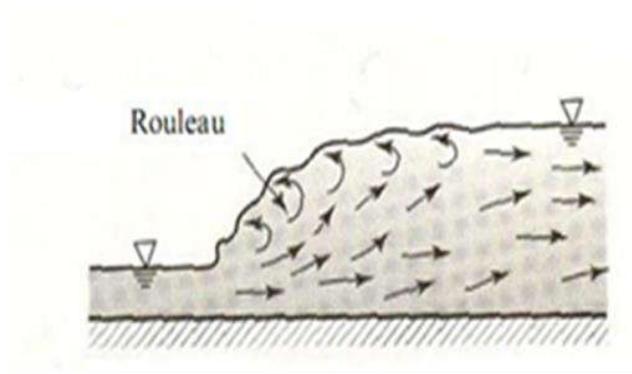


Figure 1.4.c : Le ressaut stable

d. Ressaut agité ou clapoteux.

Le Ressaut agité ou clapoteux où F_1 est supérieur à 9. Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très élevée. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.

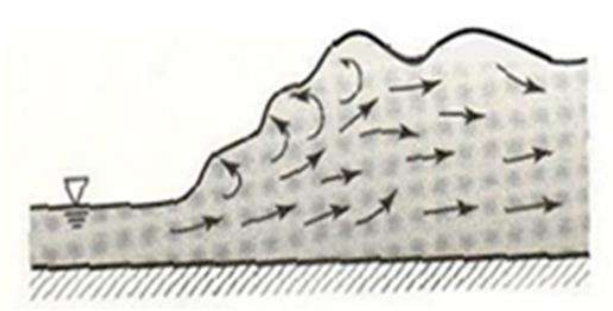


Figure 1.5.d : Le ressaut agité

I.3. LES PARAMETRES HYDRAULIQUES DU RESSAUT :

I.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :

La figure 1.2 montre un ressaut classique évoluant entre sa section initiale et finale 1 et 2

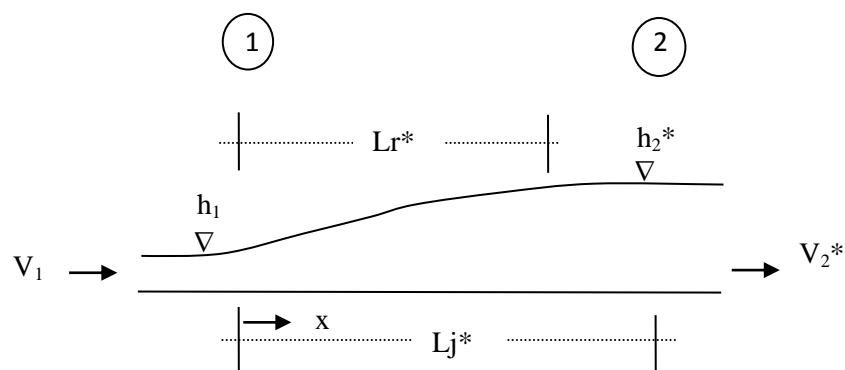


Figure 1.6 : Ressaut hydraulique classique.

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

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

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

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

b : est la base du canal rectangulaire.

h_1 et h_2 sont respectivement les hauteurs initiale et finale du ressaut

Comme indiqué précédemment, l'équation de quantité de mouvement régit le saut, en particulier la deuxième loi de Newton entre les sections de départ et finale. Cette demande n'observe que la variation de quantité de mouvement entre les sections 1 et 2 être égale à la somme des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement.

L'application de cette loi nécessite quatre hypothèses simplificatrices :

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

En outre, en raison du fait que le ressaut évolue dans un canal de pente nulle la composante tangentielle du poids propre de la masse liquide considérée est également nulle. Ainsi, les forces extérieures appliquées à la masse liquide en mouvement se résument aux forces de pressions hydrostatiques F_1 et F_2 s'exerçant sur les sections 1 et 2. Ces forces s'écrivent :

$$F_1 = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_1 \cdot A_1 \quad (1.3)$$

$$F_2 = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_2 \cdot A_2 \quad (1.4)$$

$\bar{\omega}$ Désigne le poids spécifique du liquide, h_1 et h_2 sont respectivement la position du centre de gravité des sections A_1 et A_2 par rapport à la surface libre de l'écoulement dans ces sections. On peut ainsi écrire que

$$\bar{h}_1 = h_1/2 \quad \text{et} \quad \bar{h}_2^* = h_2/2$$

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

$$\bar{\omega} \cdot b h_1^2 / 2 + \rho \cdot Q v_1 = \bar{\omega} \cdot b h_2^2 / 2 + \rho \cdot Q v_2 \quad (1.5)$$

Où $\varpi = \rho g$, ρ est la masse volumique du liquide et g l'accélération de la pesanteur. En tenant compte des relations (1.1) et (1.2) et sachant que le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut est tel que :

$$F_1^2 = Q^2 / (g \cdot b^2 \cdot h_1^3) \tag{1.6}$$

La relation (1.5) conduit donc à écrire :

$$Y^* = h_2^*/h_1 = 0,5[(1 + 8 \cdot F_1^2)^{1/2} - 1] \tag{1.7}$$

Cette relation finale (1.7) de(Belanger, 1828)explique donc la variation des hauteurs conjuguées du ressaut permet le rapport Y^* fonction du nombre de Froude IF_1 , le paramètre Q , g , b et h_1 dans la relation (1.6) peut être déterminé en écrivant que la relation (1.7) permet le calcul de la profondeur finale h_2 du ressaut.

Ainsi que celles en(W. Hager etSinniger, 1985)proposent une relation approchée de calculer applicable pour les nombres de Froude $IF_1 > 2$ et l'équation (1.8) se réduit à :

$$Y^* = h_2^*/h_1 = \sqrt{2} \cdot F_1 - 1/2 \tag{1.8}$$

La figure 1.7 montre que Y^* ont été obtenues par un ajustement linéaire pour une certaine gamme de valeurs du nombre de Froude F_1 .les relation (1.7) et (1.8) sont représentées le graph suivent.

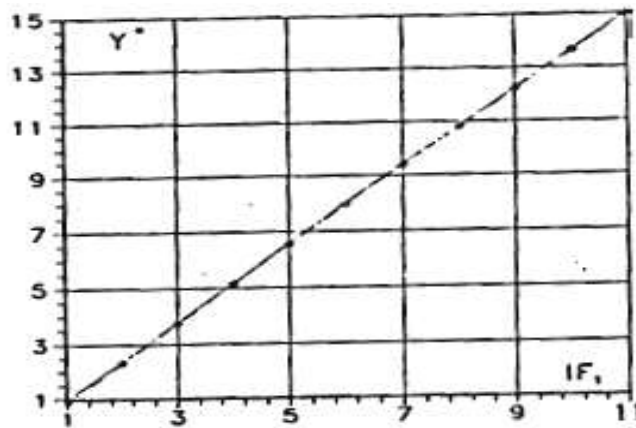


Figure 1.7 : Rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 . (_) Courbe tracée selon la relation [1.7].

I.3.2. Longueurs caractéristiques du ressaut :

I.3.2.1. Longueur Du Rouleau :

En(Hager, 1990)définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisant ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé. La figure (1.8) montre ces deux type de ressaut et les longueurs L_r^* qui leur correspondent.

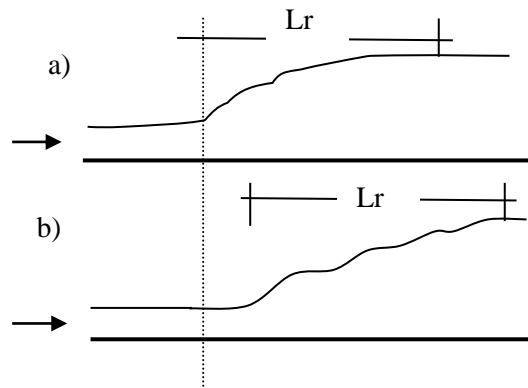


Figure 1.8 : Aspect du ressaut classique

- a) rouleau développé.
- b) rouleau non développé.

Le rouleau non développé : ce rouleau est caractérisé par une longueur plus courte que celle du rouleau développé, sa surface à l'aval se présente sous forme d'une vague. Au fond de la masse liquide en mouvement, on peut distinguer un tourbillon de fond considérée comme une zone de séparation. En conséquence de ce tourbillon, le jet entrant dans la section initiale du ressaut est dévié vers la surface libre. (Debabeche, 2003)

Le rouleau développé : Le rouleau développé présente a une surface quasi stable et présente une finition assez lisse dans l'ensemble. Le jet qui entre dans la première portion du ressaut reste parallèle au fond du chenal sur une certaine distance avant de se détacher et de descendre vers l'aval.

$$\lambda_r = 12 + 160 \cdot T_{gh} \left(\frac{F_1}{20} \right) \text{ pour } \bar{\omega} = \left(\frac{h_1}{b} \right) < 0.1 \quad (1.9)$$

$$\lambda_r = 12 + 100 \cdot T_{gh} \left(\frac{F_1}{12.5} \right) \text{ pour } 0.1 < \bar{\omega} < 0.7 \quad (1.10)$$

«Tgh» indique la tangente hyperbolique.

Il faut noter ici que pour une gamme des valeurs de nombre de Froude $2.5 < F_1 < 8$ les auteurs ont proposé une relation plus simple que (1.9) et (1.10) celle-ci est de la forme d'une équation linéaire de pente 8.

$$\lambda_r = \frac{L_r}{h_1} = 8. (F_1 - 1.5); \quad 2.5 < F_1 < 8 \quad (1.11)$$

I.3.2.2. Longueur du ressaut :

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

I. 4. RENDEMENT DU RESSAUT :

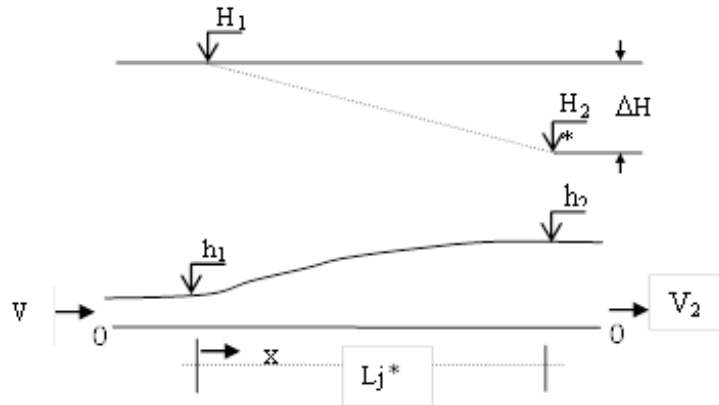


Figure 1.9 : Ligne de charge totale le long du ressaut classique

$$\Delta E_{12} = \Delta H_{12} = \left(\alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \right) - \left(\alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \right) \quad (1.12)$$

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

$$H_1 = \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \quad (1.13)$$

Et la charge totale dans la section aval est :

$$H_2 = \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \quad (1.14)$$

On désigne par : V_1 et V_2 les vitesses moyennes qui correspondent aux sections amont et aval du ressaut et le facteur de correction de l'énergie aval du ressaut et le facteur de correction de l'énergie.

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

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (1.15)$$

Où : $A_1 = b \cdot h_1$

$A_2 = b \cdot h_2$

Donc, en introduisant la relation (1.15) dans (1.12) on obtient, tous calculs faits, l'expression classique de la perte de charge due au ressaut en canal rectangulaire de pente faible ou nulle.

$$\Delta H_{12} = (h_1 - h_2) + \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) \cdot \left(\frac{q^2}{2g} \right) \quad (1.16)$$

$q = \frac{Q}{b}$, est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'expression de la quantité de la quantité de mouvement définie par la relation (1.12).

$$\frac{q^2}{2g} = \frac{(h_1 h_2^2 + h_1^2 h_2)}{4} \quad (1.17)$$

En remplaçant la relation (1.17) dans (1.16) on obtient :

$$\Delta H_{12} = \frac{(h_2 - h_1)^3}{(4h_2 \cdot h_1)} \quad (1.18)$$

Donc à partir de la relation (1.18), on peut conclure que la perte de charge est due au ressaut classique et ne dépend que des hauteurs conjuguées. La capacité de dissipation du ressaut est représentée par η :

$$\eta = \frac{\Delta H_{12}}{H_1} = \frac{(H_1 - H_2)}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (1.19)$$

Le rapport $\frac{H_1}{H_2}$ est appelé efficacité du ressaut. Donc, pour déterminer les charges totales dans les sections amont et aval, on utilise les relations (1.13) et (1.14) et en tenant compte de la relation (1.6) du nombre de Froude amont F_1 , on obtiendra :

$$H_1 = h_1 \left| 1 + \frac{F_1^2}{2} \right| \quad (1.20)$$

$$H_2 = h_1 \cdot \left| Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right| \quad (1.21)$$

Où Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par la relation (1.7) de (Belanger, 1828). En remplaçant (1.20) et (1.21) dans l'expression du rendement du ressaut (1.19) on obtiendra :

$$\eta = 1 - \left| \frac{\left(Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right)}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \right| \quad (1.22)$$

(W. Hager et Sinniger, 1985) ont proposé une expression approchée qui nous permet de calculer tous simplement le rendement du ressaut et cela pour un nombre de Froude amont $F_1 > 2$

$$\eta = \left| 1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right|^2 \quad (1.23)$$

Les relations (1.22) et (1.23) sont représentées graphiquement sur un système des coordonnées cartésiennes, illustrées par la figure (1.10)

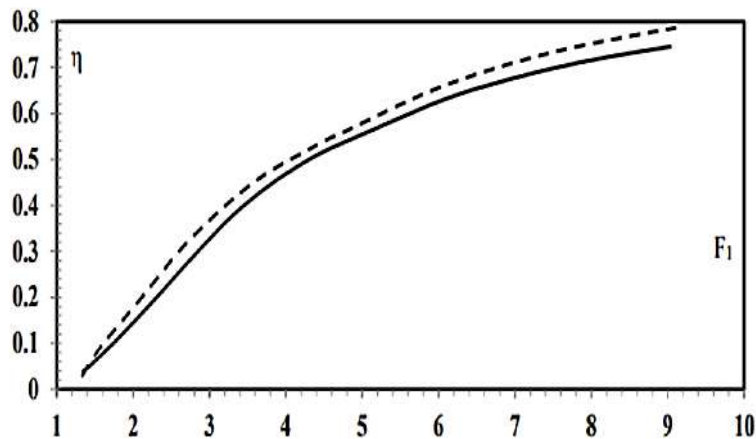


Figure 1.10 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 (—) Courbe tracée selon la relation (1.22), (-----) courbe tracée Selon la relation (1.23)

La figure (1.10) montre d'une part que le rendement η^* du ressaut classique est supérieur à 50% pour $F_1 \geq 5,1$ et que les rendements calculés en application de la relation approchée (1.23) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.22) d'autre part ; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

I.5.CONCLUSION :

Ce chapitre passe en revue certaines des recherches les plus importantes sur les ressauts hydrauliques dans les canaux rectangulaires (ressauts hydrauliques classiques).

Nous avons fourni les plusieurs formes du ressaut qui peuvent être trouvées dans la catégorisation de (Bradley et Peterka, 1957). Ces formes reposent sur la variation du nombre de Froude F_1 qui se trouvent en amont de l'étape. A travers ce chapitre, nous avons d'abord examiné les recherches de (Hager, 1990) sur les propriétés du saut traditionnel.

Ceux-ci incluent la hauteur au début, la hauteur à la fin, la longueur totale et la distance totale de roulis. La relation de Bélanger, qui exprime le rapport des hauteurs conjuguées Y^* en fonction du nombre de Froude F_1 en amont du ressaut, est dérivée de l'équation de quantité de mouvement appliquée entre les sections initiale et finale du ressaut hydraulique, en supposant aucune perte de charge autre que celles causées par le ressaut.

CHAPITRE II :

Ressaut Hydraulique Dans un Canal Incline

II.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous allons traiter les travaux relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal incliné à pente négative et pente variable.

- ❖ Le ressaut hydraulique dans canaux ne pente négative sont ceux d'étude de
- ❖ (McCorquodale et Mohamed, 1994), qui ont étudié le dans cas limite.
- ❖ Le ressaut hydraulique dans canaux ne pente positive. Ainsi que ceux, plus récemment, de (M. Debabeche et al., 2009), qui a été consacré à l'étude expérimentale sur ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince, dans un canal de section droite triangulaire.

II.2. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINE À PENTE POSITIVE

II.2.1. Classification des ressauts inclinés.

Selon (Rajaratnam, 1966), des études de ce type de ressaut ont précédemment été élaborées par (Darcy et Bazin, 1865) ainsi que par (Riejel et Beebe, 1917), qui sont toujours actuels. Ces études ont été effectuées avant les travaux effectués par Rajaratnam. Selon (W.H. Hager et Wanoschek, 1987), Elles étaient celui qui a développé et a implémenté la première méthode théorique. (K. Safranez, 1929) a repris où Elles s'est arrêté avec ses découverte. Le ressaut hydraulique incliné a été initialement examiné en détail par (Bakhmeteff et Matzke, 1936), qui ont rendu compte du profil de surface, de la longueur du saut et de la distribution des vitesses. Selon l'angle du pied du saut par rapport à l'extrémité aval de la pente, (Kindsvater, 1944) divise ces sauts en trois catégories distinctes (figure 2.1):

- ❖ Type A pour lequel le pied du ressaut coïncide à l'extrémité aval de la pente,
- ❖ Type B pour lequel le pied du ressaut se trouve entre le type A et le type C,
- ❖ Type C pour lequel la fin du rouleau coïncide avec l'extrémité aval de la pente et
- ❖ Type D pour lequel le rouleau se présente entièrement dans la portion inclinée.

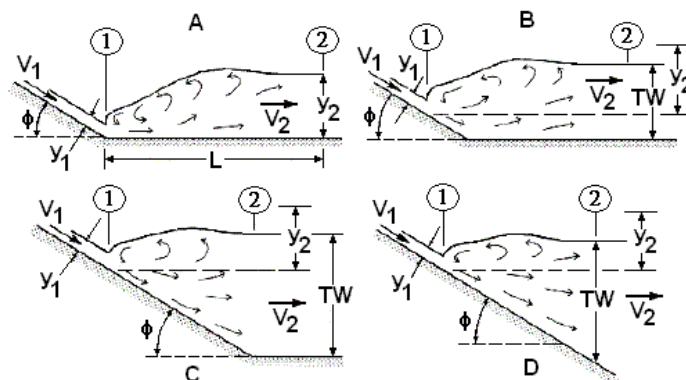


Figure 2.1 : Classification des ressauts inclinés selon Kindsvater (1944).

(Kindsvater, 1944) a présenté une méthode pour le rapport des hauteurs conjuguées basée sur son analyse du ressaut de type C à l'aide d'expériences. Ce houblon particulier a attiré l'attention de plusieurs chercheurs, dont (Bradley et Peterka, 1957), (Ariemma, 1958) et Van Besteen (1962). Les chercheurs ont examiné le ressaut de type D. par Bunyan (1958), Smith (1959), (Rajaratnam, 1963) ; (Wilogorski et Wilson, 1970) ; (Mura Hari, 1973), (Ohashi et al., 1973), (Nallamuthu Rajaratnam et Murahari, 1974) et (Mikhalev et Hoang, 1976).

D'autres qui étaient intéressés par le ressaut de type B incluent (W.H. Hager et Bretz, 1988) (Hager, 1990). (Mahmood, 1964) a mené des recherches sur le ressaut incliné à plusieurs degrés de pente. Il a été démontré que le saut classique et le saut de type A sont assez similaires. (Bradley et Peterka, 1957) sont tous deux arrivés à la même conclusion et l'ont vérifiée. Cependant, seules quelques recherches ont été menées sur le saut de type B.

II.2.2. Ressaut hydraulique de type C et de type D

La majorité de l'étude a été portée sur le ressaut de type C, qui est caractérisé par le fait que la fin du rouleau se reproduit simultanément avec la fin de la pente qui est située en aval. La formule suivante a été donnée par (Kindsvater, 1944).

Pour déterminer le rapport des hauteurs conjuguées.

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\left(1 + 8F_{1s}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (2.1)$$

Avec $h_1 = N_1 \cos \theta$ la profondeur initial, N_1 la longueur de la normale et θ l'angle d'inclinaison du canal (Figure 2.2), et le nombre de Froude modifié pour le canal incliné

($F_1 = v_1 / g N_1^{1/2}$) Pour le canal horizontal ($\theta = 0$) F_{1s} tend vers F_1

$$F_{1s}^2 = \frac{(\cos \theta)^{\frac{3}{2}}}{(1 - 2Kt \tan \theta)^{\frac{1}{2}}} F_1^2 \quad (2.2)$$

Selon les résultats des expériences menées par (Bradley et Peterka, 1957), ainsi que a découvert la connexion empirique suivante entre (Rajaratnam, 1966)

Les deux variables :

$$F_{1s}^2 = \Gamma F_1^2 \quad (2.3)$$

Où $\log_{10} \Gamma = 0,027\theta$. La relation (2.4) peut être approximée alors comme suit :

$$Y = \sqrt{2.10^{0.027\theta}} F_1 - \frac{1}{2} \quad (2.4)$$

La longueur du ressaut a été établie expérimentalement par (Bradley et Peterka, 1957) comme suit :

$$\frac{L_j}{L_j^*} = \exp\left(-\frac{4}{3}\theta\right) \quad (2.5)$$

Avec L_j^* étant la longueur du ressaut classique selon l'équation (1.8). Les équations (2.4) et (2.5) sont appliquées pour la pente : $\text{tg}(\theta)=0,3(\theta<17^\circ)$.

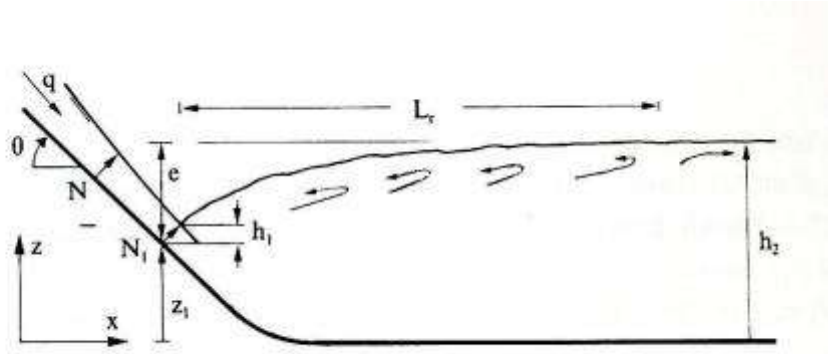


Figure 2.2 : Notation du ressaut incliné.

L'équation (2.4) peut également être appliquée au ressaut type D où h_2 représente la profondeur de l'écoulement à la fin du ressaut, mesurée verticalement du fond incliné jusqu'à la surface libre. Les longueurs de rouleau du type C et type D sont quasi identiques. (N Rajaratnam et Murahari, 1971), ont considéré la distribution des vitesses pour le cas du ressaut de type D pour $\theta < 0,25$. Les auteurs ont trouvé que la répartition des vitesses en amont du ressaut est comparable à celle du ressaut classique.

II.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL INCLINE A PENTE NEGATIVE

II.3.1 Classification du ressaut à pente négative

En utilisant l'équation de mouvement, (Stevensens, 1942) a théoriquement examiné le ressaut de pente négative. Une étude expérimentale sur la stabilité du ressaut à pente négative a été menée par (Okada et Aki, 1955) pour des nombres de Froude supérieurs à $F_1 > 9$. Selon (Rajaratnam, 1966) et (Rajaratnam, 1967), le ressaut en pente négative est un ressaut de type F, et il arrive à la conclusion qu'il est impossible de faire atterrir le ressaut entièrement sur la pente inverse. (Ohashi et al., 1973) et ses collègues ont mené des recherches sur le ressaut en pente négative et ont découvert qu'il est instable lorsqu'il est effectué totalement sur la pente inverse.

Cette forme de ressaut, que (McCorquodale et Mohamed, 1994) appellent une "configuration du ressaut limite" puisque le saut se positionne entièrement dans la portion en contre pente, a fait l'objet d'un examen assez explicite.

L'analyse bibliographique montre que le ressaut à pente négative est classé en quatre configurations principales représentées dans la figure 2.3 :

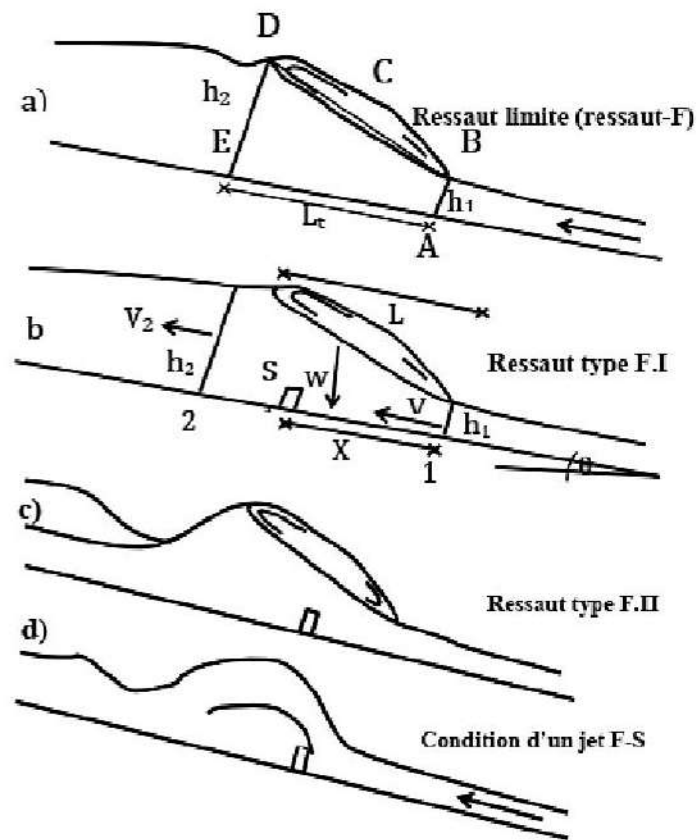


Figure 2.3 : Classification du ressaut à pente négative

Selon la figure 2.3, le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en contre pente peut se présenter en quatre formes principales :

Ressaut limite (Type F) qui désigne le ressaut sans obstacle à l'aval,

- Types FI et FII relatifs au ressaut forcé par seuil,

- Type F-S désignant la configuration d'un jet à travers un seuil.

- Pour le cas du type F-S, l'écoulement torrentiel saute au-dessus du seuil sans formation de ressaut.

II.4. ETUDE DE DE MC CORCODAL ET AL (1994)

(McCorquodale et Mohamed, 1994) ont étudié le ressaut hydraulique dans des canaux en contre pente, dans le but de déterminer les paramètres de définition du cas limite

D'existence de ce type de ressaut. La figure (2.4) montre le schéma de définition du ressaut à contre pente.

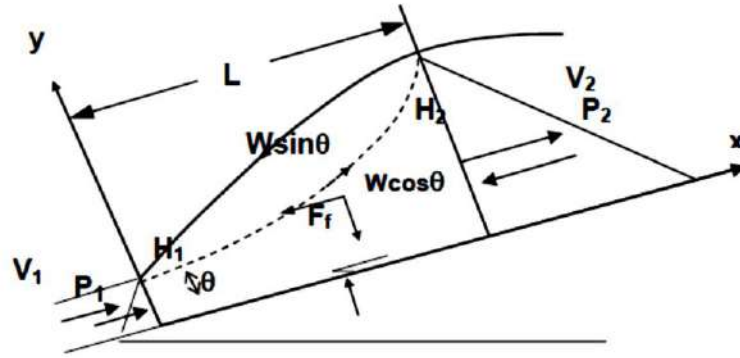


Figure 2.4 : Schéma de définition et volume de contrôle pour le ressaut en contre pente

L'équation de quantité de mouvement pour un ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à contre pente s'écrit comme suit :

$$\beta_2 \rho U_2 Q - \beta_1 \rho U_1 Q = P_1 - P_2 + w \sin \theta - F_f \quad (2.6)$$

Où P_1 et P_2 sont respectivement les forces hydrostatiques au début et à la fin du ressaut ; F_f est la force de frottement. Le poids W s'écrit comme suit :

$$w = \varphi_s \gamma L_r (H_2 + H_1) / 2 \quad (2.7)$$

Avec : γ le poids spécifique de l'eau, L_r la longueur du rouleau qui est pris dans ce cas comme longueur de ressaut, φ_s étant le facteur de forme. β est considéré comme égale à l'unité.

Un développement théorique de l'équation de quantité de mouvement conduit à l'équation suivante :

$$H_2/H_1 = (\sqrt{1 + 8G_a^2} - 1) / 2 \quad (2.8)$$

Avec :

$$G_a^2 = \frac{\beta_1 F_a^2}{1 - \frac{\varphi_s \cdot t g \theta}{H_2 - H_1} - \frac{2F_f}{\gamma(H_1^2 - H_2^2) \cos \theta}} \quad (2.9)$$

Avec :

$$F_1 = U_1 / (g H_1 \cos \theta)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

Une étude expérimentale a été conduite par (McCorquodale et Mohamed, 1994) dans un canal rectangulaire de 0,46m de largeur, 0,65m de profondeur et une contre pente de 1m de longueur. Trois pentes négatives ont été testées : $t_g \theta = -0.1, -0.167, -0.20$

La figure (2.5) montre la variation du rapport des hauteurs conjuguées H_2/H_1 pour différentes valeurs du nombre de Froude F_1 et pour trois contre pentes.

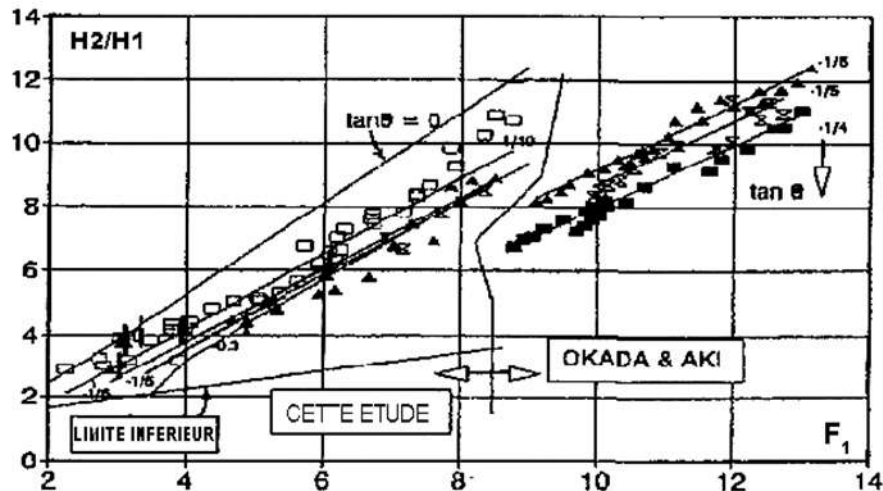


Figure 2.5 : Rapport de hauteurs conjuguées expérimentales et théoriques pour des cas limites et des cas stabilisés de ressaut en contre pente, provenant de l'étude de Mc Corcodal et al (1994), ainsi que celle de Okada et Aki (1059). $\tan \theta = (+) 0,0; (\square) -0,1; (\blacktriangle) -1,6; (\nabla) -1/5; (\blacksquare) -1/4$; Equation théorique

La figure (2.5) montre que l'augmentation de la pente négative engendre la diminution du rapport H_2/H_1 des hauteurs conjuguées. En outre, les mesures de H_1 , H_2 , L_r et le débit Q ont permis aux auteurs d'estimer expérimentalement le facteur de forme φ_s dans l'équation. Ils trouvent une valeur constante $\varphi_s 1,08 \pm 0,3$ pour les trois contre pentes étudiées.

Ces valeurs sont différentes de celle de (Okada et Aki, 1955), qui a trouvé. $\varphi_s 1,39 \pm 0,1$ (McCorquodale et Mohamed, 1994) attribuent cette différence à la définition de la longueur du ressaut et à la différence entre les conditions des deux études, car (Okada et Aki, 1955) ont expérimenté un autre type de ressaut en contre pente dit stabilisé, qui commence dans une pente positive et fini dans une pente négative. En outre il a été montré que la position du ressaut est très sensible à la variation de la profondeur conjuguée aval H_2 et précisément pour les nombre de Froude $F_1 < 4$, et nécessite un ajustement continu des conditions aux limites pour maintenir une position stable.

Cependant, pour les nombres de Froude $F_1 < 9$, les auteurs confirment que le ressaut limite en contre pente (type D) est difficile à établir.

La figure (2.6) montre la variation de la longueur relative L_r/H_1 en fonction de F_1 pour trois contre pentes.

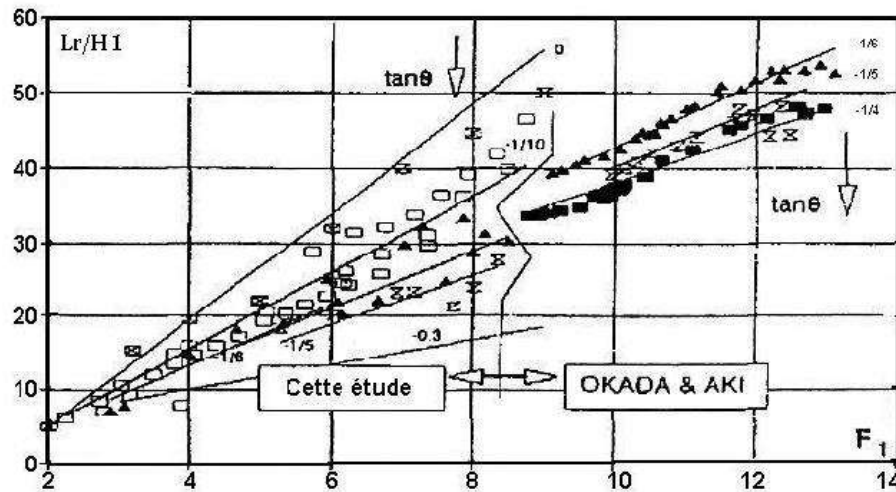


Figure 2.6 : longueurs du rouleau mesurées dans les cas limites et des cas stabilisés de ressaut en contre pente, provenant de l'étude de Mc Corcodal et al (1994), ainsi que celle de Okada et Aki (1955). $\tan \theta = (+) 0,0; (\square) -0,1 (\blacktriangle) -1,6; (\nabla) -1/5; (\blacksquare) -1/4$ Equation théorique

La figure 2.6 montre que pour une valeur donnée de F_1 , la longueur relative L_r/H_1 du rouleau diminue avec l'augmentation de la contre pente. Les mesures expérimentales ont été comparées avec la longueur relative du rouleau horizontal ; il a été montré que

Le rapport L_r/H_1 de la contre pente, pour une valeur donnée de F_1 , est plus faible que son homologue horizontal. Une relation empirique a été effectuée par (Okada et Aki, 1955), de la forme :

$$\frac{L_r}{H_1} = (C_0 + C_1 \sin \theta + C_2 \sin^2 \theta)[F_1 - 1] + D_1(1 + D_2 \sin^4 \theta) \quad (2.11)$$

Où les constantes empiriques sont les suivantes :

a. Ressaut limite selon (McCorquodale et Mohamed, 1994) et $aF_1 < 9$:

$$C_0 = 7,27 ; C_1 = 20,8 ; C_2 = 5 ; D_1 = 5 ; C_2 = 50$$

b. Ressaut Stabilisé selon (Okada et Aki, 1955) $9 < F_1 < 13$:

$$C_0 = 7,2 ; C_1 = 21 ; C_2 = 19 ; D_1 = 7,7 ; C_2 = 175.$$

II.5. ETUDE DE DEBACHE ET AL (2009) ET CHERHABIL (2010)

La recherche expérimentale de (M. Debabeche et al., 2009) tente d'évaluer expérimentalement l'impact de la pente du canal sur les paramètres de ressaut hydraulique, à savoir la hauteur du seuil s , la longueur du rouleau L_r , et la longueur du sauter L_j . Ils sont écrits sous forme adimensionnelle pour obtenir les rapports suivants : La hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil, la longueur relative $\lambda = L_j/h_1$ du ressaut et la longueur relative $\lambda_r = L_r/h_1$ du rouleau de surface.

II.5.1. Analyse théorique :

L'équation dynamique appliquée entre les sections 1 et 2 est rédigée comme suit :

$$\rho Q v_1 + P_1 + G \sin \alpha = \rho Q v_2 + P_2 \quad (2.12)$$

où ρ est la masse volumique, et Q le débit volume.

- La figure 2.7 montre un ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire avec une pente positive.

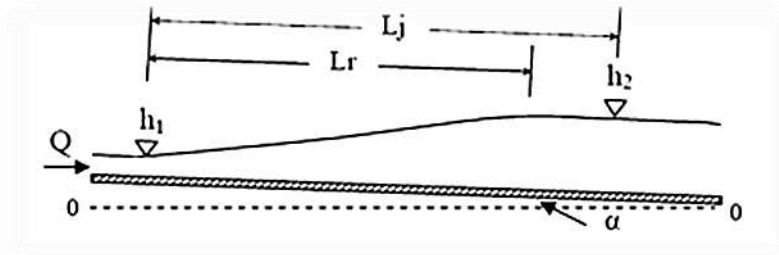


Figure 2.7 : Ressaut hydraulique sur une pente positive

Le poids de l'eau G ainsi que les forces de pressions P_1 et P_2 peuvent être exprimées, en appliquant les lois de l'hydrostatique :

$$P_1 = m\bar{\omega} \frac{h_1^3 \cos(\alpha)}{3}; P_2 = m\bar{\omega} \frac{h_2^3 \cos(\alpha)}{3}; G = \bar{\omega}V \quad (2.13)$$

Où h_1 et h_2 représente les profondeurs de l'écoulement respectivement en amont et en aval du ressaut, v_1 et v_2 sont les vitesses moyennes, α est l'angle d'inclinaison du canal,

V est le volume d'eau compris entre les sections 1 et 2, m est la cotangente de l'angle d'inclinaison θ des parois latérales du canal par rapport à l'horizontal.

et ω le poids spécifique du liquide en écoulement. Géométriquement, le volume V du ressaut dans un canal triangulaire représente le quart du volume d'une pyramide.

Du fait de la perturbation de la surface libre du ressaut causée par le rouleau de surface, la forme géométrique du volume équivalent V représentatif du ressaut hydraulique examiné n'était pas précisément prismatique, comme on le supposait. Il l'a fait. Ce volume doit être corrigé en le multipliant par un coefficient k , qui représente le rapport du volume réel au volume calculé du saut. Ce coefficient a été calculé sur la base de données expérimentale.

$$V = \frac{1}{3} m k L_j h_1^2 (1 + Y + Y^2) \quad (2.14)$$

En tenant compte des relations (2.13) et (2.14) la relation (2.12) devient

$$\frac{Q^2}{gm h_1^2} + \frac{m h_1^3 \cos \alpha}{3} + \frac{1}{3} m k L_j h_1^2 (1 + Y + Y^2) \sin \alpha \frac{Q^2}{gm h_2^2} + \frac{h_1^3 \cos \alpha}{3} \quad (2.15)$$

Le nombre de Froude F de l'écoulement incident pour une section triangulaire s'écrit alors comme suit :

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{gm^2 h_1^5} \quad (2.16)$$

Avec $m = \text{ctang}(\theta)$ (pour $\theta = 45^\circ$, $m=1$), g et θ sont, respectivement, l'accélération de la pesanteur et l'angle d'inclinaison des parois latérale du canal par rapport à l'horizontal.

En incluant la relation (2.16) dans la relation (2.15) on obtient :

$$F_1^2 + \frac{2}{3} \cos \alpha + \frac{2}{3} k \lambda (Y^2 + Y + 1) \sin \alpha \frac{F_1^2}{Y^2} + \frac{2}{3} Y^3 \cos \alpha \quad (2.17)$$

L'équation (2.17) peut être exprimée telle que :

$$F_1^2 = \frac{2}{3} Y^2 \frac{(Y^2 + Y + 1)}{(Y + 1)} \left[\cos(\alpha) - \frac{k \lambda \sin(\alpha)}{Y - 1} \right] \quad (2.18)$$

La relation (2.18) exprime le nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées de l'angle d'inclinaison α du canal par rapport à l'horizontale et la longueur relative $\lambda = Lj/h_1$ d'un ressaut hydraulique à pente positive, évoluant dans un canal de section droite triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° .

Le remplacement de $\alpha = 0$ dans la relation (2.17), donne la relation (2.19) de (W.H. Hager et Wanoschek, 1987) concernant le ressaut hydraulique classique dans le canal triangulaire.

$$F_1^2 = \frac{2}{3} Y^2 \frac{(Y^2 + Y + 1)}{(Y + 1)} \quad (2.19)$$

Pour déterminer le coefficient k de l'équation (2.18), l'approche proposée sera analysée à l'aide des données expérimentales.

La relation (2.19) a permis aussi d'obtenir l'expression de la longueur relative λ du ressaut tel que :

$$\lambda = \frac{(Y^3 - 1) \cos(\alpha) - \frac{3 F_1^2 (Y^2 - 1)}{2 Y^2}}{k (Y^2 + Y + 1) \sin(\alpha)} \quad (2.20)$$

II.5.2. Analyse expérimentale :

II.5.2.1. Détermination du coefficient k :

D'après la relation (2.16) l'expression du coefficient k est tel que :

$$k = \frac{(Y^3 - 1) \cos(\alpha) - \frac{3 F_1^2 (Y^2 - 1)}{2 Y^2}}{\lambda (Y^2 + Y + 1) \sin(\alpha)} \quad (2.21)$$

Les données expérimentales ont permis aux auteurs de trouver une valeur constante du coefficient $k = 1.12$, ce dernier ne dépend pas de la pente du canal. Cette observation a été également vérifiée par (McCorquodale et Mohamed, 1994) ainsi par (Pagliara et Peruginelli, 2000) pour le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en contre pente.

II.5.2.2. Relation explicite du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F1 et de l'angle d'inclinaison α du canal :

L'équation (2.5) apparaît sous une forme implicite et son application par conséquent se fait par itération. α

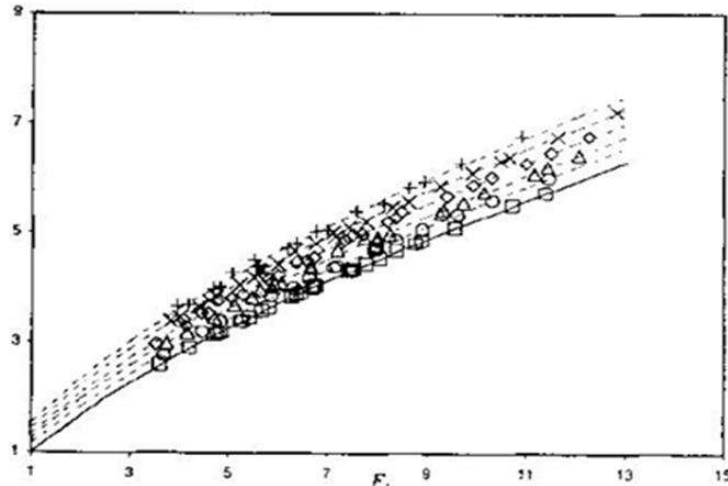


Figure 2.8 : variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude semi théorique F_1 selon la relation (2.18), pour six valeurs de la tangente de l'angle d'inclinaison du canal, tels que : $\tan(\alpha) = (\square) 0.00$ (selon debabeche et achour(2007)), $(\circ) 0.01$, 0.02 , $(\Delta) 0.02$, $(\diamond) 0.03$, $(\chi) 0.04$ et $(*) 0.05$ (*) 0.05 (-) Courbe selon relation (2.19), (---), courbe selon la relation(2.22)

Par ailleurs la figure (2.8) montre que pour F_1 donne la profondeur de l'écoulement h_2 augmente avec l'augmentation de la pente du canal $\tan(\alpha)$. En utilisant les mesures expérimentales, l'analyse de la relation (2.18) mène à la relation suivante (2.22) :

$$Y = (9,15 \tan \alpha + 1,07) F_1^{(0,7-1,4 \tan \alpha)} \quad (2.22)$$

$$\text{Pour } 0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$$

L'expression (2.22) est explicite d'où en déduit le rapport Y, sachant F_1 et $\tan(\alpha)$.

II.5.3 : Longueurs caractéristiques du ressaut :

II.5.3.1. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 :

La longueur L_j a été considérée comme étant la distance séparant la section initiale du ressaut et la section finale. L'objectif principal de cette partie de l'étude est de quantifier la longueur relative L_j/h_1 dans la gamme de valeurs testées de la pente du canal. La représentation de la relation $L_j/h_1 = f(F_1)$, montre que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative L_j/h_1 du ressaut. La figure 2.12 montre la variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

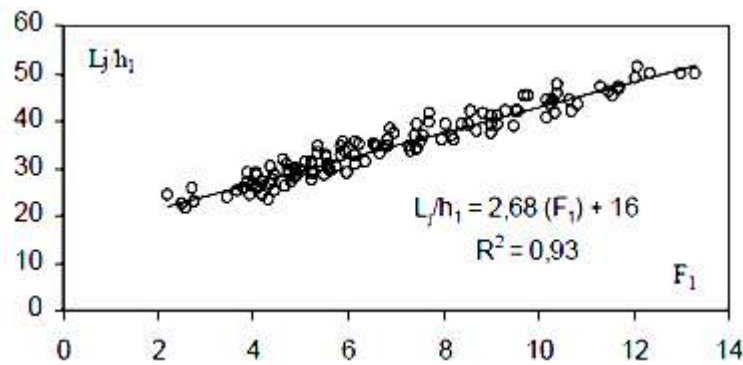


Figure 2.9 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$

Bien que le nuage de points soit assez dense, dû essentiellement à la difficulté de l'estimation de la longueur L_j , l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à une relation linéaire d'équation

$$L_j / h_1 = 2,68F_1 + 16 \quad (2.23)$$

Pour $2 < F_1 < 14$

II.5.3.2. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de F_1 :

La longueur L_r est considérée comme étant la distance séparant la section initiale et la section finale du rouleau de surface. L'analyse de la relation $L_r/h_1 = f(F_1)$, a permis également aux auteurs de montrer, que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative du rouleau.

La figure (2.10) montre la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

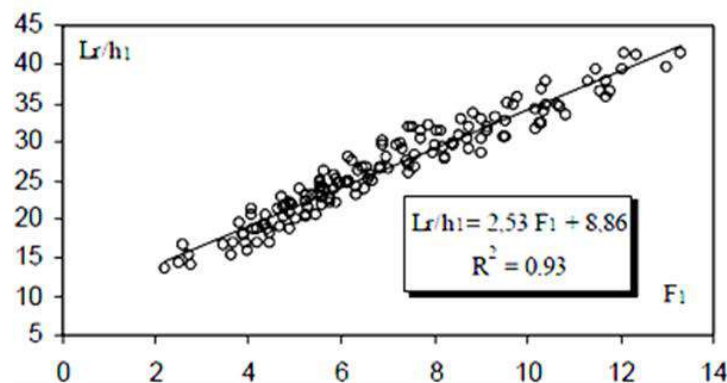


Figure 2.10 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$.

La figure 2.7 montre que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident, engendre celle de la longueur relative du rouleau. Par ailleurs, l'ajustement des points expérimentaux a permis aux auteurs d'aboutir à une relation linéaire d'équation :

$$L_r / h_1 = 2,53F_1 + 8,86$$

Pour $2 < F_1 < 14$

II.6. CONCLUSION

Dans la première partie de ce chapitre, nous examinons les travaux qui ont été effectués sur le sujet du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à pente ascendante. Il a été démontré que (Bakhmeteff et Matzke, 1936) ont mené la première enquête approfondie sur le ressaut hydraulique incliné. Dans leurs recherches, ils ont discuté du profil de surface, de la durée du ressaut et de la distribution des vitesses. Il s'agissait de la première étude de ce genre. (Kindsvater, 1944) a ensuite divisé les ressauts dans un canal qui avait une pente positive en quatre catégories principales. Ces catégories étaient de type A, type B, type C et type D, et elles étaient basées sur l'emplacement du pied du saut par rapport à l'extrémité aval de la pente.

En outre (Kindsvater, 1944) a recommandé une relation explicite, liant le rapport des hauteurs conjuguées au nombre de Froude F_1 , par la suite une relation simple a été proposée par (Rajaratnam, 1966), la longueur du ressaut a été estimée expérimentalement par (Bradley et Peterka, 1957)

En conclusion, nous avons abordé le ressaut sur une pente qui était dans le sens négatif. la bibliographie montre que la pente du ressaut peut être décomposée en quatre configurations principales : type F, type FI, type FII et type F-S. (McCorquodale et Mohamed, 1994), qui ont étudié la limite d'existence de cas des sauts à pente négative, sont crédités des contributions les plus importantes à ce domaine de recherche. une relation théorique a été proposée pour le type D, Pour les numéros de Froude $F_1 < 4$, les auteurs affirment que ce type de saut est particulièrement sensible à la modification de la profondeur combinée. Cependant, pour les nombres de Froude $F_1 < 9$, les auteurs affirment qu'il est difficile de construire le saut limite de pente négative (type D).

Le second objectif était de faire une présentation sur les travaux primaires qui ont été réalisés sur le ressaut hydraulique en canaux inclinés. Ces travaux incluent la recherche qui a été effectuée par (M. Debabeche et al., 2009) et (Cherhabil, 2010) qui ont analysé l'effet d'une pente positive sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique. Il a été montré qu'il existe un lien entre le rapport des profondeurs conjuguées (Y) en fonction du nombre de Froude F_1 et l'angle d'inclinaison du chenal α . Cette relation s'est avérée générique et avait une forme implicite.

CHAPITRE III :

Ressaut Hydraulique Dans un Canal Rectangulaire à Fond Rugueux

III.1. INTRODUCTION

Ce chapitre traitera des travaux les plus essentiels liés au saut hydraulique dans un canal rectangulaire à fond rugueux. La recherche la plus connue dans ce domaine est sans aucun doute celle de (N. Rajaratnam, 1968) et (Rajaratnam, 2002), concernant respectivement le saut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire avec un fond rugueux et le saut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire avec un fond ondulé.

III.2. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A FOND RUGUEUX

III.2.1. approche de Rajaratnam (1968)

III.2.1.1. Description Des Essais

Les essais ont été réalisés dans un canal rectangulaire de largeur 0,311 m, de profondeur 0,61 m et de longueur 4,877 m avec des côtés lisses en plexiglas et un fond rugueux. Cinq valeurs de rugosité ont été testées : $\varepsilon(\text{mm}) = 0,975 ; 2,225 ; 2,256 ; 2,469$ et 9,144. a été définie comme la rugosité équivalente des particules étendues uniformément sur le lit.

En tout, 37 essais ont été réalisés. Le profil moyen de surface d'eau, la longueur du rouleau de surface L_r et la longueur du ressaut L_j ont été mesurés. Selon (Rajaratnam, 1968), les mesures de rouleau sont très fiables, tandis que les mesures de la longueur de ressaut ont donné quelques erreurs (de manipulations) dans la fixation de la fin du ressaut.

III.2.1.2. Analyse des résultats

III.2.1.2.1. Hauteur finale h_2

Pour calculer la hauteur finale h_2 pour un ressaut sur un fond rugueux avec un écoulement torrentiel de hauteur initiale h_1 et de vitesse moyenne U_1 , utilisez la formule suivante.

$$h_2 = f_1(h_1, U_1, \rho, g, \nu, \varepsilon) \quad (3.1)$$

Où ρ est la masse spécifique et ν est la viscosité cinématique du liquide. En utilisant le principe d'analyse adimensionnelle, nous pouvons montrer, que l'équation (3.1)

Peut-être réécrite sous la forme suivante :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_2 \left[F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{g h_1}}, \frac{U_1 h_1}{\nu}, \frac{\varepsilon}{h_1} \right] \quad (3.2)$$

Où R est le nombre de Reynolds. Quand la valeur de R est très grande, l'effet de la viscosité du liquide sur la diffusion turbulente est négligé et l'équation (3.2) se réduit sous la forme suivante :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_3 \left[F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{g h_1}}, \frac{\varepsilon}{h_1} \right] \quad (3.3)$$

La Figure (3.1) indique la variation de h_2 / h_1 en fonction de F_1 pour différentes valeurs de la rugosité relative ε / h_1 .

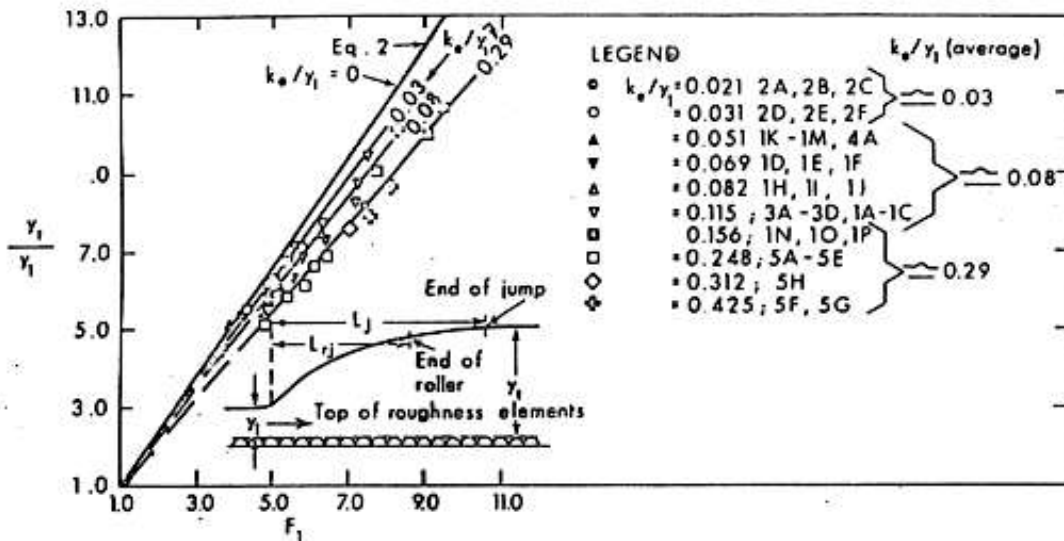


Figure 1.1 : Variation de h_2 / h_1 en fonction de F_1

La courbe de l'équation (3.3) représentée dans la Figure (3.1), peut être considérée comme limite de la rugosité relative égale à zéro. Trois droites sont dessinées pour $\varepsilon / h_1 = 0,03$; $0,08$ et $0,29$; Il se déduit les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 h_2/h_1 &= 1,30 - F_1 - 0,3 \quad \text{Pour } \varepsilon/h_1 = 0,03 \\
 h_2/h_1 &= 1,22 - F_1 - 0,24 \quad \text{Pour } \varepsilon/h_1 = 0,08 \\
 h_2/h_1 &= 1,10 - F_1 - 0,10 \quad \text{Pour } \varepsilon/h_1 = 0,29
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Selon (Rajaratnam, 1968),il serait plus pratique de reformuler l'équation de Belanger sous la forme approximative suivante :

$$h_2/h_1 = 1,41 - F_1 - 0,5 \tag{3.5}$$

Lorsqu'on élimine les constantes du côté droit des équations (3.4) et (3.5), l'erreur n'étant pas significative pour les grandes valeurs de F_1 , on pourrait écrire ainsi :

$$\frac{h_2}{h_2^*} = \lambda \left[\frac{\varepsilon}{h_1} \right] \tag{3.6}$$

Où λ est fonction seulement de la rugosité relative. Pour les trois valeurs de ε / h_1 dans l'équation (3.4), λ devient égal respectivement à $0,92$; $0,864$ et $0,78$. Les résultats expérimentaux sont retracés dans la Figure (3.2) avec h_2 / h_1 en fonction de ε / h_1 et une courbe moyenne pourrait en effet être tracée comme résultat préliminaire. Les trois valeurs moyennes mentionnées précédemment sont montrées aussi sur la Figure (3.2).

On observe que l'augmentation de la rugosité relative, h_2/h_2^* diminue de l'unité à $\varepsilon/h_1 = 0$ jusqu'à environ 0,783 à $\varepsilon/h_1 = 0,5$. Ainsi la réduction de la hauteur finale h_2 est tout à fait appréciable comparée à la hauteur finale classique, quand la rugosité est grande.

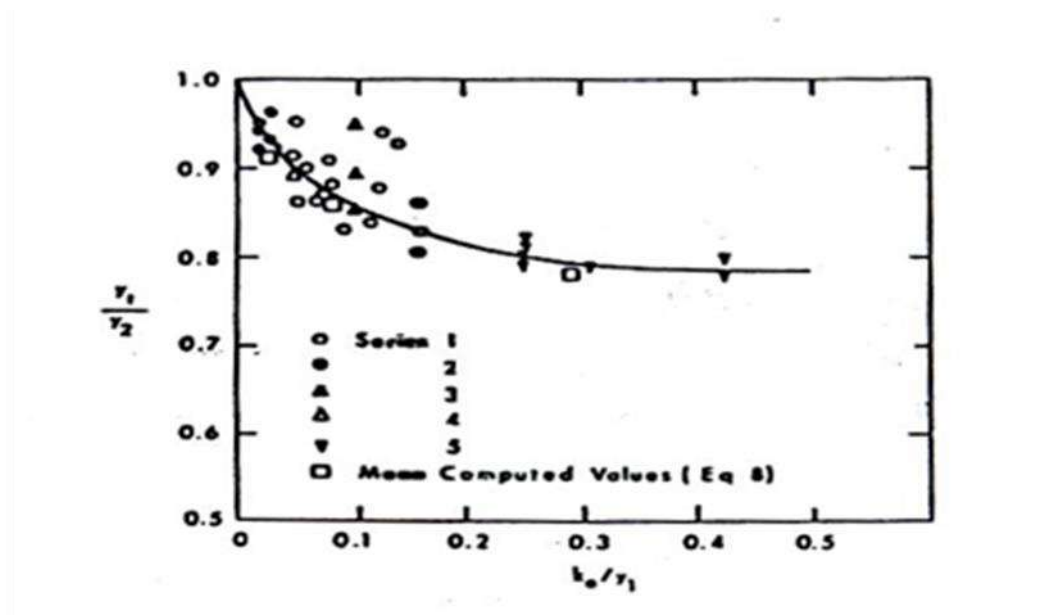


Figure 3.2 : Variation de h_2/h_2^* en fonction de ε/h_1

III.2.1.2.2. Longueur caractéristique

Les résultats expérimentaux de la longueur relative du rouleau de surface (par rapport à la hauteur conjuguée aval h_2 du ressaut classique) sont indiqués dans la Figure (3.3, a) avec la courbe du ressaut classique.

Une observation immédiate consiste à ce que pour ε/h_1 plus grand que 0,05 environ, la longueur du rouleau du surface à fond rugueux est réduite de moitié environ comparée à son homologue lisse.

Des conclusions semblables pourraient être déduites quant à la longueur du ressaut représentée à la Figure (3.3.b). Selon (N. Rajaratnam, 1968), les ressauts obtenus sont en accord au moins qualitativement avec les observations antérieures de *Vyzgo et Kuzminov*.

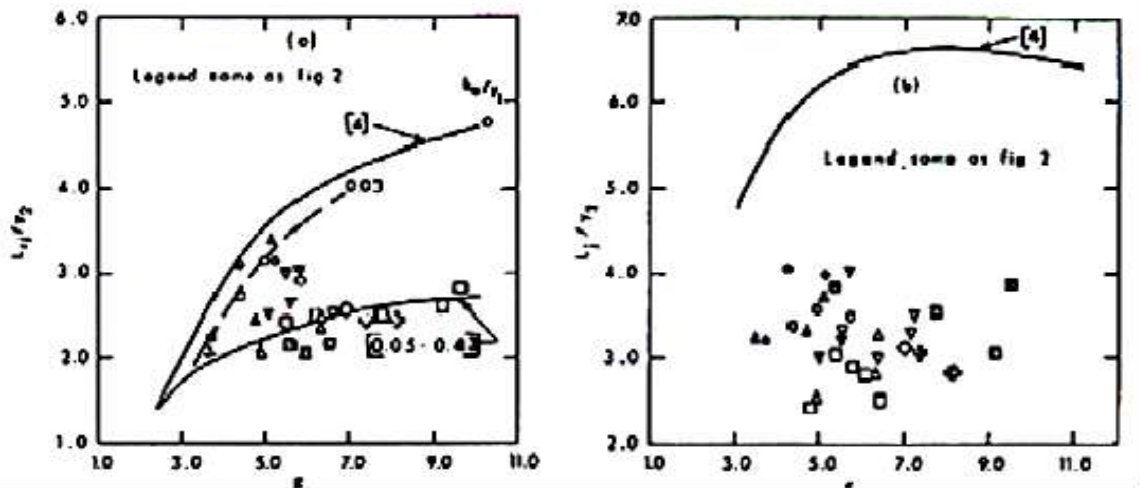


Figure 3.3 : Variation de la longueur relative : (a) $Lr/h2$ en fonction de $F1$; (b) $Lj/h*2$ en fonction de $F1$.

III.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A FOND ONDULE

III.3.1. Approche de RAJARATNAM (2002)

III.3.1.1. Description des essais

Le ressaut hydraulique est produit dans un canal de 0.446 m de largeur, 0.60 cm de profondeur et de longueur égale 7.6 m avec des parois en plexiglas. L'ondulation du fond du canal est réalisée par du métal en aluminium (Figure 3.4). Le lit ondulé crée des remous turbulents. La distance "s" entre les deux ondulations métalliques sinusoïdales est égale à 68 mm, et l'épaisseur "t" est de 13 à 22 mm. Trois pompes alimentent le réservoir lié au canal, et les débits sont mesurés par un débitmètre magnétique. L'eau entre dans le canal où un écoulement torrentiel uniforme est produit avec une profondeur h_1 . Un obstacle est utilisé pour contrôler la profondeur amont de l'écoulement dans le canal.

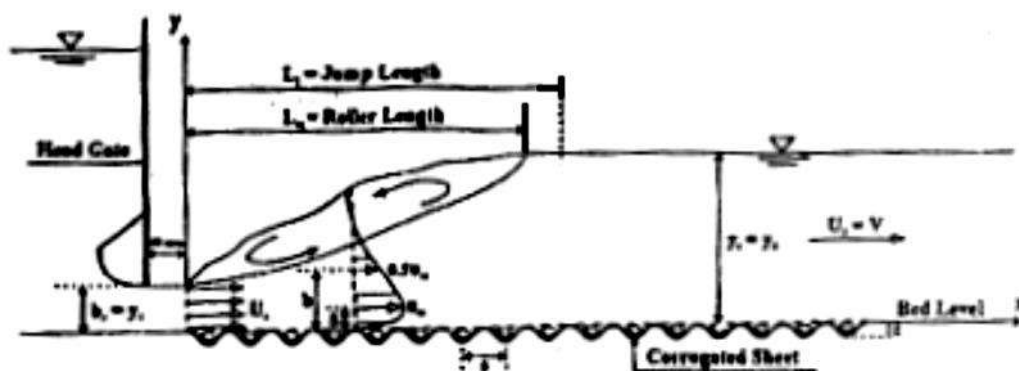


Figure 3.4 : Schéma de définition du ressaut hydraulique à fond nodule

Le tube de Prandtl de diamètre extérieur 3.0 mm, est connecté au manomètre vertical, pour la mesure du temps moyen des vitesses longitudinales U . Les profils de vitesse sont

mesurés dans plusieurs sections verticales à l'intérieur du ressaut, souvent à l'axe du canal au-dessus des crêtes de l'ondulation. Le nombre de Reynolds $Re = \frac{U_1 \times h_1}{\nu}$ est ensuite entre 50800 et 206756.

Trois valeurs de la rugosité relative, définie comme le rapport entre l'épaisseur de l'ondulation "t" et de la profondeur h_1 de l'amont du ressaut de valeurs 0,50 ; 0,43 et 0,25 sont testées.

La profondeur relative $y_{2^*} = \frac{h_2^*}{h_1}$ est donnée par l'équation de Belanger pour le canal rectangulaire à fond lisse

$$\frac{h_2^*}{h_1} = \frac{1}{2} [\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1] \quad (3.7)$$

III.3.1.2. Résultats expérimentaux :

La Figure 3.5 (a) montre les profils de surface du ressaut à fond ondulé pour onze expériences effectuées, avec une précision des mesures de 0,01 mm

Ces profils de surfaces permettent la détermination de la profondeur h_2 à l'aval de la surface du ressaut hydraulique et qui sont indiqués dans la Figure (3.5 (b)) où le rapport $\frac{[h(x)-h_1]}{(h_2-h_1)}$ est fonction de $\frac{x}{L_j}$, telle que : $h(x)$ est la profondeur de l'écoulement dans une section quelconque x .

La Figure 3.5 (b) montre aussi les profils de surface du ressaut qui sont approximativement semblables et peuvent être représentés par une courbe moyenne.

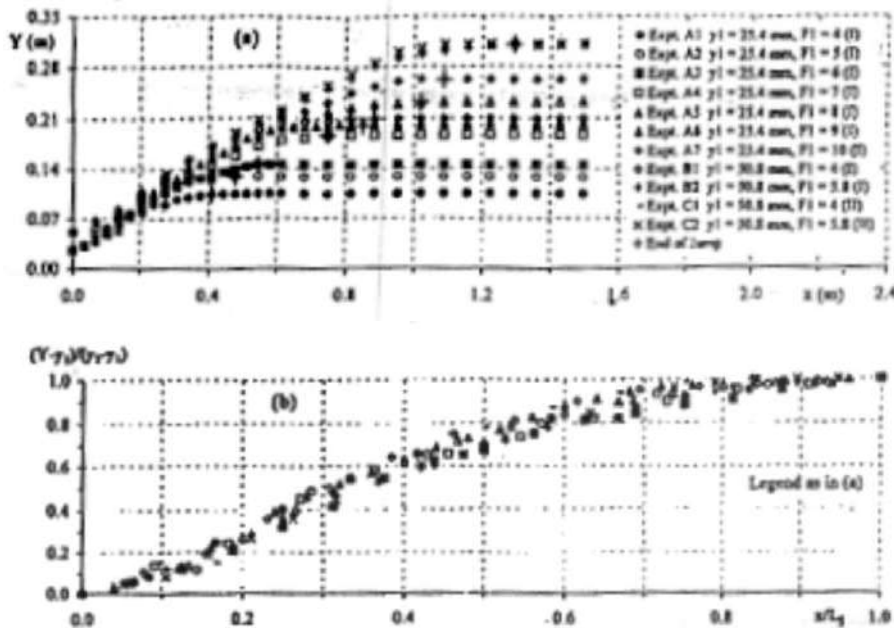


Figure 3.5 : (a) Profils de surface du ressaut ; (b) Profil généralisé de surface du ressaut

Pour un ressaut à fond ondulé, de rugosité d'épaisseur "t", avec un écoulement torrentiel de profondeur amont h_1 , de vitesse moyenne U_1 , la profondeur aval h_2 peut être écrite comme suit :

$$h_2 = f_2(h_1, U_1, g, \rho, \nu, \varepsilon, t) \quad (3.8)$$

Où : ρ (kg.m⁻³) : masse volumique du liquide et ν (m². s⁻¹) : viscosité cinématique.

La relation (3.8) peut être également reformulée comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_2 \left[F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, R_e = \frac{U_1 h_1}{\nu}, \frac{t}{h_1} \right] \quad (3.9)$$

Pour de grandes valeurs du nombre de Reynolds, la viscosité cinématique peut être négligée. Voir Rajaratnam 1976 ;(W.H. Hager et Bremen, 1989), l'équation (3.9) peut s'écrire comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} = f_3 \left(F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gh_1}}, \frac{t}{h_1} \right) \quad (3.10)$$

Les résultats expérimentaux sont alors illustrés par la Figure 3.6, représentant la variation de $\frac{h_2}{h_1}$ en fonction de F_1 , en tenant compte de la rugosité relative $\frac{t}{h_1}$. L'équation (3.7) est également montrée dans la même figure. La Figure 3.6 montre aussi que la rugosité relative $\frac{t}{h_1}$ n'a pas un effet significatif sur le rapport $\frac{h_2}{h_1}$.

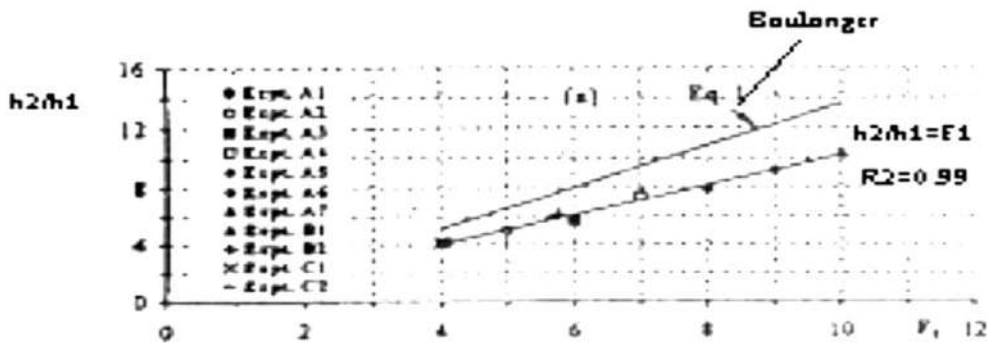


Figure 3.6 : Variation h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 .

Il a été trouvé aussi que le rapport des hauteurs conjuguées $\frac{h_2}{h_1}$ est approximativement égal au nombre de Froude incident F_1 . Selon Hence l'équation 3.10 Peut-être réécrite comme suit :

$$\frac{h_2}{h_1} \cong F_1 (R^2 = 0,99) \quad (3.11)$$

Par contre, pour les expériences effectuées par(N. Rajaratnam, 1968), pour le cas du canal rectangulaire à fond rugueux, la rugosité relative s'avère un paramètre important.

Par ailleurs, pour des valeurs relativement grandes du nombre de Froude incident, le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique peut être écrit comme suit :

$$\frac{h_2^*}{h_1} = \sqrt{2F_1} - 1 \cong \sqrt{2F_1} \quad (3.12)$$

Les résultats expérimentaux pour la longueur de rouleau de surface L_r et la profondeur aval h_2^* du ressaut hydraulique classique sont montrés dans la Figure 3.7 (a) où il a été montré que le rapport L_r/h_2^* est approximativement égal à 2,6.

La Figure 3.7 (b) illustre la variation de la longueur relative L_j/h_2 du ressaut hydraulique avec le nombre de Froude incident F_1 où on voit que L_j/h_2 est presque égal 3,0.

Il est intéressé d'observer que la longueur du ressaut avec un lit ondulé est approximativement la moitié que son homologue du ressaut classique.

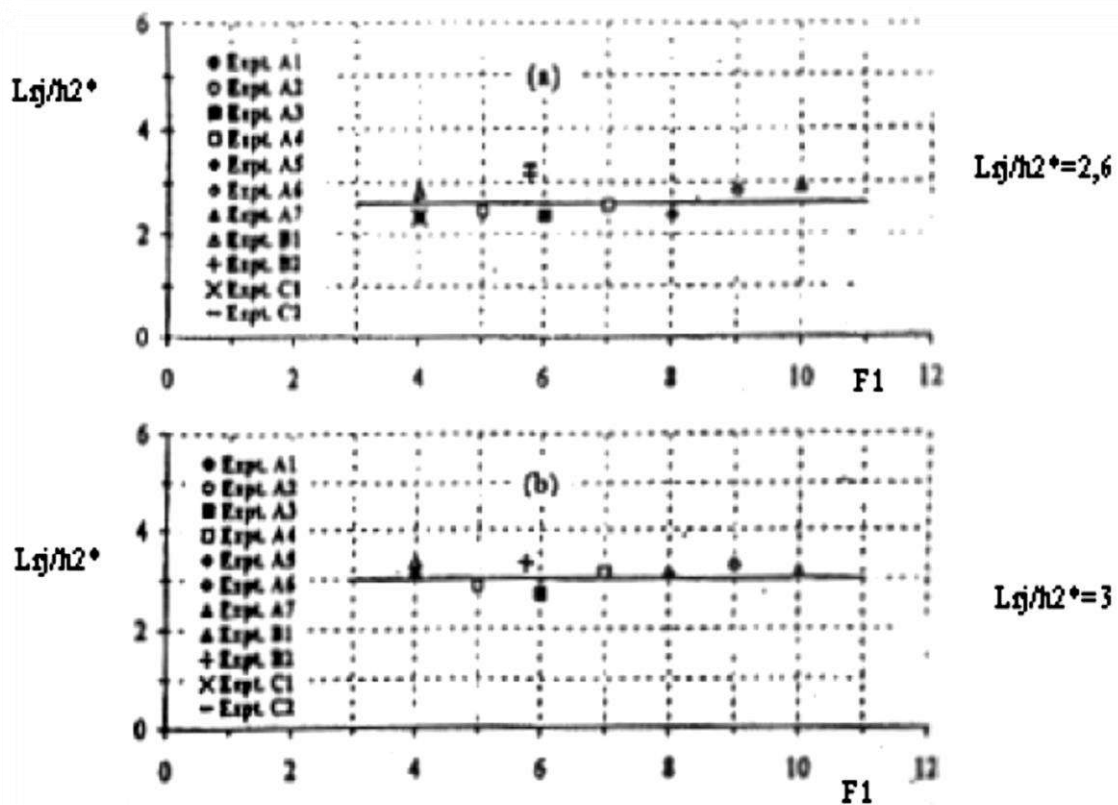


Figure 3.7 : Variation de la longueur relative en fonction du nombre de Froude F_1 .
(a) Du rouleau de surface ; (b) du ressaut

III.4. CONCLUSION :

Les résultats expérimentaux de (N. Rajaratnam, 1968) pour le ressaut générés dans un canal rectangulaire horizontal avec un lit rugueux, dans lequel la rugosité relative de h_1 a été ajustée de 0,02 à 0,43 et le nombre d'occurrences de Frondé a varié de 3 à 10, permettent certaines inférences être atteint. Ce n'est qu'en prenant en compte la hauteur conjuguée aval du ressaut h^*_2 , qui correspond au ressaut sur fond lisse, qu'il a été confirmé que h_2/h^*_2 était fonction de la rugosité relative. h_1 pour un saut créé sur un fond rugueux est fonction du nombre d'incidents Froude F_1 et de la rugosité relative de h_1 Il a également été trouvé que le ressaut rugueux est environ deux fois moins long que le ressaut en bas lisse. Cela indique que pour des rugosités relatives supérieures à 0,10, le saut de fond rugueux aura un avantage significatif.

CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans les trois chapitres de cette première partie de notre étude, nous avons essayé de montrer les travaux les plus importants dans le domaine du ressaut hydraulique.

La première partie du premier chapitre portait sur la classification de (Bradley et Peterka, 1957) du ressaut classique. Ensuite, les travaux de Hager sur le saut hydraulique classique ont été évoqués. L'étude a concerné les caractéristiques du ressaut notamment ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau de fond. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale

En seconde lieu, a eu pour but d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Trois types de ressaut ont été étudiés :

Le ressaut hydraulique traditionnel, dans lequel nous avons centré notre attention sur les recherches menées par (Hager, 1990) par rapport aux qualités du saut traditionnel. Nous avons démontré que l'application de l'équation de quantité de mouvement entre ses sections initiale et finale, tout en ignorant les exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 du débit.

Le second chapitre de cette partie bibliographique, a permis d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique évoluant éventuelles pertes de charge autres que celles causées par le saut, aboutit à la relation de Bélanger. Cette relation dans les canaux inclinés.

Le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente positive, où il a été montré que la première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné est celle de (Bakhmeteff et Matzke, 1936), qui ont évoqué dans leurs études, le profil de surface, la longueur du saut et la répartition des vitesses. De plus, il a été montré que la première étude approfondie du saut hydraulique incliné est celle de (Bakhmeteff et Matzke, 1936), où il a été montré que De plus, (Kindsvater, 1944) a séparé les sauts de pente positivement inclinés en quatre primaires catégories : types A, B, C et D. En plus de cela, il a suggéré une méthode pour calculer le rapport des hauteurs conjuguées pour le ressaut de type C.

Le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente négative est l'endroit où nous avons présenté les travaux de (McCorquodale et Mohamed, 1994), qui ont étudié le cas limite de l'existence du ressaut à pente négative. Suite à leurs recherches, une relation théorique a été proposée pour le type D. Cette relation s'applique au ressaut hydraulique Les auteurs vérifient que ce type de saut est extrêmement sensible aux changements de profondeurs conjuguées pour les nombres de Froude F_1 à F_4 .

D'autre part, déterminer le ressaut limite sur une pente négative (type D) tout en traitant des nombres de Froude $F_1 > 9$ peut être difficile car cela dépend des hauteurs.

Dans le second temps, nous avons examiné la recherche que (M. Debabeche *et al.*, 2009) avait fait. Il a été démontré que l'angle du canal n'a aucun effet sur les relations entre (F_1) et r (F_1).

De plus, l'analyse statistique des observations expérimentales a révélé que les deux relations suivent une loi de type linéaire, de la forme $y = ax + b$. Des expériences ont révélé que l'angle auquel le canal est orienté n'a aucun effet sur la vitesse à laquelle l'énergie est perdue.

Le troisième et dernier chapitre de la partie bibliographique a traité le ressaut hydraulique évoluant dans un canal à fond rugueux. Les expériences menées par (N. Rajaratnam, 1968) et (Rajaratnam, 2002),

Le rapport des hauteurs conjuguées, h_2 / h_1 , est une fonction à la fois du nombre de Froude incident, F_1 , et de la rugosité relative, ϵ / h_1 , pour le saut qui est créé sur un lit rugueux.

Il a été découvert que la longueur d'un saut avec un fond rugueux est environ la moitié de celle de son homologue avec un fond lisse. Ce résultat correspond à une rugosité relative qui est plus de 0,10. Il en va de même dans le cas du ressaut hydraulique à fond ondulé, qui a également démontré de bonnes performances en ce qui concerne l'abaissement de la profondeur en aval du ressaut.

Deuxième partie

**Contribution à l'étude du ressaut
hydraulique dans un canal
rectangulaire incliné à fond rugueux**

Chapitre I :

Étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à fond rugueux

INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE

Des recherches antérieures sur les ressauts hydrauliques avec différents angles d'inclinaison ont attiré l'attention de nombreux auteurs et les ont aidés à faire avancer leurs recherches dans ce domaine.

Les ressauts hydrauliques à parois rugueuses et à fond rugueux devenu une destination de recherche pour de nombreux chercheurs dans ce domaine. Les travaux les plus récents dans ce domaine, sont ceux du ressaut hydraulique.(Ali Ghomri, 2005) et(A Ghomri et al., 2009) ; (Kateb, 2006) ;(Nouacer et al., 2021)

Dans cette partie de notre étude, nous examinerons expérimentalement l'effet de la rugosité du fond sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire.

Dans le premier chapitre, il sera présenté le modèle expérimental utilisé et les appareils de mesure ainsi que le protocole expérimental suivi, avec une étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à fond rugueux.

Le deuxième chapitre de notre étude nous avons fait dans un premier temps une étude expérimentale les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire à pente positive

Dans un deuxième temps une étude un développement théorique qui donne une relation de la forme :

$F_1 = f(Y, \lambda, \alpha)$ pour le ressaut hydraulique.

A travers le troisième chapitre nous allons analyser expérimentalement et théorique ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à fond rugueux, cette étude permettant de trouver une relation semi-théorique de la forme $f(Y, F_1, \alpha, Cr)$, tels que Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, F_1 est le nombre de Froude incident et Cr est le coefficient de résistance et α la pente du canal.

I.1. INTRODUCTION :

Les ouvrages de rétention, tels que les barrages hydrauliques, sont souvent soumis à de graves inondations. Pendant périodes de crues, le réservoir étant plein, l'eau est renvoyée par un déversoir vers la rivière.

Le lit de la rivière est alors confronté à un écoulement torrentiel à haute énergie cinétique. Cela génère des forces de traction néfastes par leur caractère érosif. Afin d'éviter des modifications importantes du lit de la rivière situé en aval du barrage, il serait nécessaire de dissiper cette énergie. Le moyen le moins cher et le plus pratique est certainement le saut hydraulique.

Le principe consiste à transformer le flux torrentiel en un flux fluvial générant une réduction des forces de traction. Le saut hydraulique étant le plus pratique et le moins des moyens coûteux de dissiper la charge hydraulique, notamment en aval d'un barrage, dont il dispose. Déjà été largement étudiée.

On peut citer (Rajaratnam, 2002) et (W.H. Hager et, 1987), qui a étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal, (Debabeche, 2003) dont les travaux portent sur la projection triangulaire horizontale.

De plus, (Sinniger et Hager, 1988), a étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. La première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné fut celle de (McCorquodale et Mohamed, 1994), qui mentionnait dans leur étude la surface profil, la longueur du saut et la répartition des vitesses. Les sauts à pente positive ont été classés en quatre types principaux : type A, type B, type C et type D.

Des études récentes concernant le saut dans les canaux inclinés ont été menées par (W.H. Hager et, 1987), mais toujours dans un canal rectangulaire (Achour et Debabeche, 2003) étudié théoriquement le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique avec un angle d'ouverture de 90° incliné avec une pente positive. En 2010, les travaux les plus importants relatifs aux ressauts hydrauliques évoluent dans un canal rectangulaire à fond rugueux. Les études les plus connues dans ce domaine sont certainement celles de (W. Hager et Sinniger, 1985), correspondant respectivement au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond ondulé. A la lumière de ce travail de recherche sur le ressaut hydraulique, évoluant dans un canal rectangulaire, nous présentons expérimentalement l'étude

de l'effet de la rugosité sur la longueur du ressaut hydraulique. Par conséquent, l'effet de dissipation d'énergie, pour les deux configurations de saut, est presque identique.

I.2. POSITION DU PROBLÈME

La modification des conditions en amont (hauteur, débit, etc.) et en aval (type d'obstacle, sa position, hauteur, etc.), peut conduire à des configurations de saut différentes. L'avancée est dite classique lorsqu'elle se forme dans un canal rectangulaire de pente faible ou nulle, sans obstacle à l'aval. Elle est dite maîtrisée lorsque sa formation est conditionnée par la mise en place d'un obstacle en aval de l'écoulement

Dans notre cas, il s'agit d'une projection contrôlée par un seuil mince dans un canal rectangulaire à rectangulaire, avec un fond rugueux. Différentes rugosités ont été testées. En effet, pour une hauteur initiale h_1 fixe, l'augmentation du débit se traduit à la fois par le déplacement de la saillie vers l'aval et par l'augmentation de sa longueur de roulement L_r . La distance (x) sur laquelle s'étend la projection augmente

Aussi, et pour le ramener à sa position initiale, c'est-à-dire à environ 5 cm de la sortie du convergent, il faut relever le premier seuil de hauteur s . Ainsi, à chaque valeur du débit Q correspond une longueur L_j de l'avancée, ainsi qu'une hauteur h_2 en aval de l'avancée et une hauteur (s) du seuil (Figure.1).

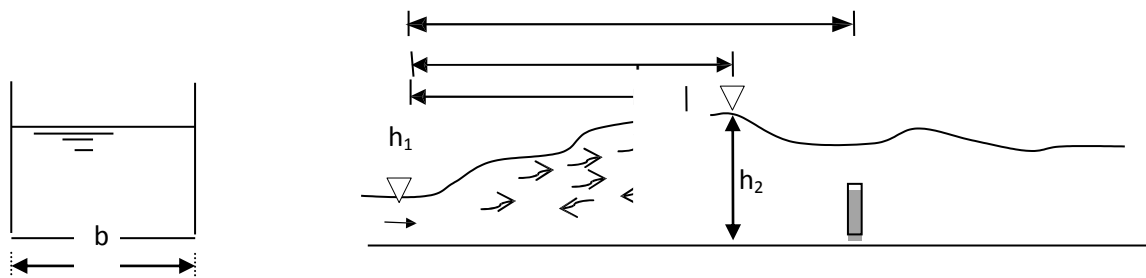


Figure 1.1 : Ressaut contrôlé par seuil mince. h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur seuil, L_j longueur du ressaut hydraulique.

I.3. DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPERIMENTALE

I.3.1. Description du canal

Le modèle physique qui nous a servi de banc d'essai (Fig1.2) est constitué essentiellement d'un canal rectangulaire de 10 mètres de longueur, 25 centimètres de largeur et 50 centimètres de profondeur alimenté au moyen d'un tuyau circulaire 150 mm de diamètre. Ce dernier est relié au canal au moyen d'une boîte métallique fermée, sur laquelle est insérée une tôle convergente de section rectangulaire débouchant directement dans le canal, mais l'existence d'une plaque courbe et fixée au fond de l'extrémité amont du canal nous a obligé à placer une vanne murale (vanne du bas) juste après cet obstacle.

Le convergent et la partie du canal en amont de la vanne murale constituent le caisson chargé qui assure la grande vitesse du flux incident. L'emplacement de cette vanne servira à régler la hauteur du débit incident h_1 du saut mais elle provoqua le débordement d'eau dans le caisson sous charge lors du passage en gros débit.



Photo 1.1. Photographie du canal de mesure de section

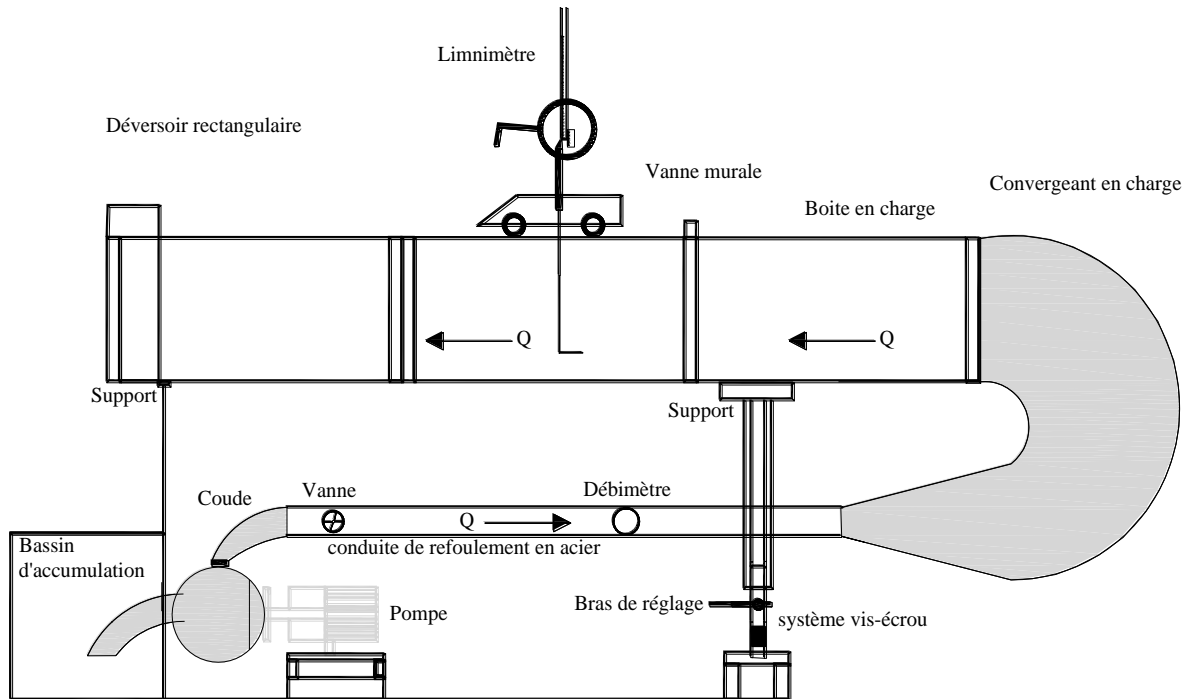


Figure 1.2 : Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire, ayant servi à l'expérimentation

L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe axiale (photo 1.2) débitant jusqu'à 44l/s, puisant l'eau d'un bassin d'accumulation (photo 1.4), on augmente le débit à l'aide d'une vanne (photo 1.3). À l'extrémité aval du canal, on a placé un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale, permettant la mesure directe de débit. Le côté amont du canal est posé sur un système de vis écrou (filetage) pour nous permettre de varier la pente du canal.



Photo 1.2 : la boîte en charge



Photo 1.3 : vanne de réglage et pompe





Photo 1.5 : du bassin d'accumulation
(Vue de dessus)

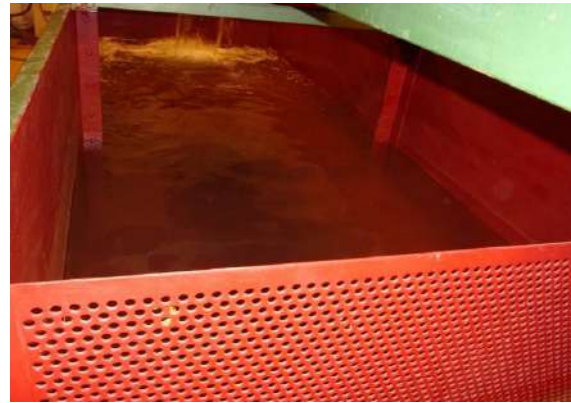


Photo 1.4 : de la Vanne murale

I.3.2. Mesure de l'angle d'inclinaison :

Comme on l'a dit précédemment, la partie amont du canal est posé sur un système vis-écrou qui donne possibilité pour le baisser ou l'élever à l'aide d'un bras métallique qui fait tourner le vis et par conséquent la pente du canal varie, l'appareil du niveau topographique (photo 1.7) nous a permis de mesurer l'angle d'inclinaison du canal.

Photo1.6 : système vis-écrou utilisé Pour la variation de la pente du canal

Photo 1.7 : 'appareil du niveau topographique

I.3.3. Appareillages de mesure :

I.3.3.1. Mesure de débit :

Les débits volumiques Q sont mesurés par en déversoir à échancrure rectangulaire (photo1.8), dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale réalisé et testé par (Hachemi Rachedi, 2006), permettant la mesure directe du débit.

Où il est, lors du passage d'un écoulement à débit Q à travers les deux parois du débitmètre, la hauteur h de la lame d'eau traversant le déversoir rectangulaire est obtenue par la lecture sur un limnimétrie placé au-dessus de l'ouverture du déversoir. Ainsi, le débit volume est obtenu en insérant la hauteur h dans l'équation (1.1) du déversoir.

$$Q = 3794\sqrt{2}g \beta(1 + 0.16496\beta^{2.0712})^{(3/2)}/h^{(3/2)} \quad (1.1)$$

Avec : $\beta = b/B$

Q : Le débit en

B : L

a largeur du canal en (m) ; et $B=0.25$

g : L'accélération de la pesanteur (m^3/s)

β : Rapport de forme ; ($\beta = 0.44$) ;

b : Largeur de l'échancrure en (m) ; ($b = 0.11$ m)

h : La hauteur de la lame d'eau en (m)

La condition d'application de cette relation est : $\beta < 0.45$

D'où l'expression du débit volume : $Q = 0.3745h^{3/2}$



Photo 1.8 : Photographie du déversoir rectangulaire mesurant les débits

I.3.3.2. Linnimétrie :

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à la hauteur due à la section de la sorte du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans (Lr) canal de mesure ont été évaluées par un linnimétrie.

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

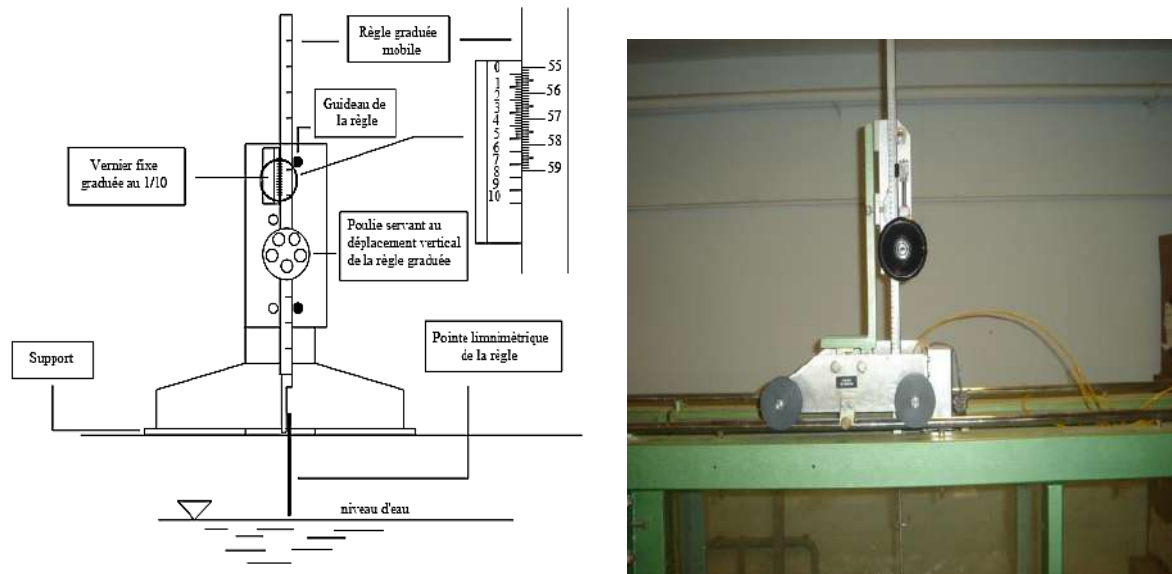


Figure 1.3 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnométrique

I.3.4. Expérimentation :

L'étude Expérimentale s'est focalisée sur le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil dans un canal rectangulaire, à fond rugueux. Quatre valeurs de rugosité absolue ont été testées: (mm) = 6 ; 8 ; 10; 12. L'expérience a été réalisée sous quatre hauteurs d'écoulement initiales : h_1 (mm) = 20 ; 30 ; 40 ; 50. Une large fourchette du nombre d'incidents de Froude a ainsi été obtenue, correspondant à $2 < F_1 < 16$. La formation de la saillie contrôlée est conditionnée par l'établissement d'un seuil en aval de l'écoulement. à cet effet, des seuils de différentes hauteurs ont été utilisés. Pour une hauteur seuil s placée à l'extrémité aval du canal et pour une hauteur h_1 du flux incident, l'augmentation du débit volumique Q provoque l'apparition d'un ressaut. Le couple (Q, h_1) permet également le calcul du nombre de Froude F_1 du flux incident. L'augmentation de F_1 entraîne à la fois le déplacement de la saillie vers l'aval et l'augmentation de sa longueur L_j . Ainsi, à chaque valeur du nombre de Froude F_1 correspond une valeur de la longueur de saut L_j ainsi qu'une valeur de la hauteur s du seuil.

Un Echantillon constitué d'une soixantaine de points de mesure expérimentaux, pour chacune des valeurs de rugosité absolue testées, a ainsi conduit à des résultats significatifs. Les caractéristiques hydrauliques et géométriques d'intérêt dans cette Etude Expérimentale sont : le débit volumique Q , la hauteur h_1 du flux incident, la hauteur finale h_2 de la projection, la longueur L_j de cette dernière et la rugosité absolue ϵ des parois du canal. De plus, une attention est portée à l'évolution des paramètres adimensionnels suivants :

- I. Le nombre de Froude F_1 comme
- II. La longueur relative L_j / h_1 du saut
- III. Le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs combinées de la projection.

I.3.5. Protocole Expérimental :

Les principales caractéristiques étudiées dans un ressaut hydraulique causé par la rugosité sont : le débit volumique Q , la profondeur initiale h_1 , la profondeur finale h_2 , la hauteur s de la marche, la longueur L_j du ressaut. Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le nombre de Froude du flux incident, le rapport $Y = h_2 / h_1$ des profondeurs combinées de la projection, la longueur relative $\lambda_j = L_j / h_1$ de la projection. A noter que le canal rectangulaire est peu adapté aux bassins de dissipation, mais présente quelques avantages pratiques dans les lignes d'irrigation.

En effet, la capacité du ressaut hydraulique à surélever le plan d'eau aval est utilisé pour l'amorçage des siphons. La littérature montre que le canal à fond rugueux assure la stabilité de la projection, son efficacité et sa compacité. Des seuils de différentes hauteurs 's'ont été testés (photo 1.9), afin d'observer leur influence sur le contrôle du ressaut ; dix-neuf seuils ont ainsi été confectionnés, dont la hauteur s varie entre (02cm et 19cm).

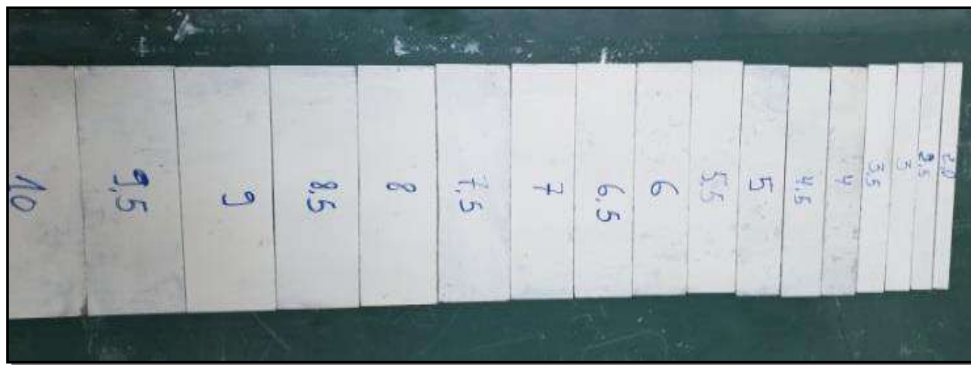


Photo 19 : Série de seuils minces ayant servi au contrôle du ressaut



Photo I.10 : photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé

Pour obtenir les résultats expérimentaux, nous avons suivis les étapes suivantes :

1. Mesure de l'angle d'inclinaison α par rapport à l'horizontal ;

Calculer du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par application de la .2

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

3. Mesure de la longueur L_r du rouleau ;
4. Mesure de la longue L_j du ressaut ;
5. Mesure de la hauteur géométrique s du seuil ;
6. Mesure de la hauteur conjuguée aval h_2 du ressaut ;
7. Mesure du débit volume ;

I.3.6.Mode de préparation de la rugosité utilisée :

Préparez des granulés de perles (Boule puériculture) dans quatre tailles différentes avec des diamètres comme suit (ϵ mm) = (6 ; 8 ; 10; et 12).



Photo.11 : photographie Echantillon de grains de perles de rugosité

Préparez un tapis pliable en plastique souple et divisez-le en bandes de 4 m de longueur et 25 cm de largeur, ce qui équivaut à la largeur du canal utilisé dans le processus de mesure (photo1.12)



Photo I. 12 : photographie tapis pliable en plastique souple

Fixation régulière des granulés avec de la colle Soma FIX S 663 afin que les centres de gravité des granulés soient des lignes parallèles réparties sur toute la surface.

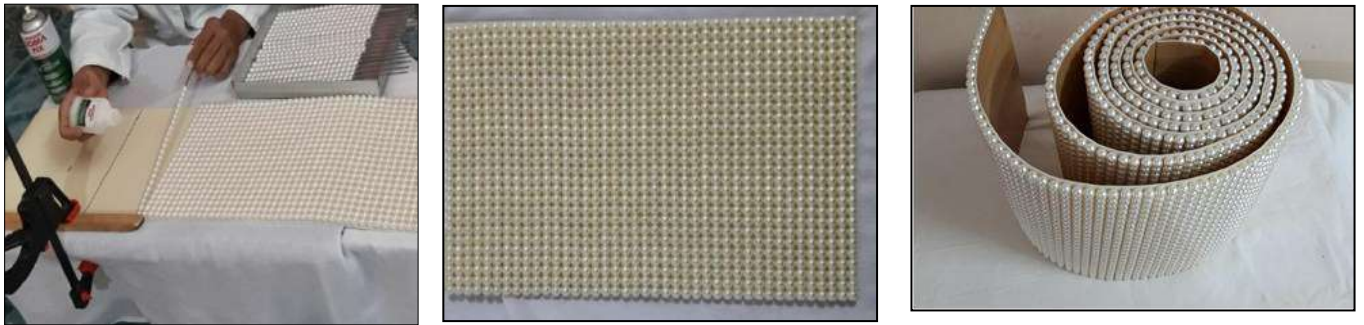


Photo 1.13 : Echantillons de grains de perles de rugosités (ϵ mm) = 10



a)



b)

Photo I.14 : ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond rugueux.

Vue à l'amont du ressaut. (b) Vue à l'aval du ressaut.

I.4. RÉSULTATS ET DISCUSSION :

Cette présente étape de notre étude expérimentale consiste à faire une étude comparative entre les caractéristiques de l'avancée Contrôlée par seuil à fond lisse et l'avancée à fond rugueux.

I.4.1. Longueur relative L_j/h_1 de la projection en fonction du nombre de Froude F_1

La figure I.4 montre la représentation graphique de la variation de la longueur relative L_j/h_1 de la projection en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour quatre rugosités absolues : (ε mm) = (6, 8, 10 et 12). Quatre nuages de points distincts sont perceptibles, chacun correspondant à une rugosité absolue. On constate que pour une rugosité absolue fixe, l'augmentation du nombre de Froude n'engendre que la longueur relative du ressaut. De plus, pour une valeur fixe du nombre de Froude incident, l'augmentation de la rugosité absolue fait diminuer la longueur relative du ressaut.

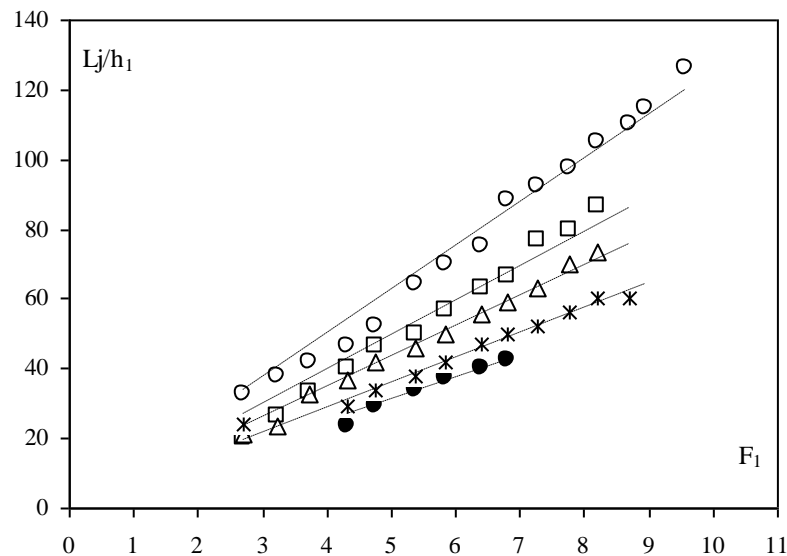


Figure 1.4. Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour cinq valeurs différentes de rugosité absolue : ε (mm) = (o) 0,00 (lisse), (\square) 6, (Δ) 8, (*) 10 mm et (\bullet) 12

Tableau 1.1 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 avec la rugosité (ε mm) = 0 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12), $\text{Tang}(\alpha) = 0$

| Tang(α) = 0 | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------|-------------------------|-----------|-------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| (ε mm) = 0 | | (ε mm) = 6 | | (ε mm) = 8 | | (ε mm) = 10 | | (ε mm) = 12 | |
| F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 |
| 2,72 | 32,5 | 2,72 | 20,00 | 2,72 | 21,33 | 2,72 | 24,00 | 4,3253 | 23,75 |
| 3,23 | 38,00 | 3,23 | 26,67 | 3,23 | 23,33 | 4,33 | 29,20 | 4,7429 | 29,25 |
| 3,72 | 42,00 | 3,72 | 33,33 | 3,72 | 32,67 | 4,74 | 34,00 | 5,3886 | 33,75 |
| 4,33 | 46,50 | 4,33 | 40,00 | 4,33 | 36,67 | 5,39 | 38,00 | 5,8316 | 37,50 |
| 4,74 | 52,50 | 4,74 | 46,67 | 4,74 | 42,00 | 5,83 | 42,00 | 6,3992 | 40,00 |
| 5,39 | 64,50 | 5,39 | 50,00 | 5,39 | 45,67 | 6,40 | 47,00 | 6,8053 | 42,50 |
| 5,83 | 70,00 | 5,83 | 56,67 | 5,83 | 50,00 | 6,81 | 50,00 | | |
| 6,40 | 75,00 | 6,40 | 63,33 | 6,40 | 55,67 | 7,28 | 52,00 | | |
| 6,81 | 88,50 | 6,81 | 66,67 | 6,81 | 59,00 | 7,76 | 56,00 | | |
| 7,28 | 92,50 | 7,28 | 76,67 | 7,28 | 63,33 | 8,19 | 60,00 | | |
| 7,76 | 97,50 | 7,76 | 80,00 | 7,76 | 70,00 | 8,69 | 60,00 | | |
| 8,19 | 105,00 | 8,19 | 86,67 | 8,19 | 73,33 | | | | |
| 8,69 | 110,00 | 8,69 | 96,3 | 8,69 | 79,40 | | | | |
| 8,94 | 115,00 | | | | | | | | |
| 9,58 | 126,00 | | | | | | | | |

De plus, l'analyse statistique des points de mesure expérimentaux par la méthode des moindres carrés non linéaires, montre que pour chaque rugosité absolue, un ajustement linéaire de la forme $L_j / h_1 = F_1$ est possible. La figure (1.5) e montre bien. Le tableau 1 regroupe les valeurs du coefficient (a).

Tableau 1.2 : coefficients des courbes d'ajustement

| ε (mm) | Coefficient a | R^2 |
|--------------------|---------------|-------|
| 0 | 12,5 | 0,98 |
| 6 | 9,93 | 0,96 |
| 8 | 8,7 | 0,98 |
| 10 | 7,19 | 0,99 |
| 12 | 6,19 | 0,99 |

Le tableau (1.2) montre que le coefficient « a » diminue progressivement avec l'augmentation de la rugosité absolue. Ajustement statistique des couples de valeurs (ε, a) par la moindre méthode Carrés donne la relation de type linéaire suivante :

$$a = -0,532 + 12,7 \quad (1.2)$$

Ceci est représenté sur la Figure (1.5)

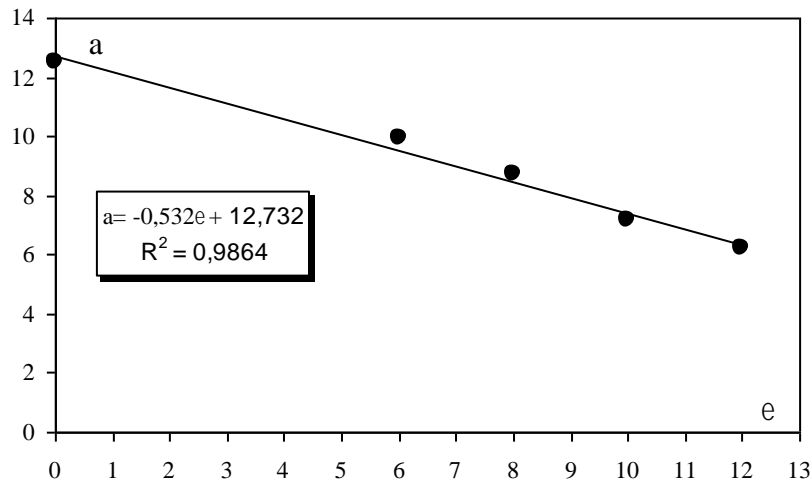


Figure 1.5 : Variation du coefficient 'a' en fonction de la rugosité absolue "

En remplaçant le coefficient 'a' par son expression dans la relation $L_j/h_1 = a F_1$, l'équation liant la longueur relative L_j/h_1 du saut au nombre de Froude incident F_1 et à la rugosité absolue est

$$\frac{L_j}{h_1} = (12.73 - 0.53\varepsilon)F_1 \quad (1.3)$$

Pour $0 < \varepsilon \leq 12 \text{ mm}$

La figure (1.6) montre que la relation $L_j / h_1 = (\varepsilon, F_1)$ ajuste les points de mesure expérimentaux avec une bonne corrélation et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice, montrant ainsi la fiabilité de la relation.

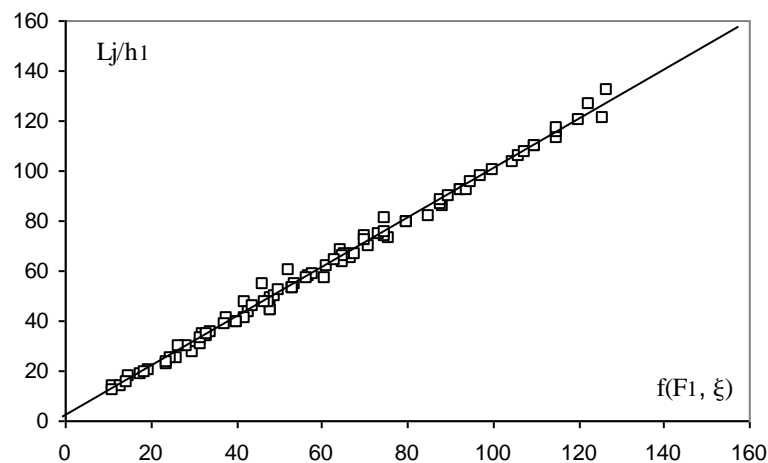


Figure 1.6 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de (ε, F_1) . (□) Points expérimentaux de la projection contrôlée avec parois brutes. (—) Première bissectrice de l'équation

$$L_j / h_1 = (12,73 - 0,532 \varepsilon)$$

I.4.2. Rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1

La figure (1.7) représente la variation du rapport Y des hauteurs combinées en fonction du nombre de Froude F_1 incidentes, pour les quatre rugosités absolues : $(\varepsilon \text{ mm}) = (6, 8, 10, 12)$. Notons tout d'abord que pour Aux trois rugosités, l'augmentation du nombre de Froude incident conduit à celle du rapport Y des hauteurs combinées. Aussi, on voit bien l'influence de la rugosité des parois du canal sur la relation Y (F_1).

En effet, pour un même nombre de Froude F_1 , l'augmentation de la rugosité absolue engendre la diminution du rapport Y des hauteurs combinées. La figure I.6 montre des nuages à quatre points, chacun correspondant à une valeur bien connue de rugosité absolue. Les traits pleins représentent l'ajustement des points de mesure par la méthode des moindres carrés linéaires.

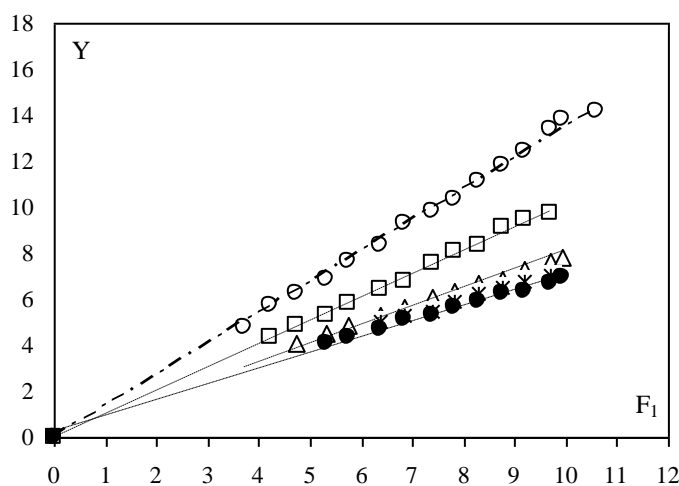


Figure I.7 : Variation du rapport Y des hauteurs combinées en fonction de F_1 , pour cinq valeurs différentes de rugosité absolue : ε (mm) = (o) 0,00 (lisse), (□) 6mm, (Δ) 8mm, (⊗) 10mm et (●) 12mm.

Tableau 1.3 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1 avec la rugosité $(\varepsilon \text{ mm}) = 0 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12$, Tang $(\alpha) = 0$

| Tang(α) = 0 | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|---------------------------------|------|---------------------------------|------|
| $(\varepsilon \text{ mm}) = 0$ | | $(\varepsilon \text{ mm}) = 6$ | | $(\varepsilon \text{ mm}) = 8$ | | $(\varepsilon \text{ mm}) = 10$ | | $(\varepsilon \text{ mm}) = 12$ | |
| F_1 | Y | F_1 | Y | F_1 | Y | F_1 | Y | F_1 | Y |
| 3,72 | 4,8 | 4,23 | 4,33 | 4,72 | 4,13 | 6,39 | 4,86 | 5,33 | 4,06 |
| 4,23 | 5,7 | 4,72 | 4,83 | 5,33 | 4,53 | 6,83 | 5,06 | 5,74 | 4,38 |
| 4,72 | 6,3 | 5,33 | 5,27 | 5,74 | 4,88 | 7,40 | 5,32 | 6,39 | 4,72 |
| 5,33 | 6,85 | 5,74 | 5,80 | 6,39 | 5,30 | 7,81 | 5,52 | 6,83 | 5,14 |
| 5,74 | 7,65 | 6,39 | 6,47 | 6,83 | 5,68 | 8,28 | 5,88 | 7,40 | 5,3 |
| 6,39 | 8,35 | 6,83 | 6,80 | 7,40 | 6,08 | 8,76 | 6,28 | 7,81 | 5,66 |
| 6,83 | 9,3 | 7,40 | 7,57 | 7,81 | 6,35 | 9,19 | 6,54 | 8,28 | 5,92 |
| 7,40 | 9,8 | 7,81 | 8,07 | 8,28 | 6,68 | 9,69 | 6,76 | 8,76 | 6,26 |
| 7,81 | 10,35 | 8,28 | 8,33 | 8,76 | 6,90 | 9,94 | 7,06 | 9,19 | 6,32 |
| 8,28 | 11,10 | 8,76 | 9,13 | 9,19 | 7,33 | | | 9,69 | 6,7 |
| 8,76 | 11,85 | 9,19 | 9,47 | 9,69 | 7,65 | | | 9,94 | 6,96 |
| 9,19 | 12,40 | 9,69 | 9,73 | 9,94 | 7,85 | | | | |
| 9,69 | 13,40 | | | | | | | | |
| 9,94 | 13,80 | | | | | | | | |
| 10,58 | 14,15 | | | | | | | | |

L'analyse des points de mesures expérimentales, montre clairement que pour chaque valeur de ε , un ajustement linéaire est possible, de la forme $Y = bF_1$

Le tableau 1.4 regroupe les valeurs des coefficients de b

Tableau 1.4 : Coefficients b des courbes d'ajustement

| ε (mm) | Coefficient a | R^2 |
|--------------------|-----------------|-------|
| 0 | 1,34 | 95 |
| 6 | 1,01 | 98 |
| 8 | 0,8 | 97 |
| 10 | 0,75 | 98 |
| 12 | 0,71 | 96 |

Le tableau 1.4 montre que le coefficient « b » diminue avec l'augmentation de la rugosité absolue. L'ajustement statistique des couples des valeurs (ε , b) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire d'équation :

$$b = 1,132 - 0,0556 \varepsilon. \quad (1.4)$$

Ceci est montré dans la Figure 1.7

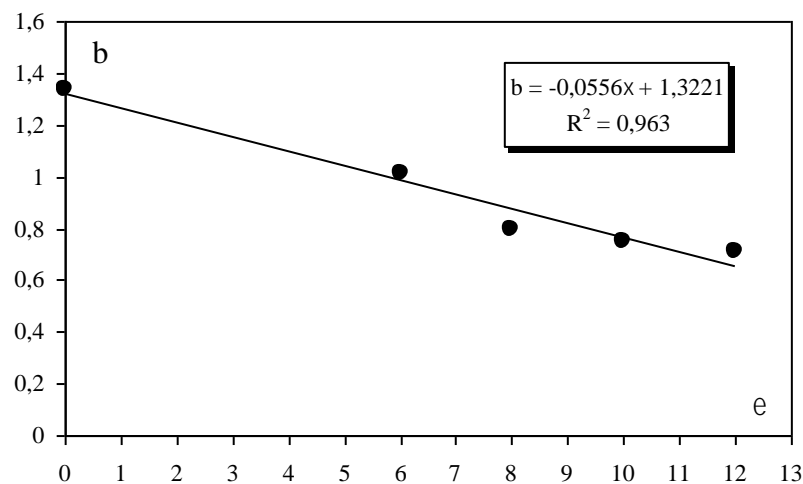


Figure 1.8 : Variation du coefficient b en fonction de la rugosité absolue ε pour cinq valeurs différentes de la rugosité absolue : ε (mm) = (o) 0,00 (lisse), (□) 6, (Δ) 8, (*) 10 et (●) 12

L'équation liant le rapport des hauteurs combiné au nombre d'incidents

La rugosité Froude et absolue devient :

$$Y = (1,132 - 0,0556 \varepsilon) F_1 \quad (1.5)$$

Pour $0 < \varepsilon \leq 2$ mm

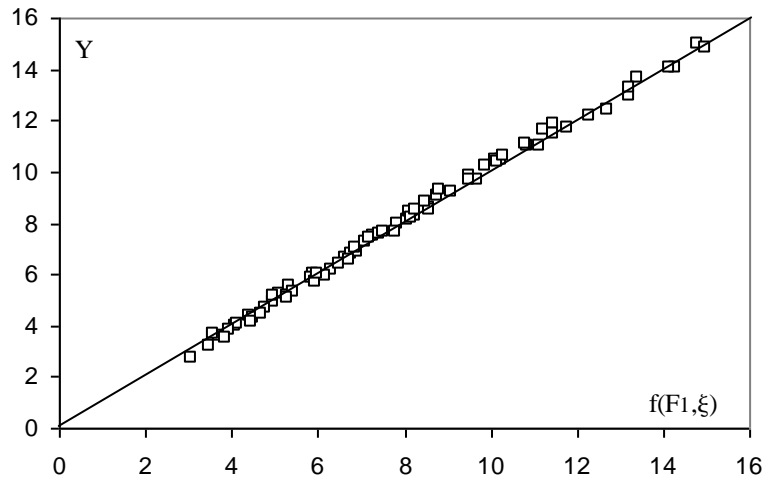


Figure 1.9 : Variation de le Rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre (ϵ, F_1) . (□) Points expérimentaux de la projection contrôlée avec parois brutes. (—) Première bissectrice de l'équation $Y = (1,332 - (0,0556 \epsilon) F_1)$

I.4.3. Efficacité des ressauts hydrauliques :

La dissipation d'énergie hydraulique est définie comme le rapport entre la perte de charge ΔH et la charge amont H_1 , le rendement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, s'écrit comme suit :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (1.6)$$

La figure I.8 montre que les points de mesure de la projection de fond rugueux sont au-dessus de leurs homologues de fond lisse pour une plage de nombres de Froude incidents $2 < F_1 < 14$. Cependant, pour les nombres de Froude $F_1 > 14$, tous les points de mesure ont tendance à se rejoindre pour former un seul nuage de points

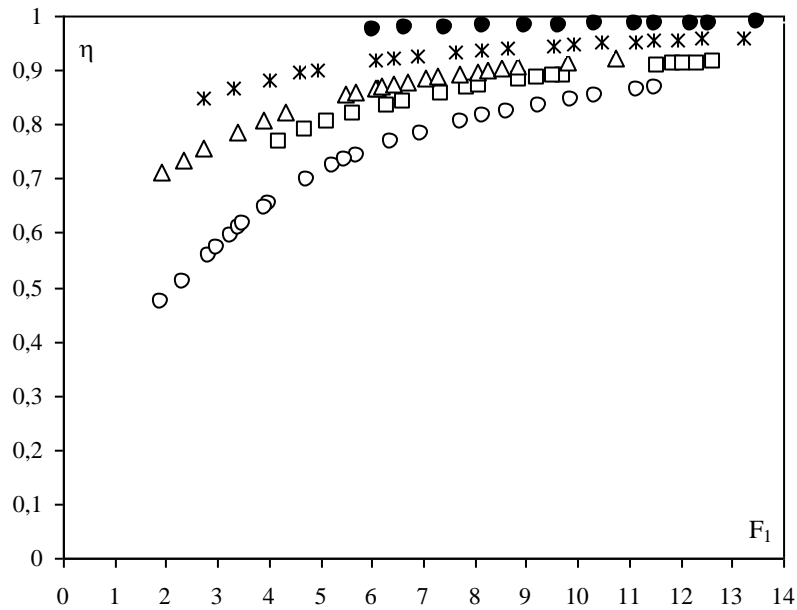


Figure 1.10 : Variation du rendement en fonction du nombre de Froude F_1 , pour cinq valeurs différentes de rugosité absolue : ϵ (mm) = (o) 0,00 (lisse), (□) 6, (Δ) 8, (*) 10 et (●) 12

Tableau 1.5 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage de la figure (1.10).

Avec (ϵ mm) = 0 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12), $\text{Tang}(\alpha) = 0$

| Tang(α) = 0 | | | | | | | | | |
|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| (ϵ mm) = 0 | | (ϵ mm) = 6 | | (ϵ mm) = 8 | | (ϵ mm) = 10 | | (ϵ mm) = 12 | |
| F_1 exp | η | F_1 exp | η | F_1 exp | η | F_1 exp | η | F_1 exp | η |
| 13,5 | 0,98 | 13,21 | 0,96 | 10,73 | 0,92 | 12,63 | 0,91 | 11,50 | 0,86 |
| 12,57 | 0,98 | 12,39 | 0,95 | 9,78 | 0,91 | 12,34 | 0,91 | 11,16 | 0,86 |
| 12,22 | 0,98 | 11,92 | 0,95 | 8,84 | 0,90 | 12,05 | 0,91 | 10,33 | 0,85 |
| 11,51 | 0,98 | 11,49 | 0,95 | 8,52 | 0,90 | 11,85 | 0,90 | 9,87 | 0,84 |
| 11,11 | 0,98 | 11,13 | 0,95 | 8,26 | 0,90 | 11,56 | 0,90 | 9,25 | 0,83 |
| 10,35 | 0,98 | 10,47 | 0,95 | 8,05 | 0,89 | 9,71 | 0,89 | 8,62 | 0,82 |
| 9,64 | 0,97 | 9,92 | 0,94 | 7,71 | 0,89 | 9,52 | 0,88 | 8,16 | 0,81 |
| 8,97 | 0,97 | 9,52 | 0,94 | 7,26 | 0,88 | 9,23 | 0,88 | 7,25 | 0,80 |
| 8,17 | 0,97 | 8,62 | 0,94 | 7,02 | 0,88 | 8,87 | 0,88 | 6,95 | 0,78 |
| 7,42 | 0,97 | 8,11 | 0,94 | 6,68 | 0,87 | 8,09 | 0,86 | 6,37 | 0,76 |
| 6,66 | 0,97 | 7,60 | 0,93 | 6,40 | 0,87 | 7,83 | 0,86 | 5,70 | 0,74 |
| 6,04 | 0,97 | 6,90 | 0,93 | 6,16 | 0,86 | 7,35 | 0,85 | 5,50 | 0,73 |
| | | 6,43 | 0,92 | 5,68 | 0,85 | 6,60 | 0,84 | 5,25 | 0,72 |
| | | 6,05 | 0,92 | 5,47 | 0,85 | 6,28 | 0,83 | 4,75 | 0,69 |
| | | 4,94 | 0,91 | 4,31 | 0,82 | 5,63 | 0,81 | 3,91 | 0,64 |
| | | 4,58 | 0,90 | 3,89 | 0,80 | 5,11 | 0,80 | 3,50 | 0,61 |
| | | 4,00 | 0,89 | 3,36 | 0,78 | 4,69 | 0,78 | 3,25 | 0,59 |
| | | 3,92 | 0,88 | 2,73 | 0,75 | 4,21 | 0,76 | 3,05 | 0,57 |
| | | 2,70 | 0,86 | 2,31 | 0,73 | | | 2,83 | 0,55 |
| | | | | 1,89 | 0,71 | | | 2,33 | 0,50 |
| | | | | | | | | 1,91 | 0,47 |

La Figure (1.10) montre que pour une plage pratique de Froude incident, les points de mesure de la projection à parois rugueuses sont inférieurs à ceux à fond lisse. En effet, le ressaut hydraulique dans le canal à parois rugueuses dissipe mieux la charge que son homologue à parois lisses. De plus, la Figure.1.10 montre que la dissipation de la charge hydraulique augmente avec l'augmentation de la rugosité. Cependant, pour des nombres de Froude élevés, les points de mesure se rejoignent et l'effet de la rugosité diminue. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'au-delà d'un certain nombre de Froude pratique, la saillie devient saccadée et ne peut adhérer en permanence au fond du Canal.

I.5. EXEMPLE D'APPLICATION

Soit de déterminer les caractéristiques d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil au fond du canal lisse, et du fond du canal rugueux dans un canal rectangulaire, connaissant le débit volumique $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$, la profondeur conjuguée en amont du ressaut $h_1 = 0,8 \text{ m}$, largeur du canal $b = 0,5 \text{ m}$.

I.5.1. Calcul du nombre de Froude F_1

Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident dans la section initiale 1-1 - c'est-à-dire au pied de l'avancée ce nombre s'exprime en règle générale par la relation Exemple d'application Soit pour déterminer les caractéristiques d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil en fond de chenal lisse, et fond de chenal brut dans un chenal rectangulaire, connaissant le débit volumique $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$, la profondeur cumulée en amont du ressaut $h_1 = 0,8 \text{ m}$, largeur du chenal $b = 0,5 \text{ m}$

Le nombre de Froude F_1 du flux incident dans la section initiale 1-1- c'est-à-dire au pied de la projection ce nombre s'exprime en règle générale par la relation

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial A_1}$$

L'étude montre que cette dérivée représente la largeur de la masse d'eau quelle que soit la forme géométrique du profil de liquide en écoulement.

$$F_1 = \left[\frac{Q^2}{g} \left(\frac{b}{(bh_1)^3} \right) \right]^{1/2}$$

Remplacez chaque paramètre par sa valeur dans l'équation $F_1 = 4,4$

I.5.2. Ressaut à fond rugueux $\varepsilon = 0$ **I.5.3.1. Longueur relative du ressaut hydraulique L_j / h_1**

Les résultats expérimentaux conduisent à une autre relation, reliant la longueur relative du ressaut hydraulique et le nombre de Froude F_1 s'écrit comme suit :

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_1} = 12,5F_1 = 107,534$$

D'où la longueur du saut $L_j = 86,02$ m.

I.5.2.2. Rapport des hauteurs combinées

L'analyse des résultats expérimentaux de l'évaluation du saut de seuil contrôlé lisse dans un canal rectangulaire, nous a donné une relation entre le rapport des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 écrit comme suit :

$$Y = (1,132 - 0,0556 \varepsilon)F_1 = 5,05$$

I.5.3 Ressaut à fond rugueux $\varepsilon = 12\text{mm}$ **I.5.3.1. Longueur relative du ressaut hydraulique L_j / h_1**

La représentation graphique des points expérimentaux de la longueur relative du pas L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 a conduit à une seule courbe :

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_1} = (12,5 - 0,5\varepsilon)F_1 = 37,03$$

Où la longueur du saut $L_j=29,62$ m.

I.5.3.2. Rapport des hauteurs combinées

L'analyse des résultats expérimentaux de l'évaluation du saut de seuil contrôlé lisse dans un canal rectangulaire, nous a donné une relation entre le rapport des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 écrit comme suit :

$$Y = (1,132 - 0,0556 \varepsilon)F_1 = 2,07$$

Il ressort de cet exemple d'application que pour le même nombre de Froude F_1 , la longueur de la projection réduite dans la projection à fond rugueux que leurs homologues la projection à fond lisse.

I.6. CONCLUSION

L'étude a permis l'analyse expérimentale de deux types de ressaut à savoir : le ressaut contrôlé à fond lisse et le ressaut à fond rugueux. En effet, il a été trouvé, pour les deux configurations de projection les longueurs relatives du bassin et du positionnement à la rugosité du fond sont peu dépendantes de ε . Elles se réduisent à des fonctions linéaires $\lambda_j = f(F_1)$ pour les deux types de ressaut. Les longueurs sont maximales pour la projection inférieure lisse contrôlée, minimales pour la projection inférieure rugueuse L'efficacité de la dissipation est définie par la fonction $\eta = f(F_1)$, correspondant à une augmentation de η avec F_1 . Le fond rugueux est le plus efficace et le fond lisse ressaut le moins. La projection inférieure grossière -à-aurait donc tous les avantages.

Chapitre II

Étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à pente incline

I.1.INTRODUCTION :

Ce chapitre est concerné à analyser les résultats expérimentaux obtenus, ça vient à dire de déterminer expérimentalement l'effet de la pente du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique, que l'on ne peut trouver théoriquement, à savoir les hauteurs conjuguées h_1 et h_2 du ressaut hydraulique, la longueur L_j du ressaut, la longueur L_r du rouleau ainsi que la hauteur du seuil. Ces grandeurs sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$, la longueur relative du ressaut $\lambda = L_j/h_1$, la longueur relative du rouleau $\lambda_r = L_r/h_1$ et la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil. Cette analyse nous permettra à trouver des relations fonctionnelles du rapport Y , de la longueur relative λ , de la longueur relative λ_r et la hauteur relative S respectivement de la forme $Y = f(F_1, \alpha)$, $\lambda = f(F_1, \alpha)$, $\lambda_r = f(F_1, \alpha)$ et $S = f(F_1, \alpha)$. L'utilisation des mesures expérimentales nous aurait permis à vérifier la validation de chacune de ces relations

II.2.RESULTATS EXPERIMENTAUX :**II.2.2.Analyse des résultats expérimentaux :****II.2.2.1.Ressaut hydraulique a pente positive :****II.2.2.1.1.Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal :**

Les figures de (2.1) à (2.4) montrent l'ajustement le rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 , pour quatre angles d'inclinaison α distincts, tels que : $\tan(\alpha) = 0.00, 0.005, 0.001, 0.015$.

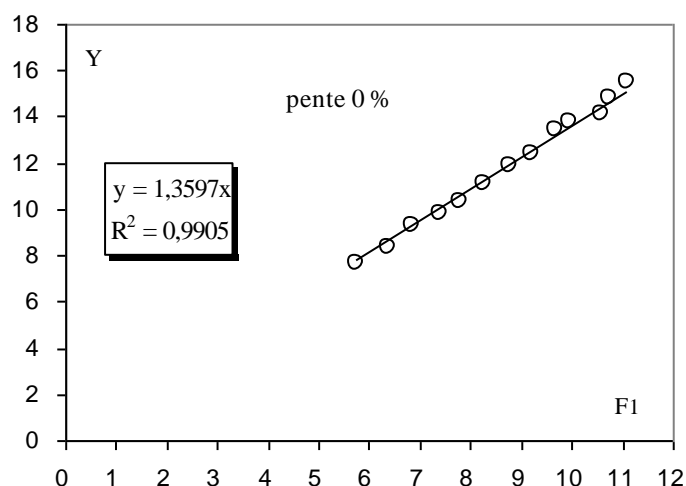


Figure 2.1 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,00$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.

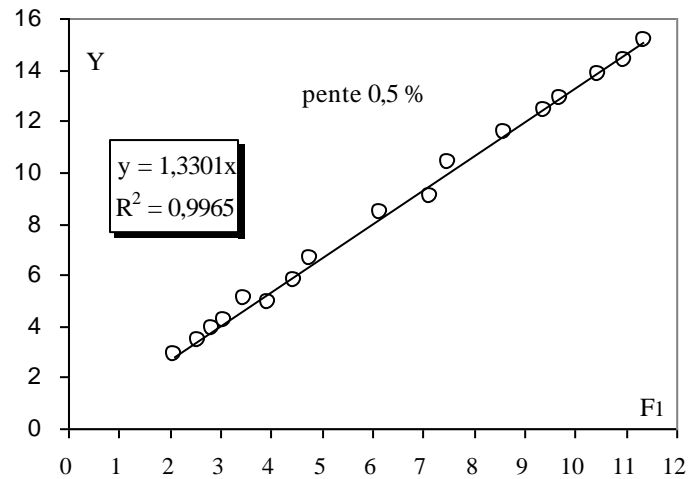


Figure 2.2 : Variation de $Y(F1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,005$. (o) points expérimentaux; (—) Courbes d'ajustement..

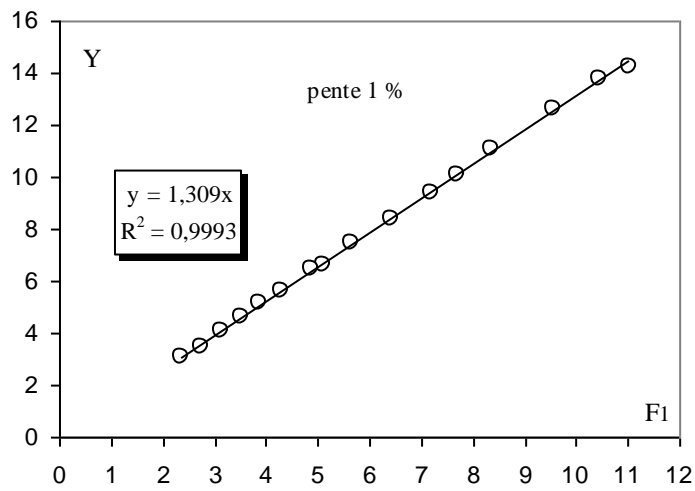


Figure 2.3 : Variation de $Y(F1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,01$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.

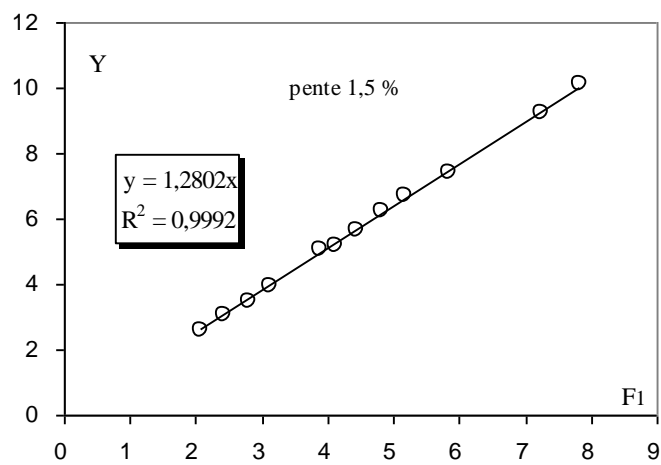


Figure 2.4 : Variation de $Y(F1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,015$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

Tableau 2.1 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F1

| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
|--------------|-------|------------------|-------|-----------------|-------|------------------|-------|
| F1 | Y | F1 | Y | F1 | Y | F1 | Y |
| 5,74 | 7,65 | 3,93 | 4,90 | 4,30 | 5,60 | 7,25 | 9,25 |
| 6,39 | 8,35 | 4,45 | 5,80 | 5,11 | 6,65 | 7,82 | 10,10 |
| 6,83 | 9,30 | 7,13 | 9,05 | 6,42 | 8,35 | 3,12 | 3,95 |
| 7,40 | 9,80 | 8,60 | 11,55 | 7,21 | 9,35 | 4,11 | 5,20 |
| 7,81 | 10,35 | 9,39 | 12,40 | 7,72 | 10,10 | 4,44 | 5,65 |
| 8,28 | 11,10 | 9,70 | 12,90 | 8,37 | 11,05 | 4,82 | 6,25 |
| 8,76 | 11,85 | 10,47 | 13,80 | 9,57 | 12,60 | 5,85 | 7,43 |
| 9,19 | 12,40 | 10,98 | 14,35 | 10,44 | 13,75 | 2,07 | 2,60 |
| 9,69 | 13,40 | 11,38 | 15,15 | 11,04 | 14,25 | 2,42 | 3,06 |
| 9,94 | 13,80 | 2,56 | 3,40 | 3,86 | 5,17 | 2,80 | 3,50 |
| 10,58 | 14,15 | 3,49 | 5,07 | 2,36 | 3,10 | 3,90 | 5,06 |
| 10,75 | 14,85 | 4,78 | 6,67 | 2,73 | 3,48 | 5,18 | 6,70 |
| 11,09 | 15,5 | 6,17 | 8,47 | 3,14 | 4,05 | | |
| | | 7,50 | 10,40 | 3,53 | 4,63 | | |
| | | 2,10 | 2,85 | 4,88 | 6,50 | | |
| | | 2,83 | 3,88 | 5,64 | 7,50 | | |
| | | 3,06 | 4,25 | | | | |

L'analyse des mesures expérimentales, montre que chaque nuage de points suit l'allure d'une courbe unique. Un ajustement par la méthode des moindres carrés linéaires montre que cette courbe est de la forme. $Y = aF_1$

Les données expérimentales sont représentées au tableau 2.1. Les figures 2.1 à 2.4 montrent l'ajustement de la relation $Y = aF_1$ pour les quatre inclinaisons du canal rectangulaire.

Tableau 2.2 : Valeurs des paramètres a

| Tang (α) | a | R ² |
|----------|--------|----------------|
| 0,00 | 1,3597 | 0,9905 |
| 0,005 | 1,3301 | 0,9965 |
| 0,01 | 1,309 | 0,9993 |
| 0,015 | 1,2802 | 0,9992 |

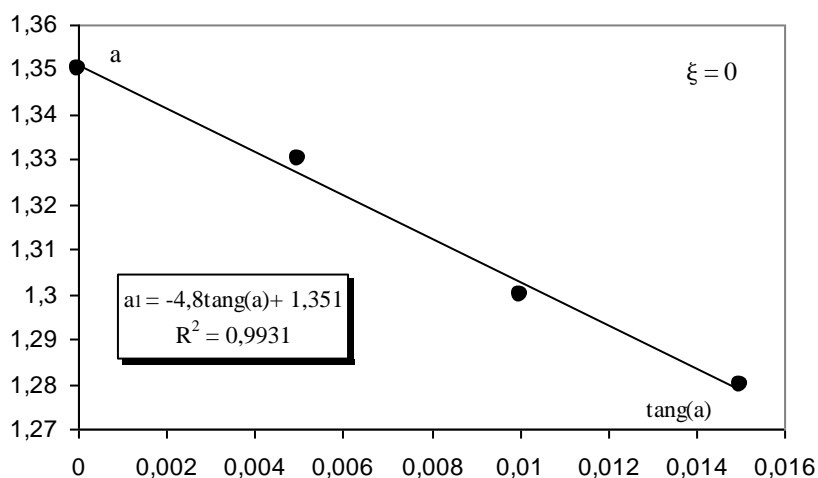


Figure 2.5 : Variation du paramètre a en fonction de tang (α).

La figure 2.5 montre clairement que la variation de a en fonction de la pente du canal $\tan(\alpha)$ suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

$$a = -5,2 \tan(\alpha) + 1,344 \quad ; \quad R^2 = 0,9657 \quad (2.1)$$

Remplaçant les paramètres a par leurs expressions respectives dans la relation $Y = a F_1$, on obtient :

$$Y = [-5,2 \tan(\alpha) + 1,344] F_1 \quad ; \quad R^2 = 0,9657 \quad (2.2)$$

$$\text{Pour } 2,10 \leq F_1 \leq 11,38 \text{ et } 0,00 \leq \tan(\alpha) \leq 0,015$$

La relation approchée (2.2) étant implicite dans (Y) , nous fournit un moyen simple et pratique pour la détermination du rapport (Y) des hauteurs conjuguées, connaissant le nombre de Froude incident F_1 et l'angle d'inclinaison α du canal. Cette relation s'applique pour des nombres de Froude (F_1) variant entre 2 et 14.

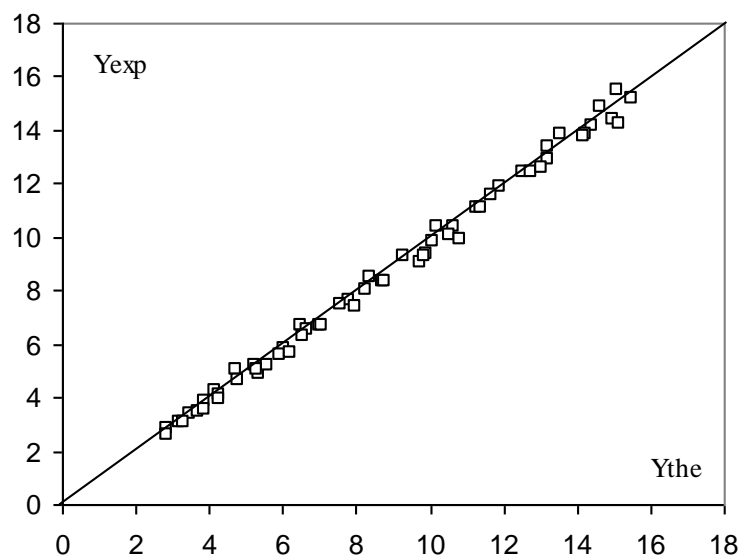


Figure 2.6 : Variation de rapport des hauteurs conjuguées expérimentales $F_1 \exp$ en fonction Rapport des hauteurs conjuguées théorique Y_{th} calculée selon la relation (2.2).
(—) Première bissectrice d'équation : $Y_{exp} = Y_{the}$.

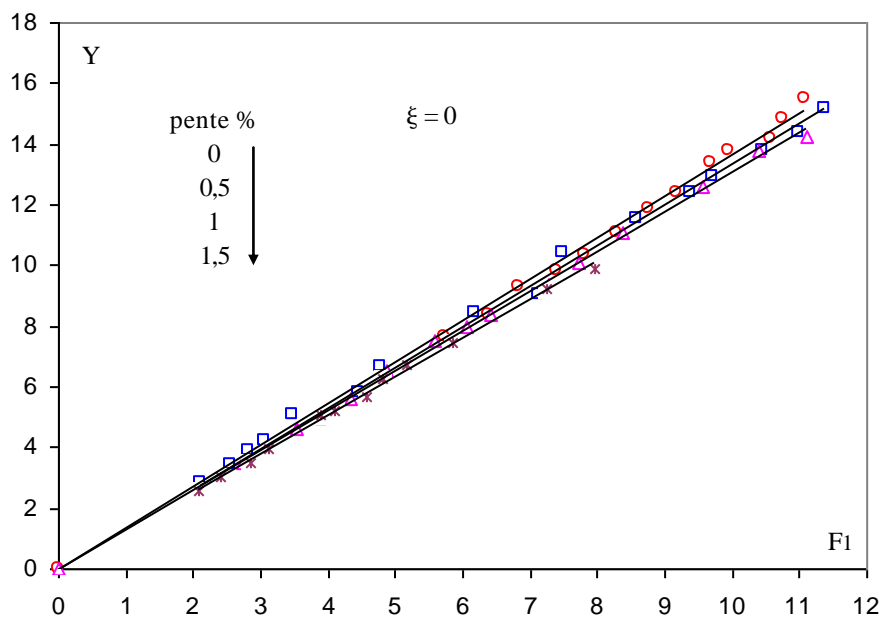


Figure 2.7 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour $\tan(\alpha) = 0,00$ (\circ) ; $\tan(\alpha) = 0,005$ (\square) ; $\tan(\alpha) = 0,01$ (Δ) ; $\tan(\alpha) = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

En effet, pour obtenir le rapport des hauteurs conjuguées Y issu de la relation approchée (2.2), on a utilisé les couples de valeurs (F_1, Y)

II.2.2.2. Longueurs caractéristiques du ressaut :

II.2.2.2.1. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 :

La longueur L_j a été considérée comme étant la distance séparant la section initiale du ressaut et la section finale (où s'effectue la mesure de h_2). L'objectif principal de cette partie de l'étude est de quantifier la longueur relative L_j/h_1 dans la gamme de valeurs testées de la pente du canal. La représentation de la relation $L_j/h_1 = f(F_1)$, a permis de montrer que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative L_j/h_1 du ressaut.

La figure (2.8) à (2.11) montre la variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

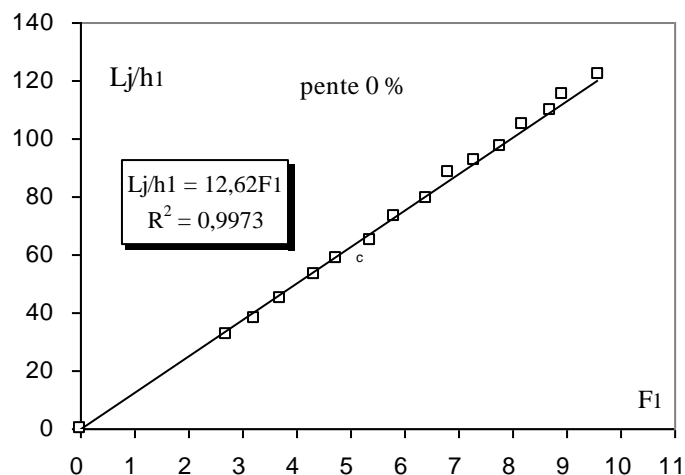


Figure 2.8 : Variation du rapport $Lj/h1$ en fonction du nombre de Froude $F1$, pour $\tan(\alpha) = 0,00$. (\square) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement

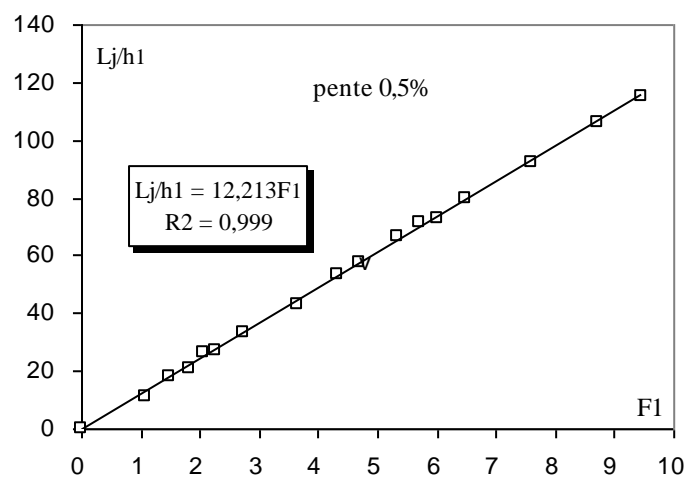


Figure 2.9 : Variation du rapport $Lj/h1$ en fonction du nombre de Froude $F1$ pour $\tan(\alpha) = 0,005$. (\square) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement

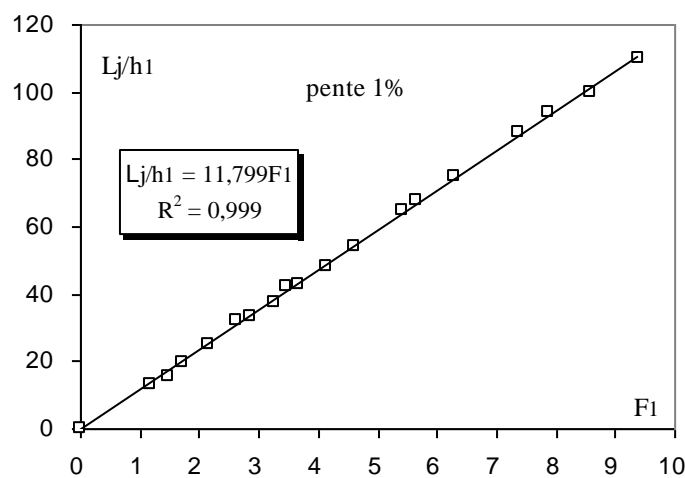


Figure 2.10 : Variation du rapport $Lj/h1$ en fonction du nombre de Froude $F1$ pour $\tan(\alpha) = 0,015$. (\square) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement

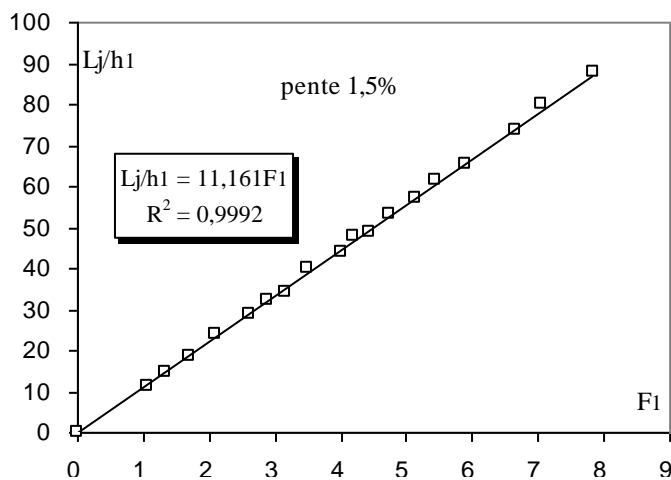


Figure 2.11 : Variation du rapport $Lj/h1$ en fonction du nombre de Froude $F1$ pour $\tan(\alpha) = 0,015$. (□) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement

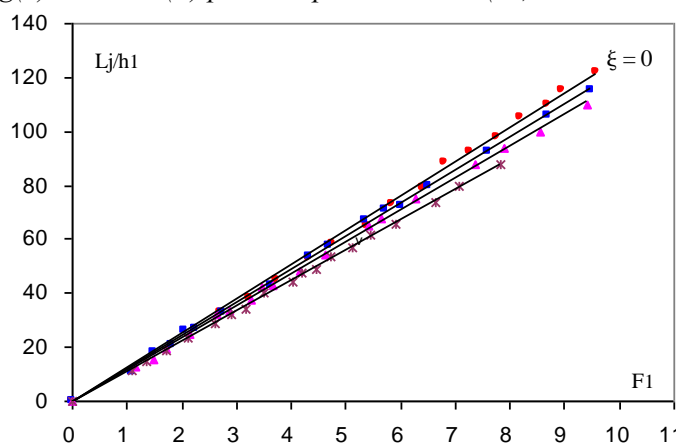


Figure 2.12 : Variation expérimentale de $Lj/h1$ pour différentes valeurs de $\tan(\alpha)$. (—) courbe tracé selon la relation (2.3).

Tableau 2.: Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage de la figure (2.8)

à(2,11)

| Rugosité 0 mm | | | | | | | |
|---------------|--------|------------------|--------|-----------------|--------|------------------|-------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F1 | Lj/h1 | F1 | Lj/h1 | F1 | Lj/h1 | F1 | Lj/h1 |
| 2,72 | 32,50 | 7,60 | 92,50 | 4,15 | 48,00 | 4,03 | 44,00 |
| 3,23 | 38,00 | 8,70 | 106,00 | 5,42 | 65,00 | 4,45 | 49,00 |
| 3,72 | 45,00 | 9,47 | 115,00 | 6,28 | 75,00 | 5,13 | 57,00 |
| 4,33 | 53,00 | 4,32 | 53,33 | 7,37 | 88,00 | 5,91 | 65,50 |
| 4,74 | 58,50 | 5,34 | 66,67 | 7,89 | 94,00 | 6,65 | 73,50 |
| 5,39 | 65,00 | 5,70 | 71,33 | 8,57 | 100,00 | 7,06 | 80,00 |
| 5,83 | 73,00 | 6,00 | 72,67 | 9,40 | 110,00 | 7,84 | 88,00 |
| 6,40 | 79,00 | 6,50 | 80,00 | 2,86 | 33,33 | 2,10 | 23,67 |
| 6,81 | 88,50 | 1,10 | 11,00 | 3,27 | 37,33 | 2,62 | 28,67 |
| 7,28 | 92,50 | 1,83 | 20,75 | 3,66 | 43,00 | 4,21 | 47,67 |
| 7,76 | 97,50 | 2,06 | 26,25 | 4,62 | 54,00 | 4,74 | 53,33 |
| 8,19 | 105,00 | 2,25 | 27,00 | 5,65 | 67,67 | 5,45 | 61,33 |
| 8,69 | 110,00 | 4,69 | 57,75 | 1,73 | 19,50 | 1,35 | 14,50 |
| 8,94 | 115,00 | 1,50 | 18,00 | 2,14 | 25,00 | 1,70 | 18,75 |
| 9,58 | 122,00 | 3,65 | 43,00 | 3,47 | 42,00 | 1,07 | 11,20 |
| | | 2,75 | 33,00 | 1,17 | 13,00 | 2,90 | 32,00 |
| | | | | 1,47 | 15,20 | 3,16 | 34,00 |
| | | | | 2,63 | 32,00 | 3,50 | 40,00 |

Selon les figures 2.8 à 2.11, l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire de la forme. $L_j/h_1 = a F_1 + b$.

Le tableau 2.4 représente le paramètre 'a' pour les quatre valeurs de pentes considérées.

Tableau 2.4 : regroupe les valeurs des coefficients a_1

| Rugosité 0 mm | | |
|-------------------|-------|--------|
| Tang (α) | a | R^2 |
| 0,00 | 12,62 | 0,9811 |
| 0,005 | 12,21 | 0,9872 |
| 0,01 | 11,79 | 0,9990 |
| 0,015 | 11,16 | 0,9992 |

La figure 2.13 montre que la variation du paramètre a en fonction de la pente du canal, suit parfaitement une loi linéaire que l'on peut écrire comme suit :

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_1} = [-96F_1 + 12,666] \quad ; \quad R^2 = 0,9879 \quad (2.3)$$

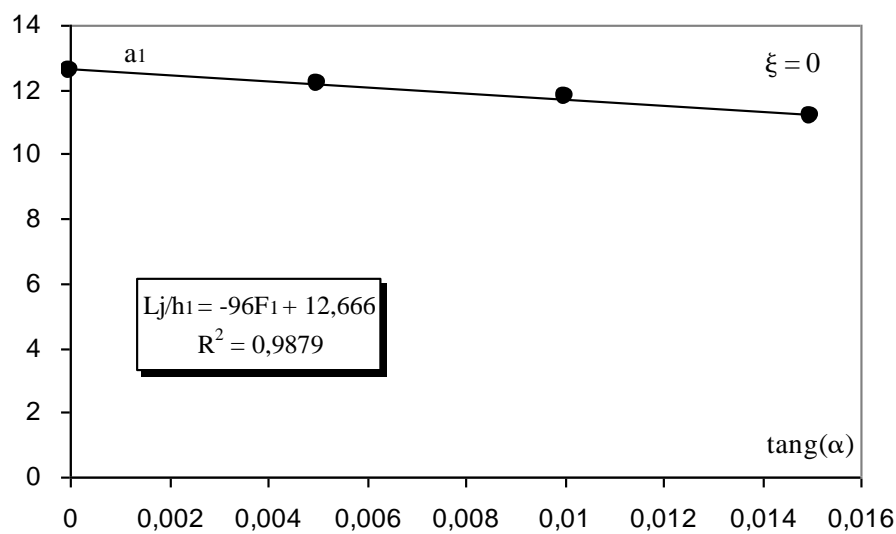


Figure 2.13 : Variation du paramètre 'a' en fonction de $\tan(\alpha)$.

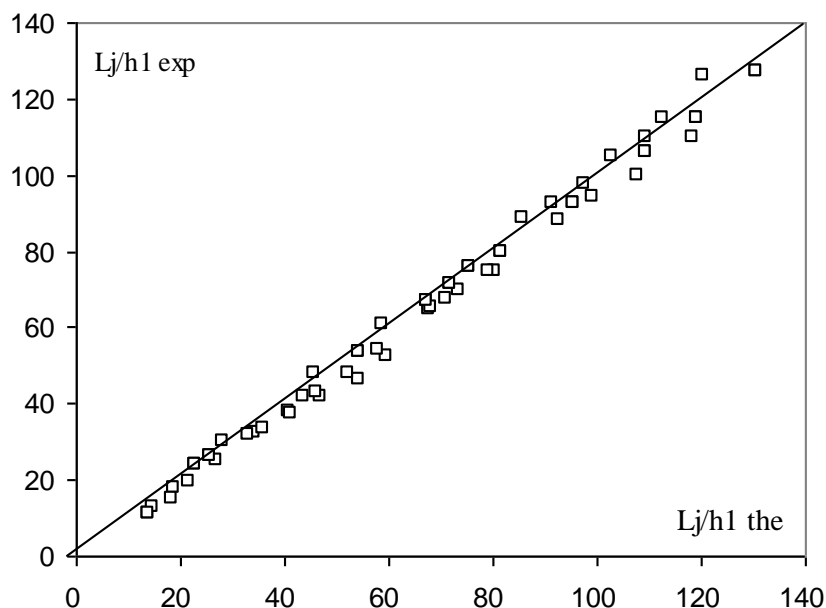


Figure 2.14 : Variation de la relation $f(F_1, \alpha)$ en fonction de la hauteur relative L_j/h_1 du seuil. (□) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $f(F_1, \alpha) = L_j/h_1$.

II.2.2.2. Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 :

Les figures de (2.15) à (2.18) montrent la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 , pour six angles d'inclinaison α distincts, tels que : $\tan(\alpha) = 0.00, 0.005, 0.01, 0.015$.

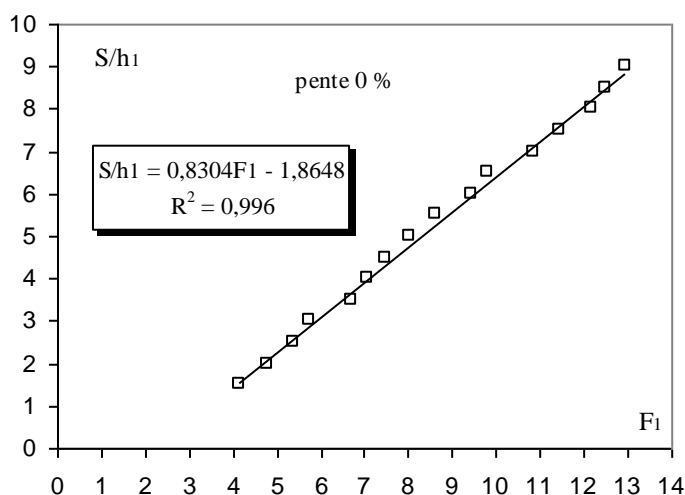


Figure 2.15 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , Pour $\tan(\alpha) = 0,00$. (□) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement

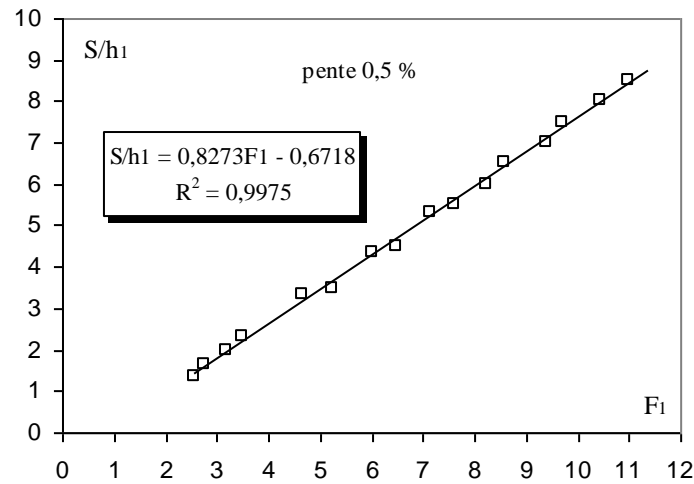


Figure 2.16 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , Pour $\tan(\alpha) = 0,005$. (□) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.

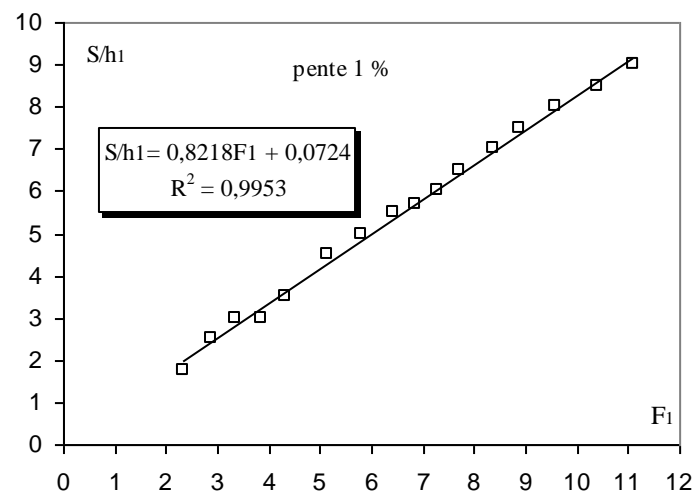


Figure 2.17 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , Pour $\tan(\alpha) = 0,01$. (□) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement

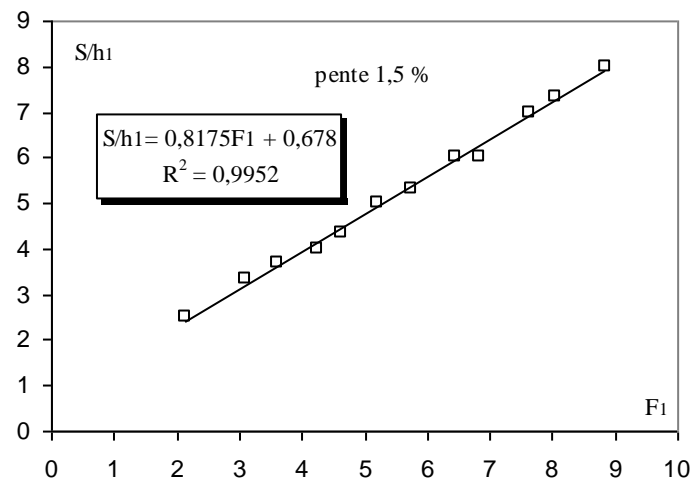


Figure 2.18 : Variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , Pour $\tan(\alpha) = 0,015$. (□) points expérimentaux ; (—) Courbes d'ajustement.

Tableau 2.5 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F_1

| Rugosité 0 mm | | | | | | | |
|-----------------------|------|---------------------------|------|--------------------------|------|---------------------------|------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F_1 | S | F_1 | S | F_1 | S | F_1 | S |
| 4,14 | 1,50 | 5,25 | 3,50 | 2,87 | 2,50 | 7,65 | 7,00 |
| 4,77 | 2,00 | 6,03 | 4,33 | 3,34 | 3,00 | 8,06 | 7,33 |
| 5,38 | 2,50 | 6,47 | 4,50 | 4,34 | 3,50 | 8,84 | 8,00 |
| 5,74 | 3,00 | 7,13 | 5,33 | 5,15 | 4,50 | 2,15 | 2,50 |
| 6,72 | 3,50 | 7,59 | 5,50 | 6,42 | 5,50 | 3,10 | 3,33 |
| 7,06 | 4,00 | 8,24 | 6,00 | 7,28 | 6,00 | 3,62 | 3,67 |
| 7,46 | 4,50 | 8,60 | 6,50 | 7,72 | 6,50 | 4,24 | 4,00 |
| 8,04 | 5,00 | 9,39 | 7,00 | 8,37 | 7,00 | 4,62 | 4,33 |
| 8,64 | 5,50 | 9,70 | 7,50 | 8,89 | 7,50 | 5,21 | 5,00 |
| 9,44 | 6,00 | 10,47 | 8,00 | 9,57 | 8,00 | 5,74 | 5,33 |
| 9,81 | 6,50 | 10,98 | 8,50 | 10,40 | 8,50 | 6,45 | 6,00 |
| 10,84 | 7,00 | 2,56 | 1,33 | 11,11 | 9,00 | 6,84 | 6,00 |
| 11,44 | 7,50 | 2,75 | 1,67 | 3,86 | 3,00 | | |
| 12,18 | 8,00 | 3,17 | 2,00 | 5,82 | 5,00 | | |
| 12,52 | 8,50 | 3,49 | 2,33 | 6,85 | 5,67 | | |
| 12,93 | 9,00 | 4,65 | 3,33 | 2,36 | 1,75 | | |

Selon les figures (2.15) à (2.18), l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire de la forme. $S/h_1 = a F_1 + b$.

Le tableau 2.6 montre clairement que les paramètres a et b sont fonction de la pente du canal et augmente progressivement avec l'augmentation de tang (α).

Tableau 2.6 : Valeurs des paramètres a et b

| Rugosité 0 mm | | | | |
|-------------------|--------------------|-------|-------|-------|
| Tang (α) | a | b | b | R^2 |
| 0,00 | 0,8304 | -1,86 | -1.86 | 3.14 |
| 0,005 | 0,8273 | -0,67 | -0.67 | 3.33 |
| 0,01 | 0,8222 | 0,06 | 0.06 | 5.06 |
| 0,015 | 0,8175 | 0,67 | 0.67 | 5.67 |
| | $a \approx 0,8243$ | | | |

Les **Figures** (2.19) montré l'ajustement statistique du paramètre b en fonction de la pente du canal tang (α) par la méthode des moindres carrés. Les paramètres a sont presque égaux, et leur moyenne arithmétique est $a \approx 0,8243$ tandis que

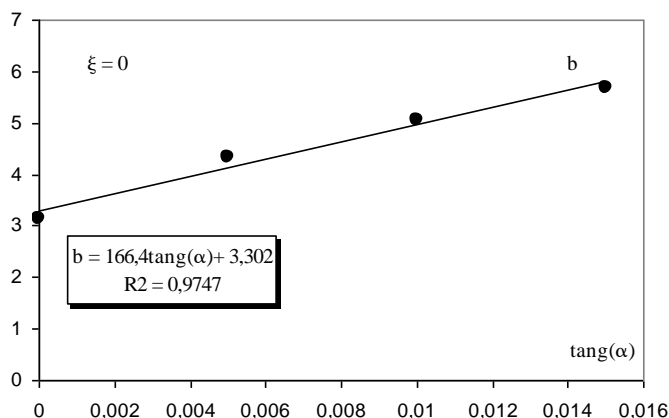


Figure2.19 : Variation du paramètre 'b' en fonction de $\tan(\alpha)$

Les figures (2.19) montrent clairement que la variation de b en fonction de la pente ($\tan(\alpha)$) du canal suit une loi linéaire pour les deux paramètres, selon les relations suivantes :

$$b = 166 \tan(\alpha) - 5 + 3,302 ; \quad R^2 = 0,9747 \quad (2.4)$$

En remplaçant les paramètres a et b par leurs expressions respectives dans la relation $s/h_1 = a(F_1) + b$ on obtient la relation générale suivante :

$$\frac{s}{h_1} [0,8243F_1 + 166,4 \tan(\alpha) - 1,698] \quad ; \quad R^2 = 0,974 \quad (2.5)$$

La figure 2.20 confirme que la relation (2.5) représente un bon ajustement pour la détermination de la hauteur relative s/h_1 du seuil, connaissant le nombre de Froude incident F_1 , et l'inclinaison (α) du canal.

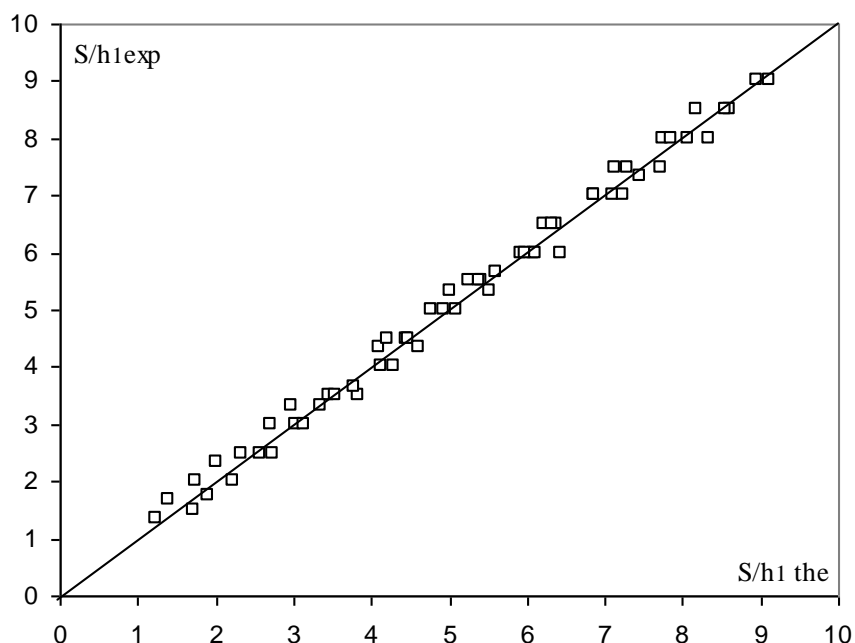


Figure2.20 : Variation de la relation $f(F_1, \alpha)$ en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil. (□) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $f(F_1, \alpha) = s/h_1$

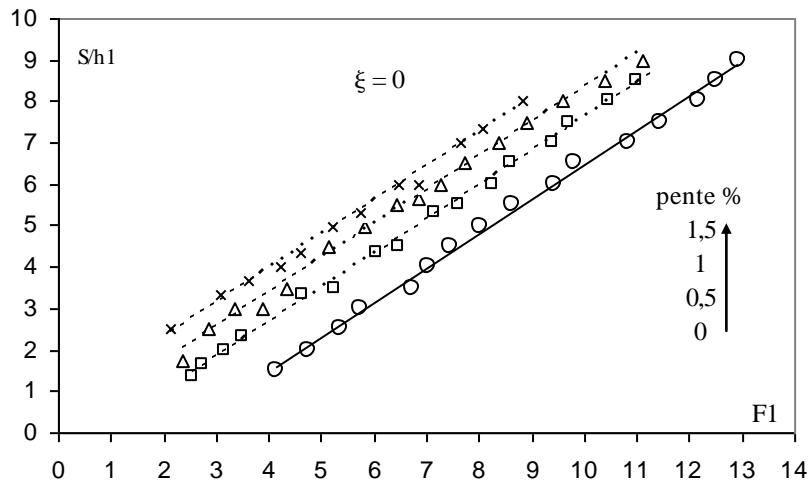


Figure 2.21 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $Tang(\alpha) = 0,00$ (\circ) ; $tang\alpha = 0,005$ (\square) ; $tang\alpha = 0,01$ (Δ) ; $tang\alpha = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

II.2.2.2. Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F_1 :

La longueur L_r est considérée comme étant la distance séparant la section initiale et la section finale du rouleau de surface. L'analyse de la relation $L_r/h_1 = f(F_1)$, a permis également de L_a du rouleau.

La figure (2.22) montre la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

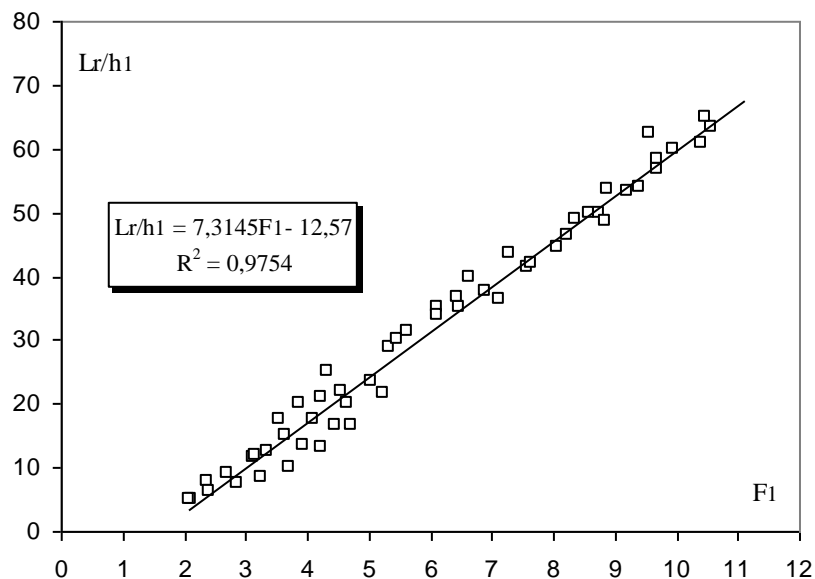


Figure 2.22 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour $0,00 \leq \tan(\alpha) \leq 0,015$

La figure (2.22) montre que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident, engendre celle de la longueur relative du rouleau. Par ailleurs, l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir également à une relation linéaire d'équation :

$$\lambda_r = \frac{L_r}{h_1} = 7,3145F_1 - 12,57 \quad ; \quad R^2 = 0,9754 \quad (2.6)$$

Pour $2,10 \leq F_1 \leq 11,11$ et $0,00 \leq \tan(\alpha) \leq 0,015$.

Tableau 2.7 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage de la figure (2.22)

| Rugosité 0 mm | | | | | | | |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F ₁ | L _r /h ₁ | F ₁ | L _r /h ₁ | F ₁ | L _r /h ₁ | F ₁ | L _r /h ₁ |
| 3,72 | 10,00 | 3,85 | 10,00 | 2,87 | 7,50 | 5,03 | 23,50 |
| 4,23 | 13,33 | 3,93 | 13,50 | 3,34 | 12,50 | 5,45 | 30,00 |
| 4,72 | 16,67 | 4,45 | 16,50 | 4,34 | 25,00 | 6,13 | 34,00 |
| 5,33 | 20,00 | 5,25 | 21,50 | 6,13 | 35,00 | 6,91 | 37,50 |
| 5,74 | 23,33 | 6,47 | 35,00 | 7,28 | 43,50 | 7,65 | 42,50 |
| 6,39 | 26,67 | 7,13 | 36,50 | 8,37 | 49,00 | 8,06 | 44,50 |
| 6,83 | 30,00 | 7,59 | 41,50 | 8,89 | 53,50 | 8,84 | 48,50 |
| 7,40 | 33,33 | 8,24 | 46,50 | 9,57 | 62,50 | 4,24 | 21,00 |
| 7,81 | 36,67 | 8,60 | 50,00 | 10,40 | 61,00 | 6,45 | 36,67 |
| 8,28 | 40,00 | 9,39 | 54,00 | 11,11 | 72,00 | 2,70 | 9,00 |
| 8,76 | 50,00 | 9,70 | 58,50 | 3,24 | 8,30 | 3,12 | 11,75 |
| 9,19 | 53,33 | 10,47 | 65,00 | 4,66 | 20,00 | 3,64 | 15,00 |
| 9,69 | 56,67 | 10,98 | 75,00 | 5,32 | 29,00 | 4,11 | 17,50 |
| 9,94 | 60,00 | 2,10 | 5,00 | 5,62 | 31,33 | 4,56 | 22,50 |
| 10,58 | 63,33 | | | 6,65 | 40,00 | 2,07 | 5,00 |
| | | | | 2,36 | 8,00 | 2,42 | 6,40 |
| | | | | 3,53 | 17,50 | 3,14 | 12,00 |
| | | | | 3,88 | 20,00 | | |

II.3. RENDEMENT DU RESSAUT HYDRAULIQUE :

Le rendement η du ressaut hydraulique est défini par le rapport de la perte de charge ΔH à la charge dans la section initiale du ressaut, soit la relation suivante :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1}$$

Avec :

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

H_1 et H_2 représentent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut. Celles-ci sont définies par les relations suivantes :

$$H_1 = H_1 \cos(\alpha) + \frac{v_1^2}{2g}$$

$$H_2 = H_1 \cos(\alpha) + \frac{v_2^2}{2g}$$

v_1 et v_2 étant respectivement les vitesses à l'amont et à l'aval du ressaut en (m/s).

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

Récapitulons la détermination du rendement η en remplaçant chaque paramètre par son expression dans la relation :

$$\eta = 1 - \frac{H_2}{H_1}, \text{ on aura :}$$

$$\eta = 1 - \frac{Y h_1 \cos(\alpha) + \frac{Q^2}{2gB^2 Y^2 h_1^2}}{h_1 \cos(\alpha) + \frac{Q^2}{2gB^2 h_1^2}}$$

$$\eta = 1 - \frac{h_1 \cos(\alpha) \left[Y + \frac{Q^2 \cos^2(\alpha)}{2gY^2 B^2 (h_1 \cos(\alpha))^3} \right]}{h_1 \cos(\alpha) \left[1 + \frac{Q^2 \cos^2(\alpha)}{2gB^2 (h_1 \cos(\alpha))^3} \right]}$$

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2 \cos^2(\alpha)}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2 \cos^2(\alpha)}{2}} \quad (2.7)$$

La relation (2.7) exprime le rendement du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil, évoluant dans un canal rectangulaire à pente positive en fonction de Y , le rapport des hauteurs conjuguées, de F_1 , le nombre de Froude de l'écoulement incident, et de α , l'angle d'inclinaison du canal par rapport à l'horizontal.

L'analyse expérimentale du rendement du ressaut hydraulique η pour les pentes d'étude a donné la figure (2.23) qui montre sa variation en fonction de nombre de Froude pour les angles d'inclinaison en question :

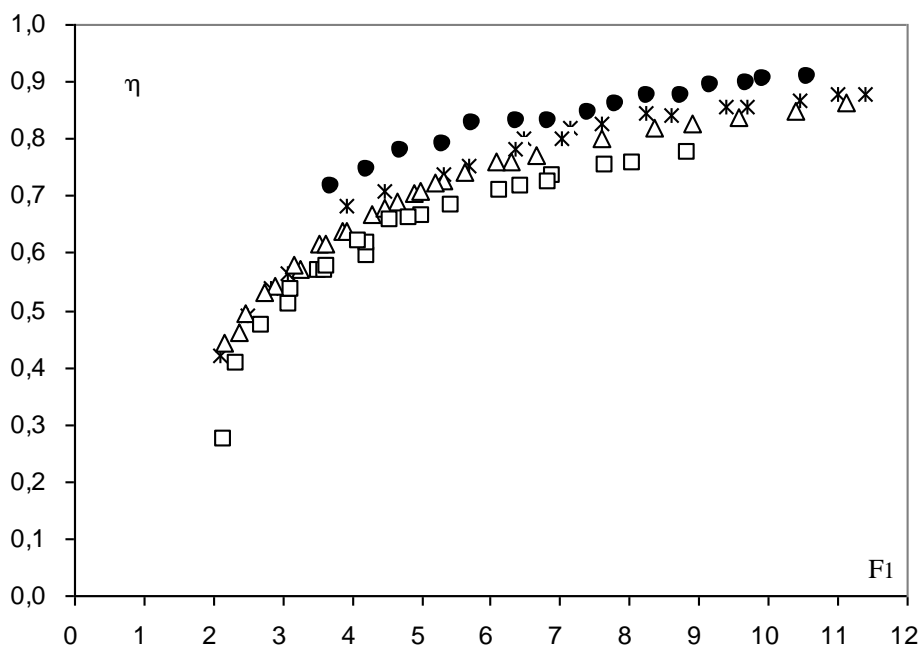


Figure 2.23 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 .
 $Tan\alpha = 0,00$ (\circ) ; $tana = 0,005$ ($*$) ; $tana = 0,01$ (Δ) ; $tana = -0,015$ (\square)

Tableau 2.8 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage de la figure (2.23)

| Rugosité 0 mm | | | | | | | |
|--------------------------|--------|---------------------------|--------|--------------------------|--------|---------------------------|--------|
| tang (α) = 0,00 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F_1 exp | η | F_1 exp | η | F_1 exp | η | F_1 exp | η |
| 3,72 | 0,71 | 3,93 | 0,68 | 4,27 | 0,69 | 8,84 | 0,84 |
| 4,23 | 0,75 | 4,45 | 0,71 | 4,66 | 0,71 | 2,15 | 0,34 |
| 4,72 | 0,78 | 6,47 | 0,80 | 5,32 | 0,75 | 3,10 | 0,58 |
| 5,33 | 0,79 | 7,13 | 0,82 | 5,62 | 0,76 | 3,62 | 0,64 |
| 5,74 | 0,83 | 7,59 | 0,83 | 6,29 | 0,78 | 4,24 | 0,69 |
| 6,390 | 0,83 | 8,24 | 0,85 | 6,65 | 0,79 | 6,45 | 0,79 |
| 6,83 | 0,83 | 8,60 | 0,84 | 7,59 | 0,82 | 6,84 | 0,79 |
| 7,40 | 0,85 | 9,39 | 0,86 | 2,36 | 0,48 | 2,35 | 0,47 |
| 7,81 | 0,86 | 9,70 | 0,86 | 2,73 | 0,55 | 2,70 | 0,54 |
| 8,28 | 0,87 | 10,47 | 0,87 | 3,14 | 0,60 | 3,12 | 0,60 |
| 8,76 | 0,87 | 10,98 | 0,88 | 3,53 | 0,63 | 3,64 | 0,65 |
| 9,19 | 0,89 | 11,38 | 0,88 | 4,47 | 0,70 | 4,11 | 0,69 |
| 9,69 | 0,90 | 5,32 | 0,74 | 4,88 | 0,73 | 4,56 | 0,73 |
| 9,94 | 0,90 | 6,34 | 0,78 | 5,21 | 0,74 | 4,82 | 0,73 |
| 10,58 | 0,91 | 7,00 | 0,80 | 6,07 | 0,78 | 2,07 | 0,45 |
| | | 2,10 | 0,42 | 2,17 | 0,46 | 2,42 | 0,51 |
| | | 2,83 | 0,54 | 2,47 | 0,51 | 2,86 | 0,58 |
| | | 3,06 | 0,57 | 3,63 | 0,63 | 3,14 | 0,60 |
| | | 5,69 | 0,75 | 3,93 | 0,66 | | |
| | | 2,50 | 0,49 | 4,99 | 0,73 | | |

II.4. EXEMPLE D'APPLICATION :

Un exemple d'application de calcul des relations obtenues, pour le cas du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire à pente variable à fond lisse, connaissant le débit volumique. $Q=5$ l/s, le débit volume passant par le bassin d'amortissement de section droite rectangulaire m^3/s ; la profondeur conjuguée amont du ressaut $h_1 = 0,9m$; la largeur de fond de canal $b = 0,25m$. Le nombre de Froude de l'écoulement incident est :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gB^2 [h_1 \cos(\alpha)]^3}$$

Remplacez chaque paramètre par sa valeur dans l'équation $F_1 = 7,48$

II.4.1. Ressaut contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire à pente nulle :

($\alpha=0\%$)

Rapport des hauteurs conjuguées Y

$$Y = [-6 \tan g(\alpha) + 1.355]F_1 = 10,13$$

D'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut.

$$h_2 = 9,12m$$

La hauteur relative du seuil S

$$\frac{S}{h_1} [0,8243F_1 + 166,4 \tan g(\alpha) - 1,698] = 4,47$$

D'où la hauteur du seuil $S = 4,02m$.

II.4.2. Ressaut contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire à pente positive :

($\alpha=1,5\%$)

Rapport des hauteurs conjuguées Y

$$Y = [-6 \tan g(\alpha) + 1.355]F_1 = 9,46$$

D'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut.

$$h_2 = 8,51m$$

La hauteur relative du seuil S

$$\frac{S}{h_1} [0,8243F_1 + 166,4 \tan g(\alpha) - 1,698] = 6,96$$

D'où la hauteur du seuil $S = 6,26m$

II.5. CONCLUSION:

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation du rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction de nombre de Froude de l'écoulement incident, pour quater valeurs distinctes de la pente du canal.

Quater nuages de points distincts, correspondant chacun à une valeur bien déterminée de la pente du canal. L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire de la forme $Y = aF_1$.

Dans un second temps l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique à savoir la longueur du ressaut et la longueur du rouleau de surface. Il a été montré que l'inclinaison du canal, n'a pas d'influence sur les relations $\lambda_j(F_1) S = s/h_1$ et $\lambda_r(F_1)$. En outre, l'analyse statistique des mesures expérimentales a montré que les deux relations suivent une loi de type linéaire.

Un troisième lieu, la détermination du rendement du ressaut hydraulique η qui présente la fleur de notre étude. Après l'analyse effectuée, on a trouvé que le rendement du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à pente positive est directement proportionnel au nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident et inversement proportionnel à la pente du Canal. La détermination du rendement du ressaut hydraulique η qui présente la fleur de notre étude.

II.6. ANALYSE THEORIQUE DE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A PENTE VARIABLE

II.6.1. INTRODUCTION

L'analyse théorique du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire à pente positive variable a permis de déterminer une expression théorique qui montre que le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident peut être exprimé en fonction du rapport $Y=h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut ; h_1 et h_2 étant les hauteurs des niveaux d'eau respectivement à l'extrémité amont et aval du ressaut, de la longueur relative $\lambda =L_j/h_1$; L_j étant la longueur du ressaut et l'angle d'inclinaison α du canal par rapport à l'horizontal. Tel que $F_1 = f(Y, \lambda, \alpha)$.

II.6.2. L'équation de la quantité de mouvement :

L'équation du ressaut est déterminée par l'application de la deuxième loi de Newton qui dit que la variation de la quantité de mouvement d'un système matériel, au cours d'un intervalle de temps Δt , est égale à l'impulsion des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement.

$$\Delta P = \sum F_{ext} \times \Delta t \quad (2.8)$$

ΔP : la variation dans la quantité de mouvement (kg.m.s^{-1})

$\sum F_{ext}$: la somme des forces extérieures (N)

Δt : le temps de variation (s)

L'application de cette loi nécessite quatre hypothèses simplificatrices :

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

L'équation (1.1) devient :

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \sum F_{ext} \quad (2.9)$$

En tenant compte que :

$$P = \rho V v \quad (2.10)$$

ρ : La densité volumique du liquide (kg/m^3)

V : Le volume du liquide (m^3)

v : La vitesse du liquide (m/s)

La variation dans la quantité de mouvement entre les sections amont et aval est donnée par la relation :

$$\Delta P = \Delta P_2 - \Delta P_1 \quad (2.11)$$

Avec

$$\Delta P_1 = \rho v_1 \Delta V \quad (2.12)$$

$$\Delta P_2 = \rho v_2 \Delta V \quad (2.13)$$

v_1 et v_2 étant respectivement les vitesses à l'amont et à l'aval du ressaut.

En divisant la relation (2.10) par Δt , on obtient :

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \rho \frac{\Delta V}{\Delta t} v_2 - \rho \frac{\Delta V}{\Delta t} v_1 \quad (2.14)$$

Le débit volume est donné par la relation :

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.15)$$

En remplaçant dans la relation (2.14), on aura :

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \rho Q v_2 - \rho Q v_1 \quad (2.16)$$

Puis, en remplaçant dans l'expression (2.19), on obtient :

$$\rho Q v_2 - \rho Q v_1 = \sum F_{ext} \quad (2.17)$$

La relation (2.17) est dite l'équation de la quantité de mouvement ou la relation d'Euler.

On a appliqué l'équation (2.17) entre les sections initiale (1-1) et finale (2-2) d'un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné d'un angle α par rapport à l'horizontal (Figure 2.24)

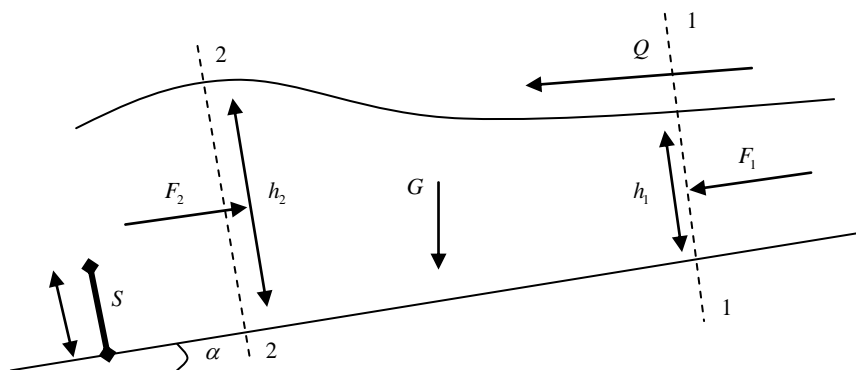


Figure 2.24 : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à pente variable.

L'équation (2.17) devient :

$$\rho Q v_2 - \rho Q v_1 = F_1 + G \sin(\alpha) - F_2 \quad (2.18)$$

Avec :

F_1 : La force de pression appliquée à la section (1-1)

F_2 : La force de pression appliquée à la section (2 -2)

G : Le poids appliqué au centre de gravité du volume d'eau formé par le ressaut

On réécrit la relation (2.18) comme suit :

$$\rho Q v_1 + F_1 + G \sin(\alpha) = \rho Q v_2 + F_2 \quad (2.19)$$

D'après la figure (2.25), les forces F_1 et F_2 sont appliquées respectivement aux centres de gravité des sections rectangulaires (1-1 et (2-2) tandis que le poids G est appliqué au centre de gravité du ressaut.

D'après les lois de l'hydrostatique :

$$F_1 = \omega \bar{h}_1 A_1 \quad (2.20)$$

$$F_2 = \omega \bar{h}_2 A_2 \quad (2.21)$$

$$G = \omega V \quad (2.22)$$

Où

$\omega = \rho g$ Représente le poids spécifique du liquide en écoulement.

\bar{h}_1 et \bar{h}_2 représentent respectivement les distances entre les centres de gravité des sections transversales (1-1) et (2-2) et la surface libre de l'écoulement.

A_1 et A_2 représentent respectivement les aires des sections mouillées (1-1) et (2-2).

V Représente le volume d'eau entre les deux sections (1-1) et (2-2).

α étant l'angle d'inclinaison du canal par rapport à l'horizontal.

si on remplace dans la relation (2.18) par les expressions de F_1 , F_2 et G , elle devient :

$$\rho Q v_1 + \rho g \bar{h}_1 A_1 + G \sin(\alpha) = \rho Q v_2 + \rho g \bar{h}_2 A_2 \quad (2.23)$$

En tenant compte de l'équation de continuité qui dit que s'il y a un écoulement permanent d'un fluide incompressible par un débit Q dans un canal, et si on a deux sections mouillées distinctes (1-1) et (2-2), alors l'équation de débit s'écrit comme suit :

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2.24)$$

Q : Le débit volume de l'écoulement

v_1 : La vitesse moyenne à la section 1 (la section amont du ressaut)

v_2 : La vitesse moyenne à la section 1 (la section aval du ressaut)

A_1 : L'aire de la section mouillée (1-1)

A_2 : L'aire de la section mouillée (2-2)

Par conséquent, les vitesses moyennes de l'écoulement v_1 et v_2 respectivement aux sections amont et aval du ressaut peuvent être écrites comme suit :

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} \tag{2.25}$$

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} \tag{2.26}$$

En prenant les expressions de v_1 et v_2 en considération, la relation (2.24) peut être écrite, après avoir divisé ses membres par ρg , comme suit :

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{h}_1 A_1 + V \sin(\alpha) = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{h}_2 A_2 \tag{2.27}$$

Les expressions de A_1 , A_2 , \bar{h}_1 et \bar{h}_2 puissent être déterminé géométriquement en se basant sur la figure (2.25)

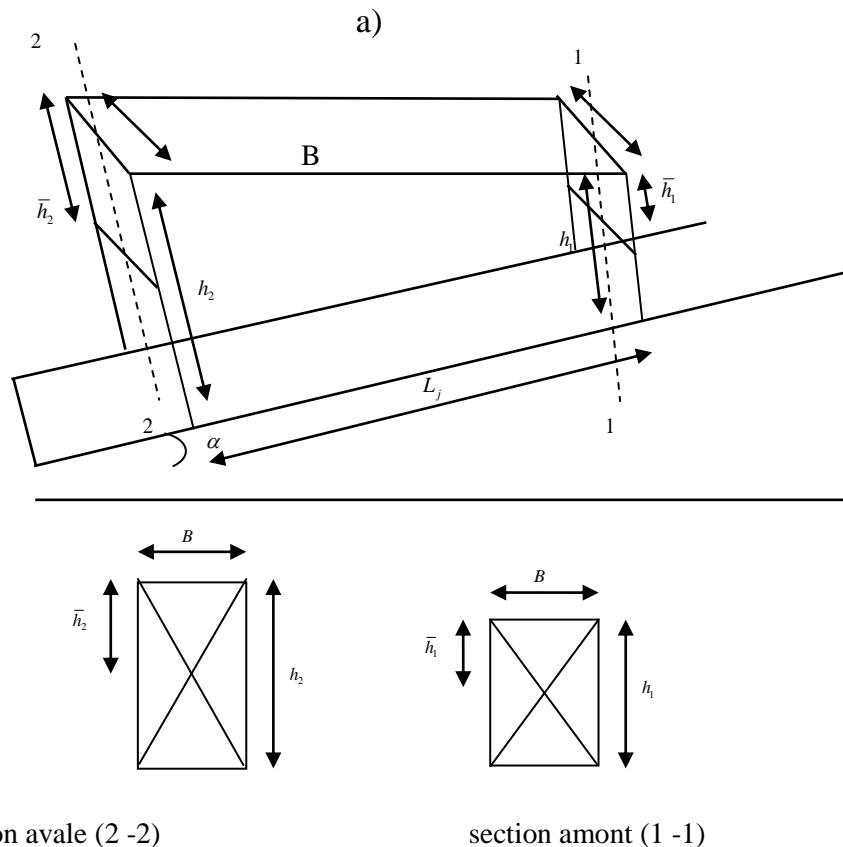


Figure 2.25 : a) Représentation géométrique du volume d'eau engendré par le ressaut

b) Représentation géométrique des sections amont et aval

D'où

$$A_1 = Bh_1 \tag{2.28}$$

$$A_2 = Bh_2 \tag{2.29}$$

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6\cos(\alpha)} \times \frac{3B}{A_1} \quad (2.30)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6\cos(\alpha)} \times \frac{3B}{A_2} \quad (2.31)$$

II.6.3. Détermination du volume du ressaut :

Le volume d'eau V entre la section amont (1-1) et la section aval (2-2) est calculé soit analytiquement soit géométriquement en se basant sur la figure (2.26) :

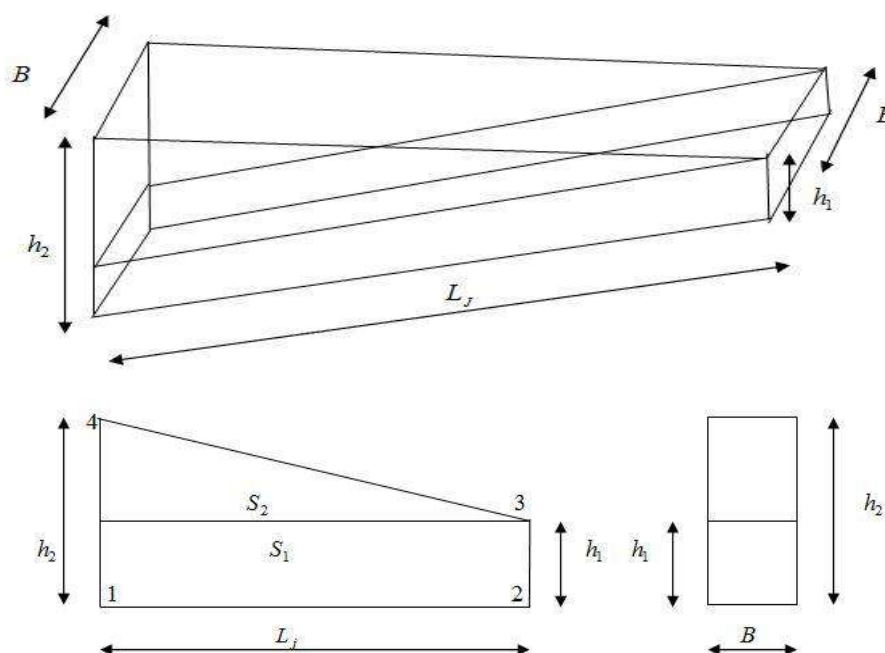


Figure 2.26 : schéma descriptif de la forme géométrique du volume V du ressaut accompagné par les vues de profil et de la surface

II.6.3.1. Détermination analytique du volume du ressaut :

Soit un canal rectangulaire de largeur B et de longueur L_j et de hauteur initiale h_1 et de hauteur finale h_2

A_1 et A_2 représentent respectivement les sections amont et aval de ce canal.

Le volume moyen de ce canal est donné par la relation suivante :

$$V = \frac{1}{2}(A_1 + A_2) \times L_j \quad (2.32)$$

En tenant compte que :

$$A_1 = Bh_1 \text{ et } A_2 = Bh_2, \text{ on aura alors}$$

$$V = \frac{B}{2}(h_1 + h_2)L_j \quad (2.33)$$

II.6.3.2. Détermination géométrique du volume de ressaut :

Soit la section 1234 représentée dans la vue de profil de la figure (2.26), cette section peut être divisée en deux sections :

$$S = S_1 + S_2 \quad (2.34)$$

S_1 est donnée par la relation suivante :

$$S_1 = L_j h_1 \quad (2.35)$$

S_2 est calculée par l'intégral suivant :

$$S_2 = \int_0^{L_j} \frac{(h_2 - h_1)}{L_j} x dx \quad (2.36)$$

Et on obtient :

$$S_2 = (h_2 - h_1) \frac{L_j}{2} \quad (2.37)$$

En remplaçant dans la relation (2.29), on obtient la relation suivante :

$$S = \frac{1}{2} (h_1 + h_2) L_j \quad (2.38)$$

En multipliant cette section par la largeur du canal, on obtient le volume total déterminé précédemment :

$$V = \frac{B}{2} (h_1 + h_2) L_j \quad (2.39)$$

Le rapport des hauteurs conjuguées est donné par la relation suivante :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} \quad (2.40)$$

En remplaçant par cette expression dans la relation (2.40), on aura :

$$V = \frac{B}{2} (Y + 1) h_1 L_j \quad (2.41)$$

Y étant le rapport des hauteurs conjuguées

La relation (2.41) représente le volume calculé du ressaut hydraulique.

II.6.4. Le Facteur De Correction :

Le volume réel du ressaut hydraulique est très difficile à déterminer théoriquement à cause de la perturbation de la surface libre de l'eau due au rouleau de surface, pour cela, il est nécessaire de corriger ce volume en le multipliant par un coefficient K dit facteur de correction.

La relation (2.42) devient :

$$V = \frac{KB}{2}(Y+1)h_1 L_j \quad (2.42)$$

K Étant le rapport du volume réel au volume calculé du ressaut, il sera estimé par voie expérimentale.

En tenant compte des relations (2.28), (2.29), (2.30), (2.31) et (2.42), la relation (2.27) devient :

$$\frac{Q^2}{gBh_1} + \frac{h_1^2}{6\cos(\alpha)} \frac{3B}{Bh_1} Bh_1 + \frac{KB}{2}(Y+1)h_1 L_j \sin(\alpha) = \frac{Q^2}{gBh_2} + \frac{h_2^2}{6\cos(\alpha)} \frac{3B}{Bh_2} Bh_2 \quad (2.43)$$

En arrangeant cette relation, elle devient :

$$\frac{Q^2}{gBh_1} + \frac{Bh_1^2}{2\cos(\alpha)} + \frac{Bh_1}{2}(Y+1)KL_j \sin(\alpha) = \frac{Q^2}{gBh_2} + \frac{Bh_2^2}{2\cos(\alpha)} \quad (2.44)$$

En divisant les deux membres de la relation (2.46) par Bh_1^2 , elle devient :

$$\frac{Q^2}{gB^2h_1^3} + \frac{1}{2\cos(\alpha)} + \frac{K}{2}(Y+1)\frac{L_j}{h_1} \sin(\alpha) = \frac{Q^2}{gB^2h_1^2h_2} + \frac{h_2^2}{2h_1^2\cos(\alpha)} \quad (2.45)$$

La longueur relative du ressaut λ est donnée par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{L_j}{h_1} \quad (2.46)$$

En remplaçant dans la relation (2.45) et en utilisant la relation (2.40), elle devient :

$$\frac{Q^2}{gB^2h_1^3} + \frac{1}{2\cos(\alpha)} + (Y+1)\frac{K\lambda}{2} \sin(\alpha) = \frac{Q^2}{gB^2h_1^3Y} + \frac{Y^2}{2\cos(\alpha)} \quad (2.47)$$

II.6.5. Le nombre de Froude :

Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident est l'un des caractéristiques les plus significatives dans l'étude de ressaut hydraulique, il sera calculé à la section initiale (1-1), c'est-à-dire au pied du ressaut. Il est donné par la relation suivante :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial h_1} \quad (2.48)$$

Cette relation montre que le nombre de Froude F_1 est en fonction de :

- Le débit volume de l'écoulement Q (m^3/s) ;
- L'accélération de la pesanteur g (m/s^2) ;
- L'aire de la section transversale mouillée au pied de ressaut A_1 (m^2) ;

- La dérivée partielle $\frac{\partial A_1}{\partial h_1}$ de l'aire de la section A_1 au pied de ressaut par rapport à la hauteur h_1 .

D'après la relation (2.28)

$$\frac{\partial A_1}{\partial h_1} = B \quad (2.49)$$

À cause de l'inclinaison du canal avec un angle α par rapport à l'horizontal, on doit écrire la hauteur initiale $h_1 \cos(\alpha)$

En tenant compte de ces constatations, la relation (2.48) devient :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gB^2 h_1^3} \quad (2.50)$$

En remplaçant dans la relation (2.47), elle devient :

$$F_1^2 + \frac{1}{2 \cos(\alpha)} + (Y+1) \frac{K\lambda}{2} \sin(\alpha) = \frac{F_1^2}{Y} + \frac{Y^2}{2 \cos(\alpha)} \quad (2.51)$$

Cette relation est déterminée à partir de l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre deux sections délimitant un ressaut hydraulique à pente positive variable évoluant dans un canal rectangulaire. Elle montre que ce type de ressaut est régi par :

- Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident à la section amont du ressaut ;
- Le rapport Y des hauteurs conjuguées h_1 et h_2 respectivement à l'amont et à l'aval du ressaut ;
- L'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontal (l'angle α) ;
- La longueur relative λ du ressaut.

On arrange cette relation (2.51) comme suit pour avoir l'aspect final de la formule :

$$F_1^2 \left(1 - \frac{1}{Y}\right) = \frac{1}{2 \cos(\alpha)} (Y^2 - 1) - (Y+1) \frac{K\lambda}{2} \sin(\alpha)$$

$$F_1^2 = \frac{Y}{Y-1} \left[\frac{Y^2 - 1}{2 \cos(\alpha)} - (Y+1) \frac{K\lambda}{2} \sin(\alpha) \right]$$

$$F_1^2 = \frac{Y(Y+1)}{2} \left[\frac{1}{\cos(\alpha)} - \frac{K\lambda}{(Y-1)} \sin(\alpha) \right] \quad (2.52)$$

La relation (2.52) exprime le nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées, de l'angle d'inclinaison α du canal par rapport à l'horizontal et de la longueur relative $\lambda = L_j/h_1$ d'un ressaut hydraulique à pente positive variable évoluant dans un canal de section rectangulaire.

II.6.6. Validation de l'approche théorique proposée :

On applique la relation (2.52) dans le cas d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire horizontal ($\alpha = 0$) et on obtient la relation suivante :

$$F_1^2 = \frac{Y(Y+1)}{2} \quad (2.53)$$

La relation (2.53) provient de l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre les deux sections amont et aval d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire horizontal.

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

$$Y = \frac{1}{2}(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1) \quad (2.54)$$

La relation (2.55) est connue sous le nom d'équation de Bélanger et permet d'évaluer le rapport Y des hauteurs conjuguées d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire horizontal en fonction de nombre de Froude F_1 .

Par ailleurs, on peut écrire la relation (2.52) de nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident à la section amont d'un ressaut hydraulique dans un canal hydraulique incliné sous la forme suivante :

$$Y(Y+1) = \frac{2F_1^2}{\frac{1}{\cos(\alpha)} - \frac{K\lambda}{Y-1} \sin(\alpha)} \quad (2.55)$$

Et on aura

$$Y = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{8F_1^2}{\frac{1}{\cos(\alpha)} - \frac{K\lambda}{Y-1} \sin(\alpha)} + 1} - 1 \right] \quad (2.56)$$

L'application de cette relation (2.56) pour un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal ($\alpha = 0$) mène à écrire :

$$Y = \frac{1}{2}(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1) \quad (2.57)$$

Cette relation n'est autre que l'équation du rapport des hauteurs conjuguées dans un canal rectangulaire horizontale proposée par Bélanger.

Pour déterminer expérimentalement le facteur de correction K, on peut reformuler la relation (2.58) comme suit :

$$K = \frac{Y-1}{\lambda \sin(\alpha)} \left[\frac{1}{\cos(\alpha)} - \frac{2F_1^2}{Y(Y+1)} \right] \quad (2.58)$$

Tel que F_1 , le nombre de Froude de l'écoulement incident est calculé selon la relation (2.59) et en remplaçant h_1 par $h_1 \cos(\alpha)$, on obtient :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gB^2 [h_1 \cos(\alpha)]^3} \quad (2.59)$$

Q : Débit de l'écoulement mesuré par le déversoir rectangulaire selon la relation (2.60) en (m^3/s)

B : La largeur du canal en (m)

h_1 : La hauteur du niveau d'eau à la section amont du ressaut en (m)

g : L'accélération de la pesanteur en (m^2/s)

Les valeurs de Y , λ et α sont déterminées expérimentalement.

Le tableau 2.9 présente les valeurs du facteur K obtenues en introduisant les données expérimentales dans la relation (2.58)

Tableau 2.9 : Valeurs du coefficient k selon la relation (2.58) de lapent positive

| tang (α) = 0 ,005 | | | tang (α) = 0 ,010 | | | tang (α) = 0 ,015 | | |
|----------------------------|-------|------|----------------------------|-------|------|----------------------------|-------|------|
| F_1 | Y | K | F_1 | Y | K | F_1 | Y | K |
| 3,70 | 4,90 | 1,21 | 4,30 | 5,60 | 1,47 | 7,25 | 9,25 | 0,38 |
| 4,45 | 5,80 | 1,10 | 5,11 | 6,65 | 0,53 | 7,82 | 10,10 | 1,10 |
| 6,88 | 9,05 | 1,19 | 6,42 | 8,35 | 1,40 | 3,12 | 3,95 | 1,08 |
| 8,60 | 11,55 | 1,13 | 7,21 | 9,35 | 0,71 | 4,11 | 5,20 | 1,03 |
| 9,35 | 12,40 | 0,27 | 7,72 | 10,10 | 1,01 | 4,44 | 5,65 | 1,03 |
| 9,70 | 12,90 | 0,26 | 8,37 | 11,05 | 1,11 | 4,82 | 6,25 | 0,73 |
| 10,44 | 13,80 | 0,01 | 9,57 | 12,60 | 1,09 | 5,85 | 7,43 | 0,88 |
| 10,87 | 14,35 | 0,15 | 10,44 | 13,75 | 1,27 | 2,07 | 2,60 | 1,29 |
| 11,38 | 15,15 | 0,02 | 11,04 | 14,25 | 0,35 | 2,42 | 3,06 | 1,43 |
| 2,56 | 3,40 | 0,35 | 3,86 | 5,17 | 1,03 | 2,80 | 3,50 | 0,56 |
| 4,91 | 6,67 | 1,50 | 2,36 | 3,10 | 0,98 | 3,90 | 5,06 | 1,36 |
| 6,30 | 8,47 | 0,79 | 2,73 | 3,48 | 1,38 | 5,18 | 6,70 | 1,25 |
| 7,78 | 10,40 | 0,80 | 3,14 | 4,05 | 1,25 | | | |
| 2,10 | 2,85 | 0,73 | 3,53 | 4,63 | 1,17 | | | |
| 2,83 | 3,88 | 0,80 | 4,88 | 6,50 | 1,38 | | | |
| 3,06 | 4,25 | 1,15 | 5,64 | 7,50 | 1,01 | | | |
| | | | 6,07 | 8,00 | 0,20 | | | |

Le tableau 2.9 montre que le coefficient de correction k est sans aucun doute une valeur constante. en éliminant quelques valeurs extrêmes, la moyenne arithmétique de toutes les valeurs de k donne la constante ± 0.59 , obtenues en introduisant les données expérimentales dans la relation (2.58)

Afin de vérifier la validité de l'équation semi théorique (2.52), celle-ci est confrontée au nombre de Froude expérimentale calculé en application de la relation (2.59).

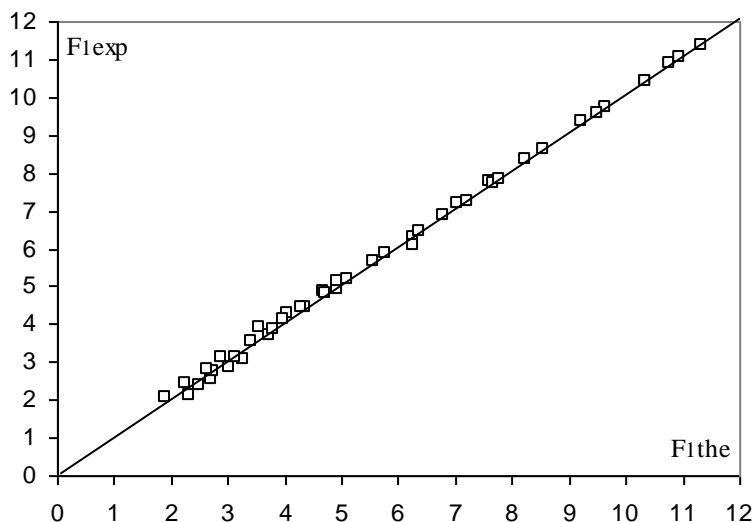


Figure 2.27 : Variation du nombre de Froude expérimental F_{1exp} en fonction du nombre de Froude théorique F_{1th} calculée selon la relation (2.52). — Première bissectrice d'équation : $F_{1exp} = F_{1th}$.

Cette figure indique la comparaison entre les mesures expérimentales de nombres Froude F_1 avec le relations globales empiriques obtenues pour le canal rectangulaire incline. Les points obtenus se répartissent de manière quasi uniforme autour de la première bissectrice.

Par ailleurs, les écarts relatifs entre les nombres de Froude expérimental F_{1exp} et les nombres de Froude théorique F_{1th} sont calculés et présentés au tableau 2.9, afin d'examiner la validité de la relation semi théorique (2.52) issue de notre développement théorique.

Les valeurs de F_{1exp} sont calculées par la relation (2.59) en se basant sur les données expérimentales du tableau (2.9)

II.8. CONCLUSION :

Le coefficient de correction k , défini comme le rapport entre le volume réel et le volume calculé du ressaut, a été estimé à l'aide de données expérimentales. En effet, pour les quater (04) pentes testées, une valeur moyenne constante de $k = 0,59$ a été découverte, permettant la fiabilité de la relation (2,52). En outre, comme la relation générale (2.52) est implicite dans le rapport de hauteur Y conjugué, son application nécessite une procédure itérative à la suite de cette analyse, nous proposons de remplacer la relation (2.52) par une relation d'approximation explicite (2.2) qui nous permet de déterminer facilement le rapport des hauteurs Y conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal. La relation théorique. (2.2), ainsi que la relation d'approche (2.2), ont été comparées (2.52).

Chapitre III

Étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire pente incline à fond rugueux

III.1.INTRODUCTION :

Le présent chapitre a pour but d'étudier d'analyse théorique et expérimentalement de l'effet d'une rugosité des ressauts hydraulique évoluant en canal rectangulaire inclinée rugueux, sur les caractéristiques géométrique du ressaut pour quatre rugosités absolues du fond du canal (ε mm) = (6, 8, 10 et 12). Seront proposés.

Comme il a été signalé dans la partie bibliographique, à l'exception des travaux de(N. Rajaratnam, 1968), très peu d'étude ont été entreprises dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire à fond rugueux et celle aussi de(Rajaratnam, 2002), relative au ressaut hydraulique en canal rectangulaire à fond ondulé.(Kateb, 2006). (Nouacer et al., 2021) approche expérimentale dans un canal rectangulaire à fond rugueux.

III.2.RESULTATS EXPERIMENTAUX :

III.2.2.Ressaut hydraulique incliné rugueux :

III.2.2.1.Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal :

Les figures de (3.1) à (3.5) montrent l'ajustement le rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 , pour quatre angles d'inclinaison α distincts, tels que : $\tan(\alpha) = 0,00; 0,005; 0,01; 0,015$, avec de valeurs de rugosités absolues : ($\varepsilon = \text{mm}$) ; = 06 ; 08; 10 et 12

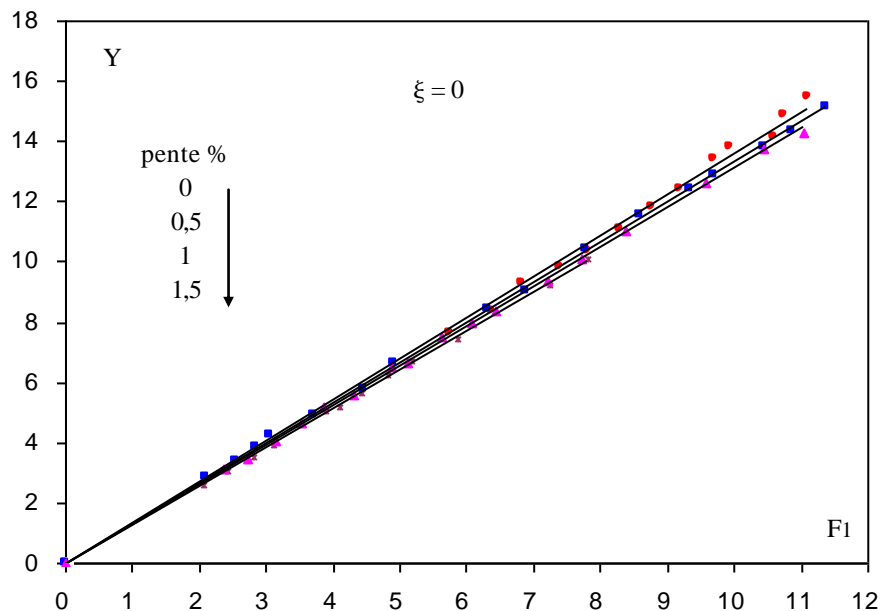


Figure 3.1 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour $\tan(\alpha) = 0,00$ (\circ) ; $\tan(\alpha) = 0,005$ (\square) ; $\tan(\alpha) = 0,01$ (\triangle) ; $\tan(\alpha) = 0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

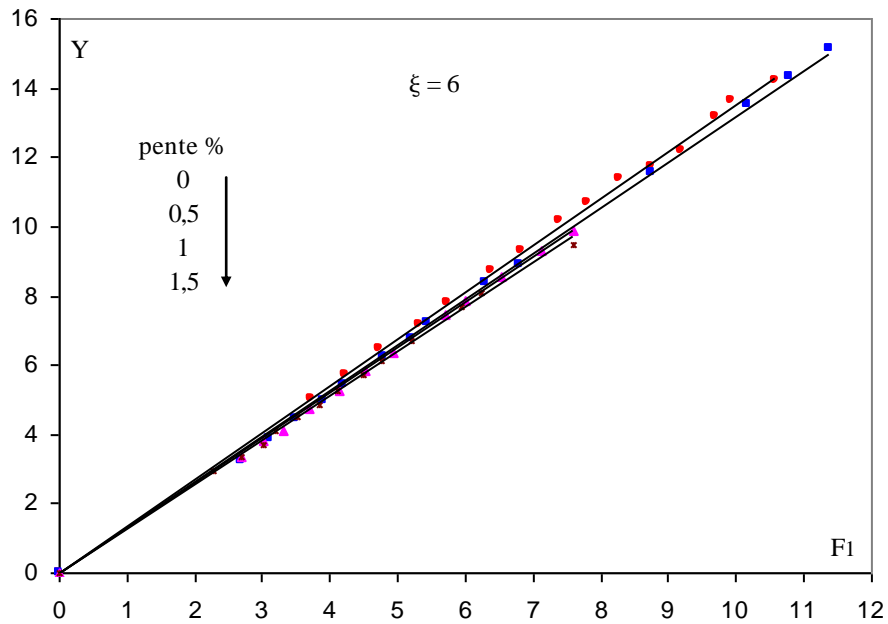


Figure 3.2 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour tang (α) $\tan \alpha = 0,00$ (\circ) ; $\tan \alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan \alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan \alpha = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

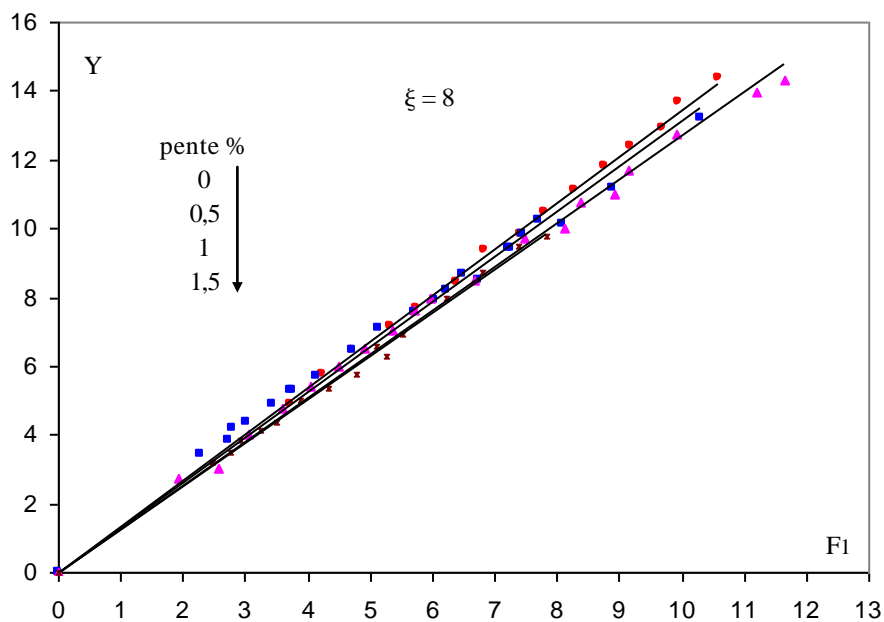


Figure 3.3 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour tang (α) $\tan \alpha = 0,00$ (\circ) ; $\tan \alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan \alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan \alpha = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

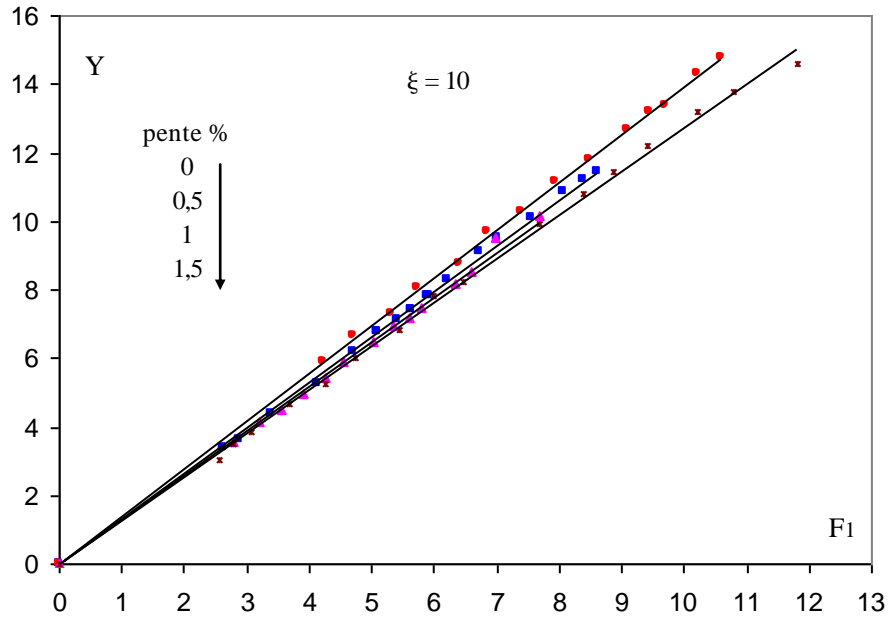


Figure 3.4 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour tang (α) $\tan\alpha = 0,00$ (\circ) ; $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

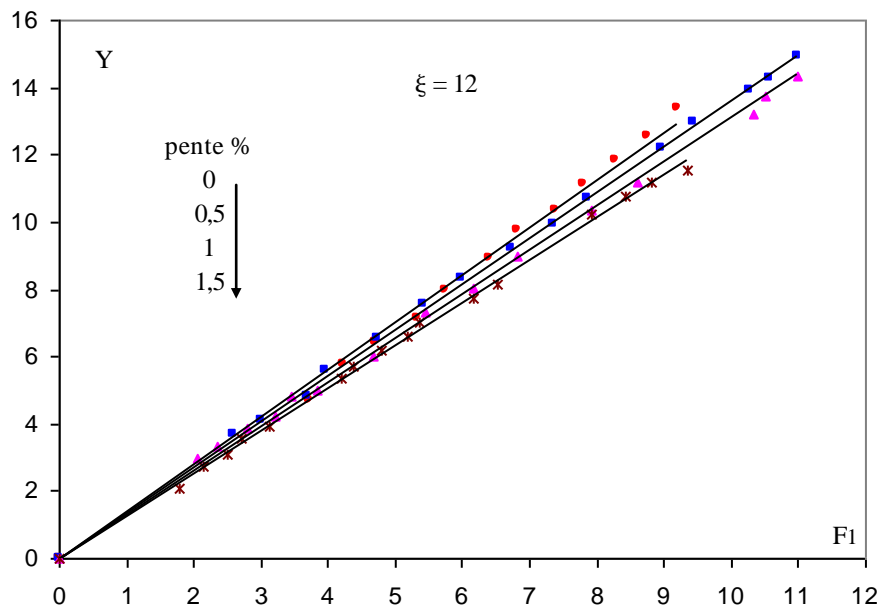


Figure 3.5 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour tang (α) $\tan\alpha = 0,00$ (\circ) ; $\tan\alpha = 0,005$ (\square) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

Tableau 3.1 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F1 avec la rugosité (0 mm)

| Rugosité 0 mm | | | | | | | |
|-----------------------|-------|---------------------------|-------|--------------------------|-------|---------------------------|-------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F1 | Y | F1 | Y | F1 | Y | F1 | Y |
| 5,74 | 7,65 | 3,70 | 4,90 | 4,30 | 5,60 | 7,25 | 9,25 |
| 6,39 | 8,35 | 4,45 | 5,80 | 5,11 | 6,65 | 7,82 | 10,10 |
| 6,83 | 9,30 | 6,88 | 9,05 | 6,42 | 8,35 | 3,12 | 3,95 |
| 7,40 | 9,80 | 8,60 | 11,55 | 7,21 | 9,35 | 4,11 | 5,20 |
| 7,81 | 10,35 | 9,35 | 12,40 | 7,72 | 10,10 | 4,44 | 5,65 |
| 8,28 | 11,10 | 9,70 | 12,90 | 8,37 | 11,05 | 4,82 | 6,25 |
| 8,76 | 11,85 | 10,44 | 13,80 | 9,57 | 12,60 | 5,85 | 7,43 |
| 9,19 | 12,40 | 10,87 | 14,35 | 10,44 | 13,75 | 2,07 | 2,60 |
| 9,69 | 13,40 | 11,38 | 15,15 | 11,04 | 14,25 | 2,42 | 3,06 |
| 9,94 | 13,80 | 2,56 | 3,40 | 3,86 | 5,17 | 2,80 | 3,50 |
| 10,58 | 14,15 | 4,91 | 6,67 | 2,36 | 3,10 | 3,90 | 5,06 |
| 10,75 | 14,85 | 6,30 | 8,47 | 2,73 | 3,48 | 5,18 | 6,70 |
| 11,09 | 15,5 | 7,78 | 10,40 | 3,14 | 4,05 | | |
| | | 2,10 | 2,85 | 3,53 | 4,63 | | |
| | | 2,83 | 3,88 | 4,88 | 6,50 | | |
| | | 3,06 | 4,25 | 5,64 | 7,50 | | |
| | | | | 6,07 | 8,00 | | |

Tableau 3.2 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F1 avec la rugosité (6 mm).

| Rugosité 6 mm | | | | | | | |
|-----------------------|-------|---------------------------|-------|--------------------------|------|---------------------------|------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F1 | Y | F1 | Y | F1 | Y | F1 | Y |
| 3,72 | 5,00 | 6,29 | 8,35 | 3,3 | 4,1 | 4,50 | 5,70 |
| 4,23 | 5,70 | 8,75 | 11,55 | 3,70 | 4,73 | 5,95 | 7,68 |
| 4,72 | 6,45 | 10,17 | 13,50 | 4,13 | 5,23 | 6,25 | 8,10 |
| 5,33 | 7,15 | 10,80 | 14,35 | 4,52 | 5,83 | 2,27 | 2,96 |
| 5,74 | 7,80 | 11,39 | 15,15 | 4,92 | 6,37 | 2,69 | 3,36 |
| 6,39 | 8,70 | 5,43 | 7,23 | 5,70 | 7,47 | 3,00 | 3,72 |
| 6,83 | 9,30 | 6,81 | 8,87 | 6,00 | 7,87 | 3,20 | 4,10 |
| 7,40 | 10,15 | 3,10 | 3,88 | 6,53 | 8,53 | 3,51 | 4,48 |
| 7,81 | 10,70 | 4,80 | 6,21 | 7,13 | 9,30 | 3,85 | 4,88 |
| 8,28 | 11,40 | 5,20 | 6,74 | 7,60 | 9,88 | 4,12 | 5,26 |
| 8,76 | 11,75 | 2,69 | 3,23 | 2,68 | 3,33 | 4,76 | 6,12 |
| 9,19 | 12,20 | 3,50 | 4,46 | 3,00 | 3,80 | 5,20 | 6,68 |
| 9,69 | 13,15 | 3,90 | 4,95 | | | 7,60 | 9,48 |
| 9,94 | 13,65 | 4,20 | 5,42 | | | | |
| 10,58 | 14,20 | | | | | | |

Tableau 3.3 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Yen fonction de F_1 avec la rugosité (8 mm).

| Rugosité 8 mm | | | | | | | |
|-----------------------|-------|---------------------------|-------|--------------------------|-------|---------------------------|------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F_1 | Y | F_1 | Y | F_1 | Y | F_1 | Y |
| 3,72 | 4,90 | 6,03 | 7,90 | 3,04 | 4,00 | 6,22 | 8,00 |
| 4,23 | 5,75 | 6,73 | 8,50 | 5,35 | 7,05 | 6,81 | 8,73 |
| 4,72 | 6,45 | 7,27 | 9,45 | 6,68 | 8,50 | 7,37 | 9,47 |
| 5,33 | 7,15 | 8,07 | 10,10 | 8,12 | 10,00 | 7,85 | 9,80 |
| 5,74 | 7,70 | 8,91 | 11,20 | 8,94 | 11,00 | 3,50 | 4,38 |
| 6,39 | 8,45 | 10,31 | 13,20 | 9,15 | 11,70 | 4,33 | 5,35 |
| 6,83 | 9,35 | 2,80 | 4,20 | 9,93 | 12,76 | 5,10 | 6,55 |
| 7,40 | 9,85 | 3,73 | 5,30 | 11,20 | 13,99 | 5,51 | 6,95 |
| 7,81 | 10,45 | 4,71 | 6,47 | 11,66 | 14,33 | 2,49 | 3,22 |
| 8,28 | 11,10 | 5,13 | 7,10 | 2,57 | 3,03 | 2,75 | 3,48 |
| 8,76 | 11,80 | 5,72 | 7,57 | 3,60 | 4,80 | 2,93 | 3,82 |
| 9,19 | 12,40 | 6,22 | 8,20 | 4,06 | 5,40 | 3,25 | 4,16 |
| 9,69 | 12,90 | 6,49 | 8,67 | 4,49 | 6,00 | 3,90 | 4,98 |
| 9,94 | 13,70 | 7,21 | 9,43 | 5,96 | 8,00 | 4,77 | 5,78 |
| 10,58 | 14,40 | 7,45 | 9,83 | 7,48 | 9,70 | 5,27 | 6,26 |
| | | 7,70 | 10,27 | 8,36 | 10,77 | | |
| | | 2,29 | 3,45 | 1,93 | 2,75 | | |
| | | 2,72 | 3,85 | 4,91 | 6,50 | | |
| | | 3,01 | 4,38 | 5,70 | 7,60 | | |
| | | 3,43 | 4,90 | | | | |
| | | 3,77 | 5,30 | | | | |
| | | 4,14 | 5,68 | | | | |

Tableau 3.4 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Yen fonction de F_1 avec la rugosité (10 mm)

| Rugosité 10mm | | | | | | | |
|-----------------------|-------|---------------------------|-------|--------------------------|-------|---------------------------|-------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F_1 | Y | F_1 | Y | F_1 | Y | F_1 | Y |
| 4,23 | 5,90 | 6,72 | 9,10 | 6,61 | 8,50 | 5,45 | 6,85 |
| 4,72 | 6,65 | 7,00 | 9,50 | 6,98 | 9,50 | 6,48 | 8,25 |
| 5,33 | 7,30 | 7,55 | 10,10 | 7,70 | 10,13 | 8,38 | 10,80 |
| 5,74 | 8,05 | 8,07 | 10,87 | 3,19 | 4,15 | 8,88 | 11,45 |
| 6,39 | 8,75 | 8,40 | 11,23 | 3,55 | 4,50 | 9,40 | 12,20 |
| 6,86 | 9,70 | 8,60 | 11,47 | 3,90 | 4,95 | 10,20 | 13,20 |
| 7,40 | 10,25 | 2,64 | 3,38 | 5,03 | 6,48 | 10,80 | 13,80 |
| 7,95 | 11,15 | 2,89 | 3,61 | 5,35 | 6,93 | 11,80 | 14,59 |
| 8,50 | 11,80 | 4,70 | 6,20 | 5,61 | 7,18 | 4,27 | 5,27 |
| 9,10 | 12,70 | 5,10 | 6,75 | 5,81 | 7,50 | 5,99 | 7,80 |
| 9,45 | 13,20 | 5,65 | 7,43 | 6,33 | 8,18 | 7,68 | 9,90 |
| 9,69 | 13,40 | 5,91 | 7,83 | 2,78 | 3,58 | 3,68 | 4,70 |
| 10,20 | 14,30 | 5,09 | 6,75 | 4,25 | 5,42 | 4,74 | 6,00 |
| 10,58 | 14,80 | 5,41 | 7,10 | 4,55 | 5,92 | 2,55 | 3,04 |
| | | 5,65 | 7,43 | | | 2,80 | 3,50 |
| | | 5,90 | 7,83 | | | 3,08 | 3,84 |
| | | 6,20 | 8,28 | | | | |
| | | 3,40 | 4,40 | | | | |
| | | 4,12 | 5,28 | | | | |

Tableau3.5 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Yen fonction de F_1 avec la rugosité (12 mm).

| Rugosité 12mm | | | | | | | |
|-----------------------|-------|---------------------------|-------|-------------------------|-------|--------------------------|-------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) =0,01 | | tang (α) =0,015 | |
| F_1 | Y | F_1 | Y | F_1 | Y | F_1 | Y |
| 3,72 | 4,70 | 3,70 | 4,80 | 3,20 | 4,23 | 7,91 | 10,23 |
| 4,23 | 5,75 | 3,95 | 5,60 | 5,45 | 7,30 | 8,43 | 10,77 |
| 4,72 | 6,45 | 4,73 | 6,55 | 6,16 | 8,05 | 8,82 | 11,20 |
| 5,33 | 7,15 | 5,98 | 8,35 | 6,83 | 9,00 | 9,35 | 11,53 |
| 5,74 | 8,00 | 6,72 | 9,20 | 7,92 | 10,35 | 4,20 | 5,38 |
| 6,39 | 8,90 | 7,35 | 9,95 | 8,60 | 11,20 | 4,37 | 5,70 |
| 6,83 | 9,75 | 7,87 | 10,70 | 10,32 | 13,23 | 4,81 | 6,18 |
| 7,40 | 10,35 | 8,95 | 12,20 | 10,50 | 13,73 | 5,17 | 6,58 |
| 7,81 | 11,15 | 9,45 | 12,95 | 11,00 | 14,33 | 5,35 | 7,00 |
| 8,28 | 11,85 | 10,28 | 13,90 | 2,04 | 3,00 | 6,18 | 7,75 |
| 8,76 | 12,55 | 10,58 | 14,30 | 2,36 | 3,33 | 6,54 | 8,15 |
| 9,19 | 13,40 | 11,00 | 14,90 | 2,81 | 3,85 | 1,78 | 2,06 |
| | | 2,60 | 3,67 | 3,45 | 4,80 | 2,13 | 2,72 |
| | | 3,00 | 4,10 | 3,85 | 5,00 | 2,49 | 3,08 |
| | | 5,43 | 7,57 | 4,67 | 6,00 | 2,72 | 3,54 |
| | | | | | | 3,12 | 3,94 |

L'analyse des mesures expérimentales, montre que chaque nuage de points suit l'allure d'une courbe unique. Un ajustement par la méthode des moindres carrés linéaires montre que cette courbe est de la forme :

$$Y = aF_1$$

Les données expérimentales sont représentées au tableau (3.1) à (3.5). Les figures (3.1) à (3.5) montrent l'ajustement de la relation $Y = aF_1$ pour les quatre inclinaisons du canal rectangulaire.

Tableau 3.6 : Valeurs des paramètres a_1

| Rugosité 0 mm | | |
|-------------------|-------|--------|
| Tang (α) | a_1 | R^2 |
| 0,00 | 1,35 | 0,9964 |
| 0,005 | 1,33 | 0,9996 |
| 0,01 | 1,30 | 0,9995 |
| 0,015 | 1,28 | 0,9995 |

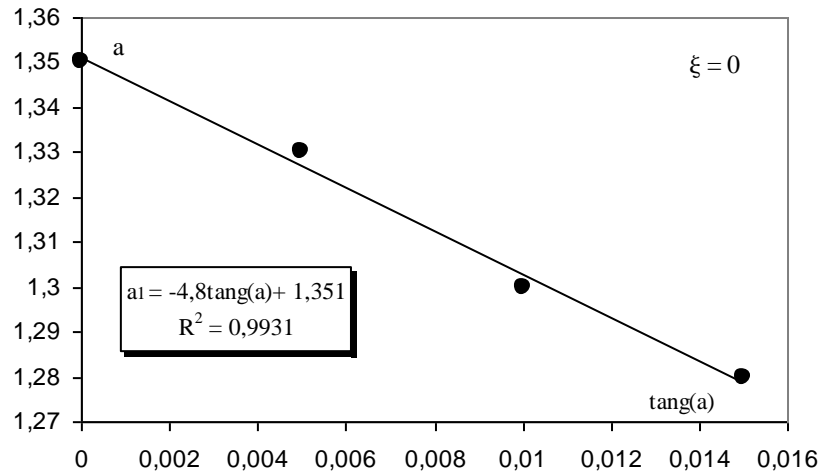


Figure 3.6 : Variation du paramètre a en fonction de $\text{tang}(a)$ dans la rugosité (0 mm).

Tableau 3.7 : Valeurs des paramètres a_2

| Rugosité 6 mm | | |
|---------------|-------|--------|
| Tang (a) | a_2 | R^2 |
| 0,00 | 1,35 | 0,999 |
| 0,005 | 1,31 | 0,9989 |
| 0,01 | 1,29 | 0,9989 |
| 0,015 | 1,27 | 0,9987 |

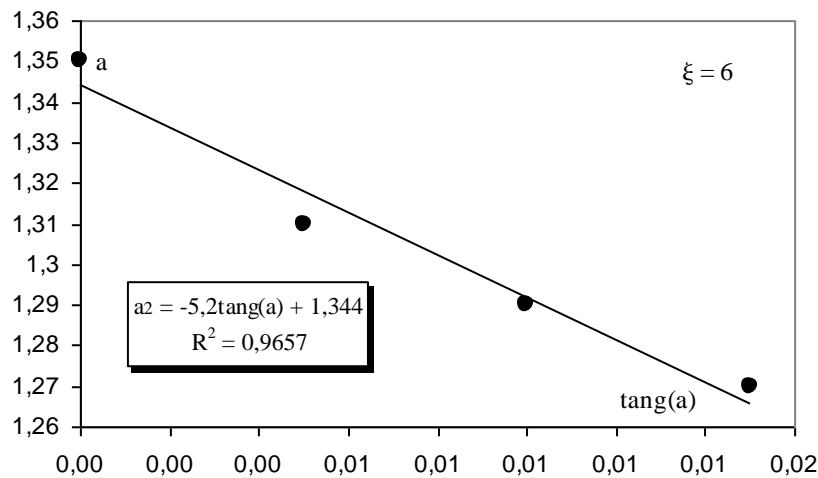


Figure 3.7 : Variation du paramètre a en fonction de $\text{tang}(a)$ dans la rugosité (6 mm).

Tableau 3.8 : Valeurs des paramètres a_3

| Rugosité 8 mm | | |
|---------------|-------|--------|
| Tang (a) | a_3 | R^2 |
| 0,00 | 1,33 | 0,9982 |
| 0,005 | 1,31 | 0,985 |
| 0,01 | 1,27 | 0,9861 |
| 0,015 | 1,26 | 0,9946 |

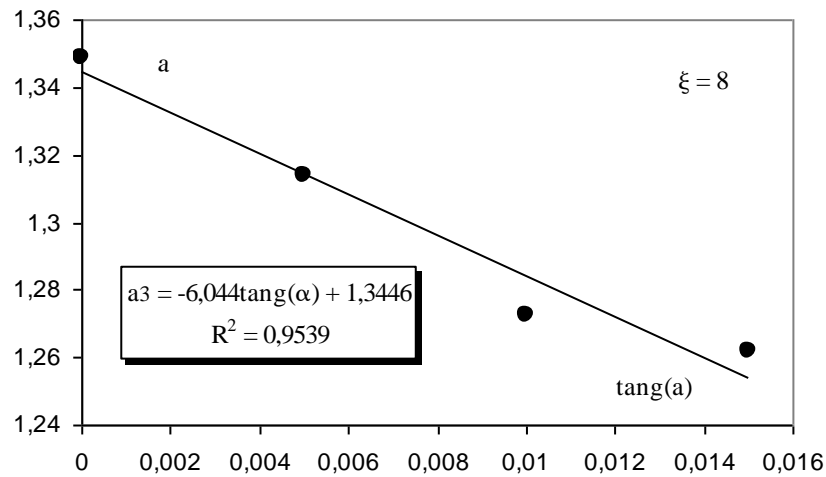


Figure 3.8 : Variation du paramètre a en fonction de tang (α) dans la rugosité (8 mm).

Tableau 3.9 : Valeurs des paramètres a4

| Rugosité 10 mm | | |
|----------------|------|----------------|
| Tang (a) | a4 | R ² |
| 0,00 | 1,39 | 0,9995 |
| 0,005 | 1,33 | 0,9985 |
| 0,01 | 1,30 | 0,9971 |
| 0,015 | 1,27 | 0,9984 |

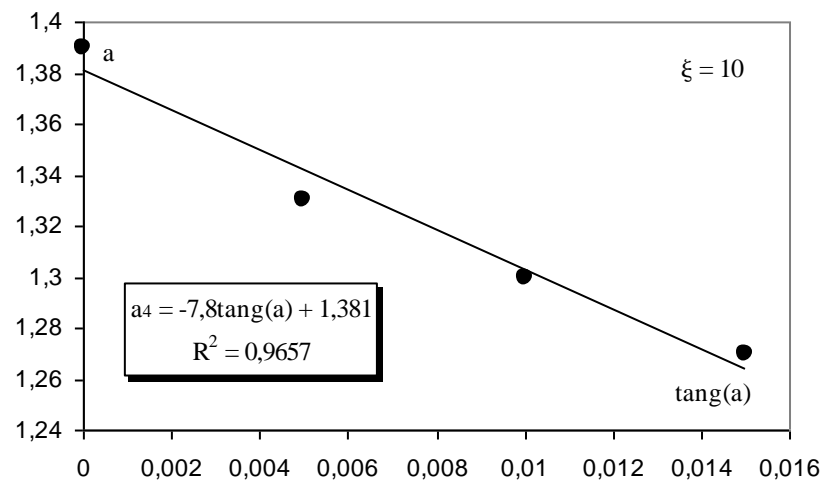


Figure 3.9 : Variation du paramètre a en fonction de tang (α) dans la rugosité (10 mm).

Tableau 3.10 : Valeurs des paramètres a5

| Rugosité 12 mm | | |
|----------------|------|----------------|
| Tang (a) | a5 | R ² |
| 0,00 | 1,41 | 0,9949 |
| 0,005 | 1,36 | 0,9991 |
| 0,01 | 1,30 | 0,9985 |
| 0,015 | 1,26 | 0,9984 |

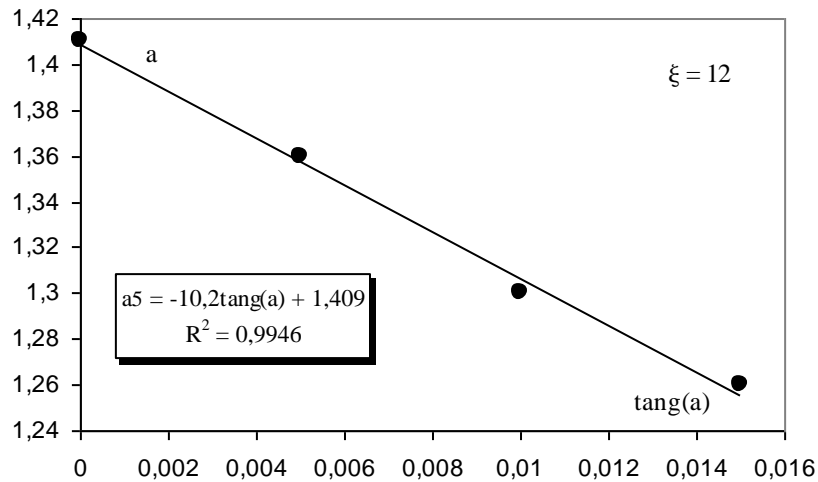


Figure 3.10 : Variation du paramètre a en fonction de $\tan(\alpha)$ dans la rugosité (12 mm).

La figure (3.6 à 3.10) montre clairement que la variation de a en fonction de la pente du canal $\tan(\alpha)$ suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

$$\begin{aligned}
 a_1 &= -4,8 \tan g(\alpha) + 1,351 & R^2 &= 0,9931 & ; \varepsilon &= (0) \\
 a_2 &= -5,2 \tan g(\alpha) + 1,3536 & R^2 &= 0,9657 & ; \varepsilon &= (6) \\
 a_3 &= -6,04 \tan g(\alpha) + 1,3346 & R^2 &= 0,9539 & ; \varepsilon &= (8) \\
 a_4 &= -7,8 \tan g(\alpha) + 1,381 & R^2 &= 0,9657 & ; \varepsilon &= (10) \\
 a_5 &= -10,20 \tan g(\alpha) + 1,409 & R^2 &= 0,9946 & ; \varepsilon &= (12)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Remplaçant les paramètres a par leurs expressions respectives dans la relation $Y = a F_1$, on

$$\begin{aligned}
 Y &= [-4,8 \tan g(\alpha) + 0,0135(\varepsilon) + 1,246] F_1 & ; \varepsilon &= (0) \\
 Y &= [-5,2 \tan g(\alpha) + 0,0135(\varepsilon) + 1,246] F_1 & ; \varepsilon &= (6) \\
 Y &= [-6,04 \tan g(\alpha) + 0,0135(\varepsilon) + 1,246] F_1 & ; \varepsilon &= (8) \\
 Y &= [-7,8 \tan g(\alpha) + 0,0135(\varepsilon) + 1,246] F_1 & ; \varepsilon &= (10) \\
 Y &= [-10,20 \tan g(\alpha) + 0,0135(\varepsilon) + 1,246] F_1 & ; \varepsilon &= (12)
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Le tableau représente les valeurs a et b du coefficient de rugosité avec l'angle d'inclinaison du canal.

Tableau 3.11 : Valeurs des paramètres a et b

| Tang (α) | 0 ; 0,005 ; 0,01 ; 0,015 | | |
|----------------------------|--------------------------|------|--------|
| Rugosité (ε) | a | b | R |
| 0 | -4,8 | 1,35 | 0,9931 |
| 6 | -5,2 | 1,33 | 0,9657 |
| 8 | -6,04 | 1,35 | 0,9539 |
| 10 | -7,8 | 1,38 | 0,9657 |
| 12 | -10,2 | 1,41 | 0,9646 |

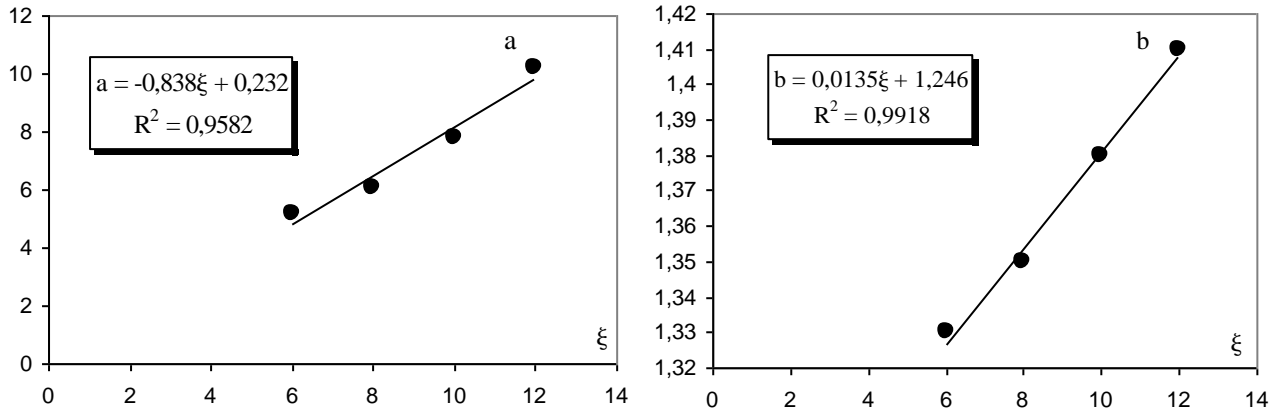


Figure 3.11 : Variation du paramètre 'a' et 'b' en fonction de Rugosité (ϵ)

$$a^* = -0.838(\epsilon) + 0.232 \quad R^2 = 0,9582 \quad (0; 6; 8 \ 10; 12) \quad (3.3)$$

$$b^* = -0.0135(\epsilon) + 1.246 \quad R^2 = 0,9918 \quad (0; 6; 8 \ 10; 12) \quad (3.4)$$

Il serait pratique de reformuler les cinq relations en une équation inclusive sous la forme approximative suivante :

$$Y^* = [(-0.838(\epsilon) + 0.232)\text{tang}(\alpha) + (0.0135(\epsilon) + 1.246)]F_1 \quad (3.5)$$

La relation approchée (3.5) étant implicite dans (Y), nous fournit un moyen simple et pratique pour la détermination du rapport (Y) des hauteurs conjuguées, connaissant le nombre de Froude incident F_1 et l'angle d'inclinaison α du canal et coefficient de rugosité absolue (ϵ). Cette relation s'applique pour des nombres de Froude (F_1) variant entre 2 et 14.

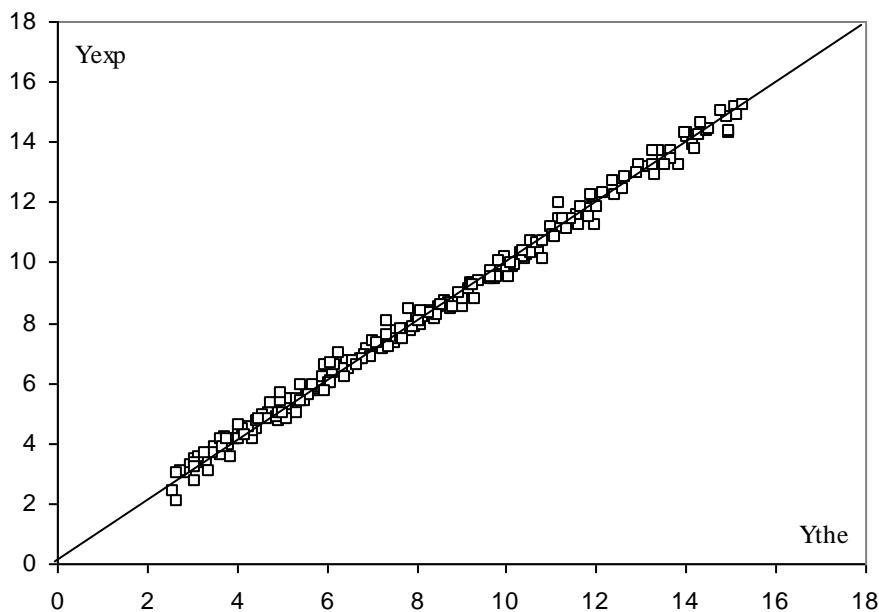


Figure 3.12 : Variation de rapport des hauteurs conjuguées expérimentales $F_1 \text{exp}$ en fonction Rapport des hauteurs conjuguées théorique Y_{th} calculée selon la relation (3.5).
(—) Première bissectrice d'équation : $Y_{exp} = Y_{the}$.

III.2.2.2. Longueurs caractéristiques du ressaut :**III.2.2.2.1. Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 :**

La longueur L_j a été considérée comme étant la distance séparant la section initiale du ressaut et la section finale (où s'effectue la mesure de h_2). L'objectif principal de cette partie de l'étude est de quantifier la longueur relative L_j/h_1 dans la gamme de valeurs testées de la pente du canal. La représentation de la relation $L_j/h_1 = f(F_1)$, a permis de montrer que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative L_j/h_1 du ressaut.

La figure (3.13) à (3.17) montre la variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

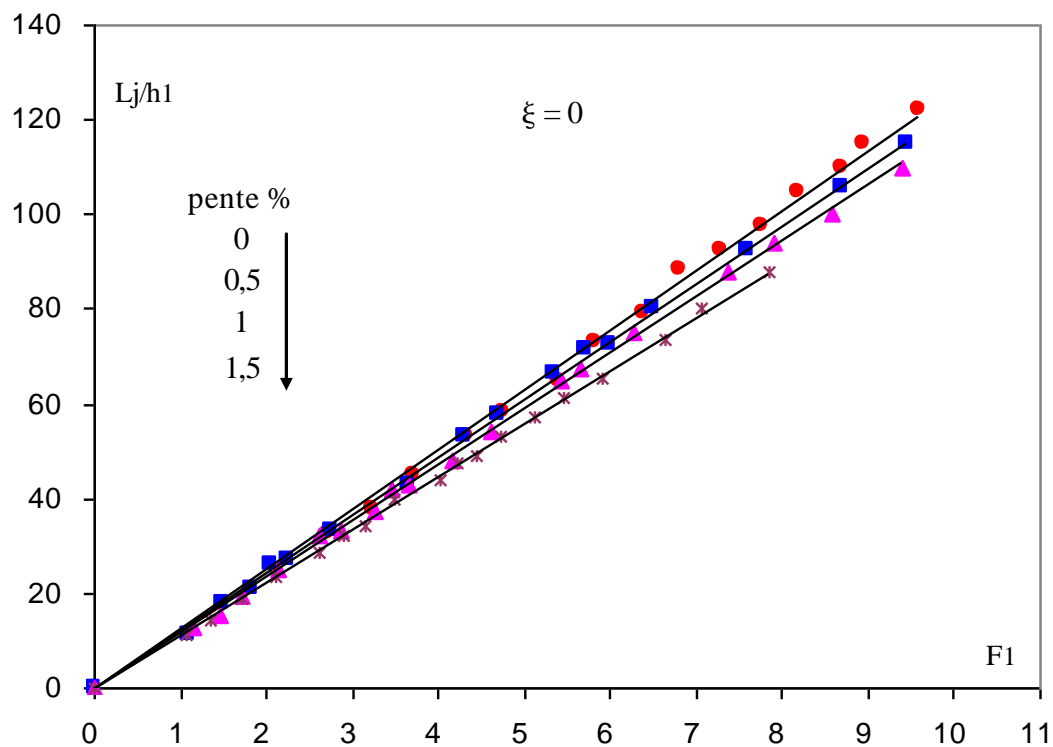


Figure 3.13 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ (\circ) ; $\text{tang } \alpha = 0,005$ (\square) ; $\text{tang } \alpha = 0,01$ (Δ) ; $\text{tang } \alpha = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.

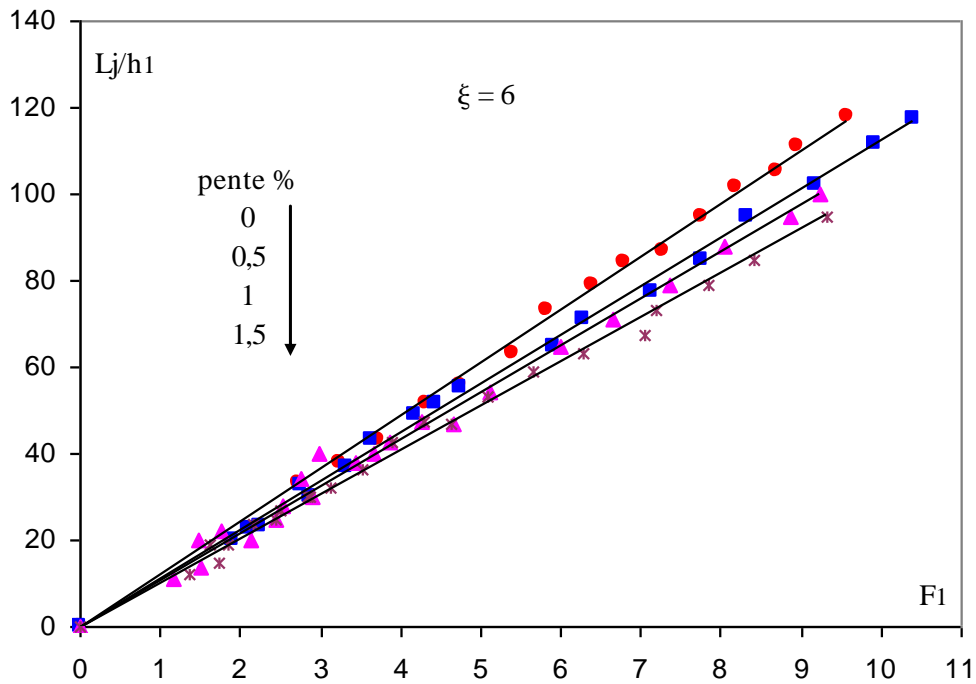


Figure 3.14 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ (\circ) ; $\text{tana} = 0,005$ (\square) ; $\text{tana} = 0,01$ (Δ) ; $\text{tana} = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

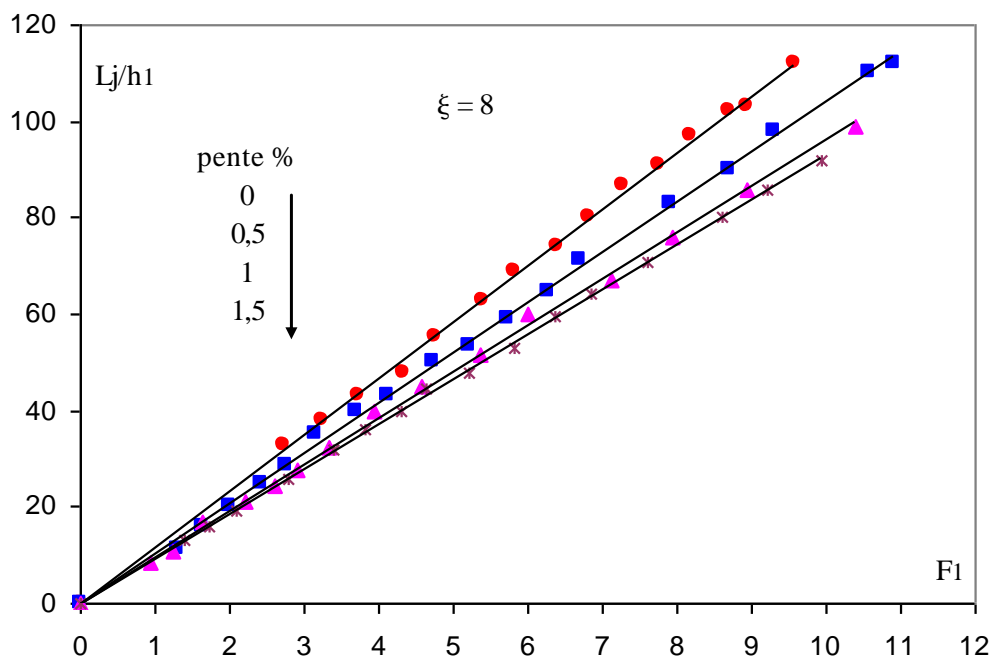


Figure 3.15 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ (\circ) ; $\text{tana} = 0,005$ (\square) ; $\text{tana} = 0,01$ (Δ) ; $\text{tana} = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

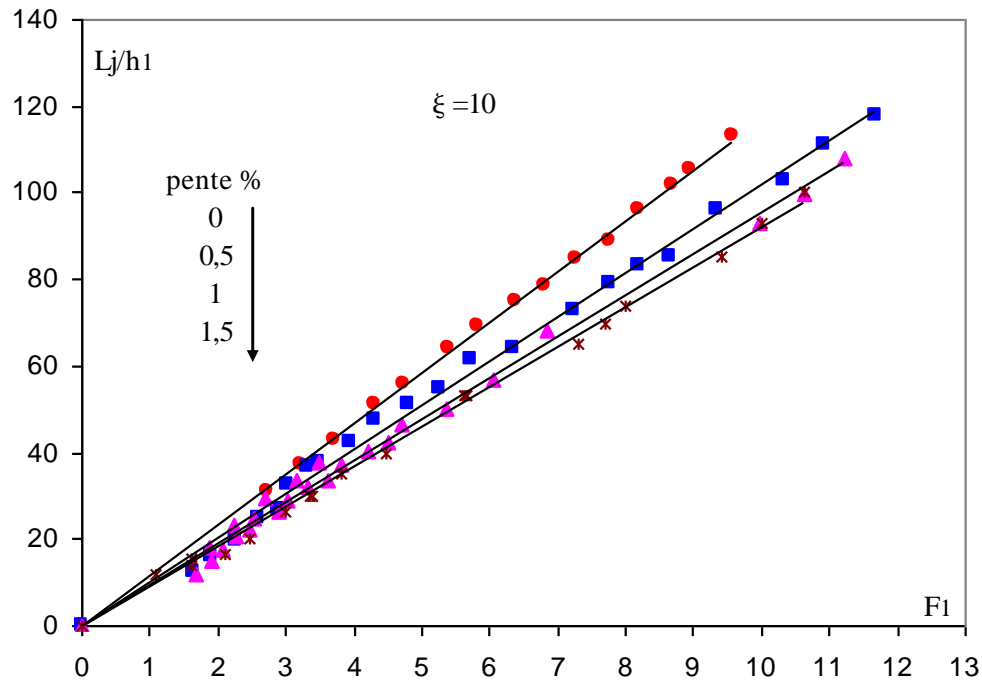


Figure 3.16 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ (\circ) ; $\text{tana} = 0,005$ (\square) ; $\text{tana} = 0,01$ (\triangle) ; $\text{tana} = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

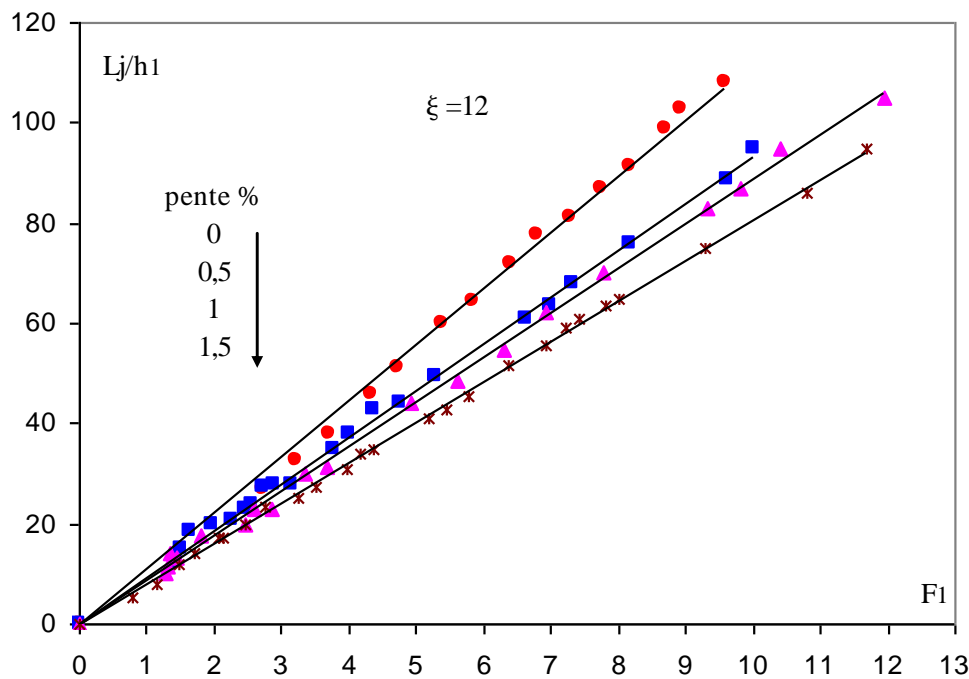


Figure 3.17 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{tang } (\alpha)$ $\text{Tana} = 0,00$ (\circ) ; $\text{tana} = 0,005$ (\square) ; $\text{tana} = 0,01$ (\triangle) ; $\text{tana} = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

Tableau 3.12 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 avec la rugosité (0 mm).

| Rugosité 0 mm | | | | | | | |
|-----------------------|--------|---------------------------|--------|--------------------------|--------|---------------------------|-------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F1 | Lj/h1 | F1 | Lj/h1 | F1 | Lj/h1 | F1 | Lj/h1 |
| 2,72 | 32,50 | 7,60 | 92,50 | 4,15 | 48,00 | 4,03 | 44,00 |
| 3,23 | 38,00 | 8,70 | 106,00 | 5,42 | 65,00 | 4,45 | 49,00 |
| 3,72 | 45,00 | 9,47 | 115,00 | 6,28 | 75,00 | 5,13 | 57,00 |
| 4,33 | 53,00 | 4,32 | 53,33 | 7,37 | 88,00 | 5,91 | 65,50 |
| 4,74 | 58,50 | 5,34 | 66,67 | 7,89 | 94,00 | 6,65 | 73,50 |
| 5,39 | 65,00 | 5,70 | 71,33 | 8,57 | 100,00 | 7,06 | 80,00 |
| 5,83 | 73,00 | 6,00 | 72,67 | 9,40 | 110,00 | 7,84 | 88,00 |
| 6,40 | 79,00 | 6,50 | 80,00 | 2,86 | 33,33 | 2,10 | 23,67 |
| 6,81 | 88,50 | 1,10 | 11,00 | 3,27 | 37,33 | 2,62 | 28,67 |
| 7,28 | 92,50 | 1,83 | 20,75 | 3,66 | 43,00 | 4,21 | 47,67 |
| 7,76 | 97,50 | 2,06 | 26,25 | 4,62 | 54,00 | 4,74 | 53,33 |
| 8,19 | 105,00 | 2,25 | 27,00 | 5,65 | 67,67 | 5,45 | 61,33 |
| 8,69 | 110,00 | 4,69 | 57,75 | 1,73 | 19,50 | 1,35 | 14,50 |
| 8,94 | 115,00 | 1,50 | 18,00 | 2,14 | 25,00 | 1,70 | 18,75 |
| 9,58 | 122,00 | 3,65 | 43,00 | 3,47 | 42,00 | 1,07 | 11,20 |
| | | 2,75 | 33,00 | 1,17 | 13,00 | 2,90 | 32,00 |
| | | | | 1,47 | 15,20 | 3,16 | 34,00 |
| | | | | 2,63 | 32,00 | 3,50 | 40,00 |

Tableau 3.13 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 avec la rugosité (6 mm).

| Rugosité 6mm | | | | | | | |
|-----------------------|--------|---------------------------|--------|--------------------------|--------|---------------------------|-------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F1 | Lj/h1 | F1 | Lj/h1 | F1 | Lj/h1 | F1 | Lj/h1 |
| 2,72 | 33,00 | 1,92 | 20,00 | 6,00 | 65,00 | 7,05 | 67,50 |
| 3,23 | 38,00 | 5,93 | 65,00 | 6,64 | 71,00 | 7,84 | 79,00 |
| 3,72 | 43,00 | 7,13 | 77,50 | 7,37 | 79,00 | 8,42 | 85,00 |
| 4,33 | 51,50 | 7,75 | 85,00 | 8,04 | 88,00 | 9,33 | 95,00 |
| 4,74 | 56,00 | 8,32 | 95,00 | 8,88 | 95,00 | 4,62 | 46,67 |
| 5,39 | 63,00 | 9,17 | 102,00 | 9,23 | 100,00 | 5,08 | 53,33 |
| 5,83 | 73,00 | 9,91 | 111,50 | 4,65 | 46,67 | 5,65 | 59,00 |
| 6,40 | 79,00 | 10,39 | 117,50 | 5,12 | 54,00 | 6,27 | 63,33 |
| 6,81 | 84,00 | 2,24 | 23,33 | 1,48 | 20,00 | 7,19 | 73,00 |
| 7,28 | 87,00 | 2,87 | 30,00 | 1,77 | 22,00 | 1,37 | 12,00 |
| 7,76 | 95,00 | 3,32 | 36,67 | 2,44 | 25,00 | 1,72 | 15,00 |
| 8,19 | 101,50 | 3,63 | 43,33 | 2,90 | 30,00 | 2,44 | 25,00 |
| 8,69 | 105,50 | 4,43 | 51,67 | 3,43 | 38,00 | 2,87 | 30,00 |
| 8,94 | 111,00 | 4,76 | 55,33 | 3,67 | 40,00 | 3,52 | 36,25 |
| 9,58 | 118,00 | 6,28 | 71,00 | 3,87 | 42,50 | 3,90 | 42,50 |
| | | 2,09 | 22,50 | 4,26 | 47,50 | 4,29 | 47,50 |
| | | 2,76 | 32,50 | 1,17 | 11,00 | 1,61 | 19,00 |
| | | 4,17 | 49,00 | 1,50 | 13,50 | 1,85 | 19,00 |
| | | | | 2,13 | 20,00 | 2,15 | 23,80 |
| | | | | 2,54 | 28,00 | 2,51 | 27,00 |
| | | | | 2,74 | 34,00 | 2,85 | 30,00 |
| | | | | 2,99 | 40,00 | 3,12 | 32,00 |

Tableau 3.14 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 avec la rugosité (8mm).

| Rugosité 8mm | | | | | | | |
|-----------------------|-----------|---------------------------|-----------|--------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 |
| 2,72 | 33,00 | 5,73 | 59,00 | 7,12 | 67,00 | 7,61 | 71,00 |
| 3,23 | 38,00 | 6,27 | 64,50 | 7,94 | 76,00 | 8,59 | 80,00 |
| 3,72 | 43,00 | 7,91 | 83,00 | 8,93 | 86,00 | 9,22 | 86,00 |
| 4,33 | 48,00 | 8,70 | 90,00 | 10,40 | 99,00 | 9,94 | 92,00 |
| 4,74 | 55,50 | 9,31 | 98,00 | 2,20 | 21,00 | 1,74 | 16,00 |
| 5,39 | 63,00 | 10,57 | 110,00 | 2,60 | 24,33 | 2,09 | 19,33 |
| 5,83 | 69,00 | 10,92 | 112,00 | 3,94 | 39,67 | 3,40 | 32,00 |
| 6,40 | 74,00 | 3,71 | 39,67 | 4,56 | 45,00 | 3,81 | 36,00 |
| 6,81 | 80,00 | 4,13 | 43,33 | 5,37 | 51,67 | 4,31 | 39,67 |
| 7,28 | 86,50 | 4,72 | 50,00 | 6,00 | 60,00 | 4,65 | 44,33 |
| 7,76 | 91,00 | 5,22 | 53,33 | 0,93 | 8,25 | 5,22 | 47,67 |
| 8,19 | 97,00 | 6,70 | 71,33 | 1,23 | 11,00 | 5,81 | 53,00 |
| 8,69 | 102,00 | 1,29 | 11,25 | 1,64 | 16,75 | 6,37 | 59,33 |
| 8,94 | 103,00 | 2,01 | 20,00 | 2,90 | 27,50 | 6,85 | 64,33 |
| 9,58 | 112,00 | 2,43 | 25,00 | 3,33 | 32,50 | 1,38 | 13,00 |
| | | 2,77 | 28,75 | | | 2,78 | 26,00 |

Tableau 3.15 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 avec la rugosité (10mm).

| Rugosité 10mm | | | | | | | |
|-----------------------|-----------|---------------------------|-----------|--------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 |
| 2,72 | 31,00 | 6,35 | 64,00 | 9,97 | 93,00 | 1,63 | 14,00 |
| 3,23 | 37,00 | 7,23 | 73,00 | 10,62 | 99,50 | 2,45 | 20,00 |
| 3,72 | 43,00 | 7,77 | 79,00 | 11,21 | 108,00 | 3,41 | 30,00 |
| 4,33 | 51,00 | 8,21 | 83,00 | 1,90 | 15,00 | 4,49 | 40,00 |
| 4,74 | 56,00 | 8,64 | 85,00 | 2,47 | 22,00 | 5,66 | 53,00 |
| 5,39 | 64,00 | 9,35 | 96,00 | 3,63 | 33,33 | 7,30 | 65,00 |
| 5,83 | 69,00 | 10,33 | 103,00 | 4,51 | 42,33 | 7,71 | 70,00 |
| 6,40 | 75,00 | 10,94 | 111,00 | 4,70 | 46,67 | 7,99 | 74,00 |
| 6,81 | 78,50 | 11,69 | 118,00 | 5,37 | 50,00 | 9,42 | 85,00 |
| 7,28 | 84,50 | 2,90 | 26,67 | 6,05 | 57,00 | 10,01 | 93,00 |
| 7,76 | 89,00 | 3,32 | 36,67 | 6,85 | 68,00 | 10,61 | 100,00 |
| 8,19 | 96,00 | 5,72 | 61,67 | 1,66 | 12,00 | 1,08 | 12,00 |
| 8,69 | 102,00 | 1,64 | 12,50 | 2,08 | 17,50 | 1,61 | 15,33 |
| 8,94 | 105,50 | 1,91 | 16,00 | 2,24 | 23,50 | 2,12 | 16,67 |
| 9,58 | 113,00 | 2,28 | 19,50 | 2,90 | 26,50 | 3,01 | 26,33 |
| | | 2,61 | 25,00 | 3,16 | 33,50 | 3,37 | 30,00 |
| | | 3,03 | 32,50 | 3,48 | 37,50 | 3,82 | 35,00 |
| | | 3,49 | 37,50 | 3,82 | 37,00 | 5,61 | 53,33 |
| | | 3,96 | 42,50 | 4,21 | 40,25 | | |
| | | 4,32 | 47,50 | 1,89 | 18,00 | | |
| | | 4,82 | 51,00 | 2,28 | 20,80 | | |
| | | 5,25 | 55,00 | 2,53 | 24,60 | | |
| | | | | 2,69 | 29,60 | | |
| | | | | 3,03 | 29,00 | | |
| | | | | 3,32 | 31,80 | | |

Tableau 3.16 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 avec la rugosité (12mm).

| Rugosité 12mm | | | | | | | |
|-----------------------|-----------|---------------------------|-----------|--------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 | F_1 | L_j/h_1 |
| 2,72 | 27,00 | 10,00 | 95,00 | 6,92 | 62,00 | 2,08 | 17,00 |
| 3,23 | 32,50 | 1,51 | 15,00 | 7,79 | 70,00 | 3,99 | 31,00 |
| 3,72 | 38,00 | 1,65 | 18,33 | 9,32 | 83,00 | 5,77 | 45,50 |
| 4,33 | 46,00 | 2,48 | 23,00 | 9,83 | 87,00 | 7,22 | 59,00 |
| 4,74 | 51,00 | 2,72 | 27,33 | 10,42 | 95,00 | 8,01 | 65,00 |
| 5,39 | 60,00 | 4,35 | 43,00 | 11,93 | 105,00 | 9,29 | 75,00 |
| 5,83 | 64,50 | 6,64 | 60,67 | 1,36 | 14,00 | 10,79 | 86,00 |
| 6,40 | 72,00 | 6,99 | 63,33 | 1,81 | 17,67 | 11,68 | 95,00 |
| 6,81 | 77,50 | 7,31 | 68,00 | 2,45 | 20,00 | 2,47 | 20,00 |
| 7,28 | 81,00 | 8,16 | 76,00 | 2,85 | 23,00 | 3,24 | 25,33 |
| 7,76 | 87,00 | 9,61 | 88,67 | 3,67 | 31,33 | 3,51 | 27,33 |
| 8,19 | 91,50 | 2,28 | 20,75 | 5,62 | 48,67 | 5,46 | 43,00 |
| 8,69 | 99,00 | 4,77 | 44,25 | 6,29 | 54,67 | 6,36 | 51,67 |
| 8,94 | 103,00 | 5,28 | 49,25 | 1,33 | 11,50 | 6,91 | 55,67 |
| | | | | | | 7,43 | 60,67 |

Selon les figures (3.13) à (3.17), l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire de la forme : $L_j/h_1 = a F_1$.

Le tableau (3.17) à (3.21), représente le paramètre 'a' pour les quatre valeurs de pentes considérées.

Tableau 3.17 : Valeurs des paramètres a1

| Rugosité 0 mm | | |
|-------------------|-------|--------|
| Tang (α) | a | R^2 |
| 0,00 | 12,62 | 0,9811 |
| 0,005 | 12,21 | 0,9872 |
| 0,01 | 11,79 | 0,9990 |
| 0,015 | 11,16 | 0,9992 |

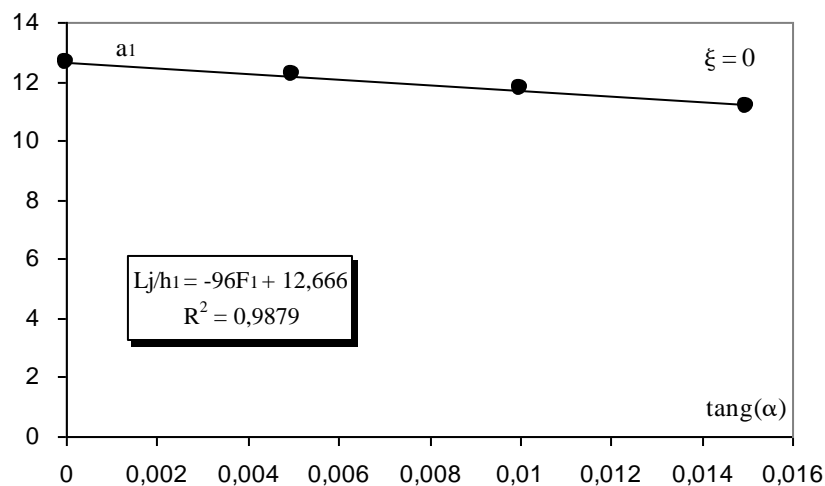
**Figure 3.18 :** Variation du paramètre 'a' en fonction de $\tan(\alpha)$.

Tableau 3.18 : Valeurs des paramètres a2

| Rugosité 6mm | | |
|-------------------|--------|--------|
| Tang (α) | a | R^2 |
| 0,00 | 12,209 | 0,9977 |
| 0,005 | 11,225 | 0,9976 |
| 0,01 | 10,827 | 0,9913 |
| 0,015 | 10,196 | 0,995 |

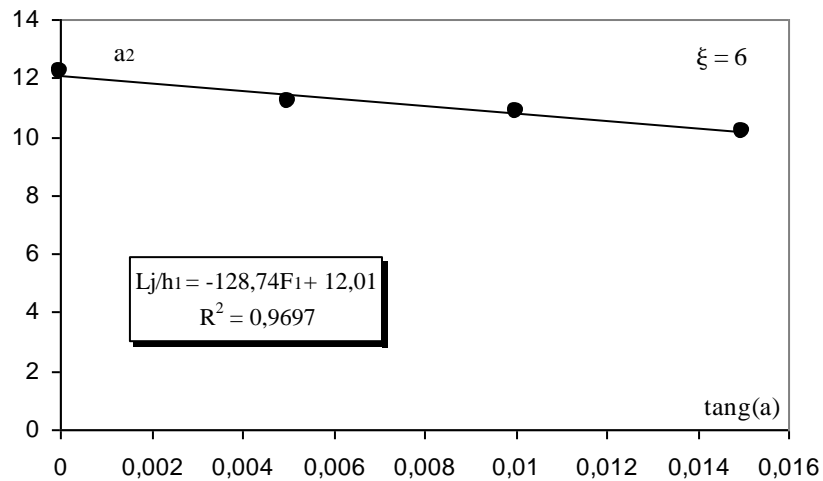


Figure 3.19 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α).

Tableau 3.19 : Valeurs des paramètres a3

| Rugosité 8mm | | |
|-------------------|--------|--------|
| Tang (α) | a | R^2 |
| 0,00 | 11,701 | 0,9989 |
| 0,005 | 10,408 | 0,9989 |
| 0,01 | 9,6221 | 0,9988 |
| 0,015 | 9,3034 | 0,9996 |

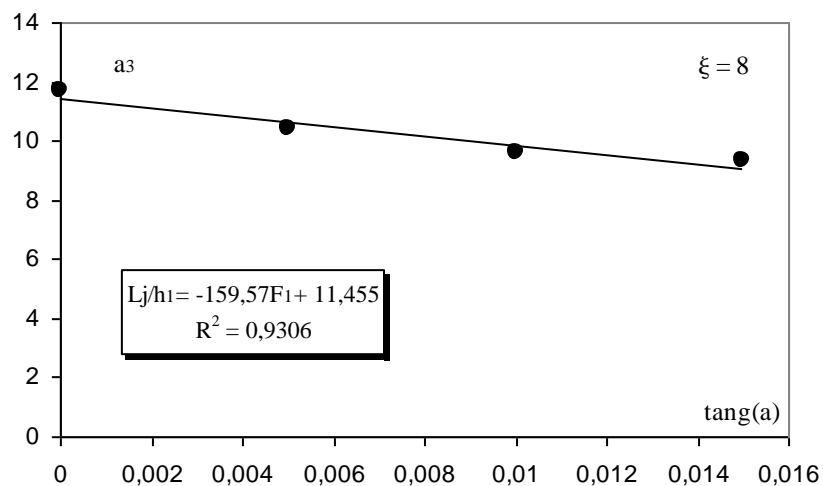


Figure 3.20 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α).

Tableau 3.20 : Valeurs des paramètres a4

| Rugosité 10mm | | |
|-------------------|--------|--------|
| Tang (α) | a | R^2 |
| 0,00 | 11,7 | 0,9993 |
| 0,005 | 10,157 | 0,9951 |
| 0,01 | 9,536 | 0,994 |
| 0,015 | 9,1774 | 0,9972 |

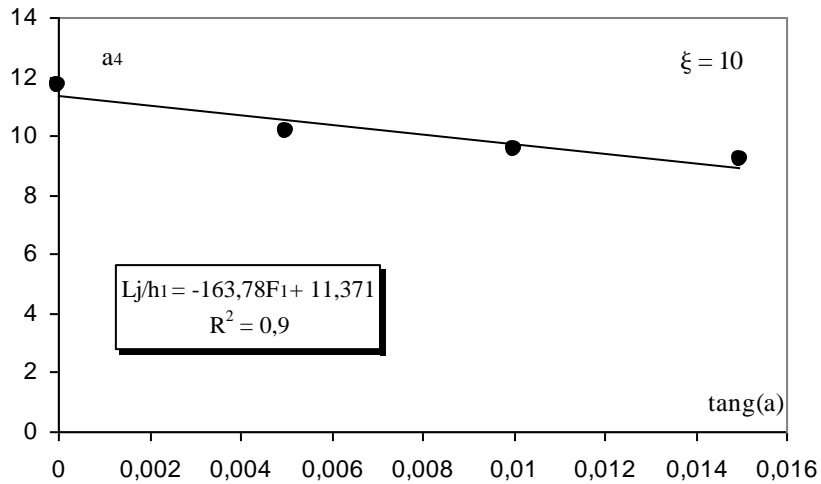


Figure 3.21 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α).

Tableau 3.21 : Valeurs des paramètres as

| Rugosité 12mm | | |
|-------------------|--------|--------|
| Tang (α) | a | R^2 |
| 0,00 | 11,185 | 0,9955 |
| 0,005 | 9,3351 | 0,9974 |
| 0,01 | 8,8793 | 0,9984 |
| 0,015 | 8,0572 | 0,9992 |

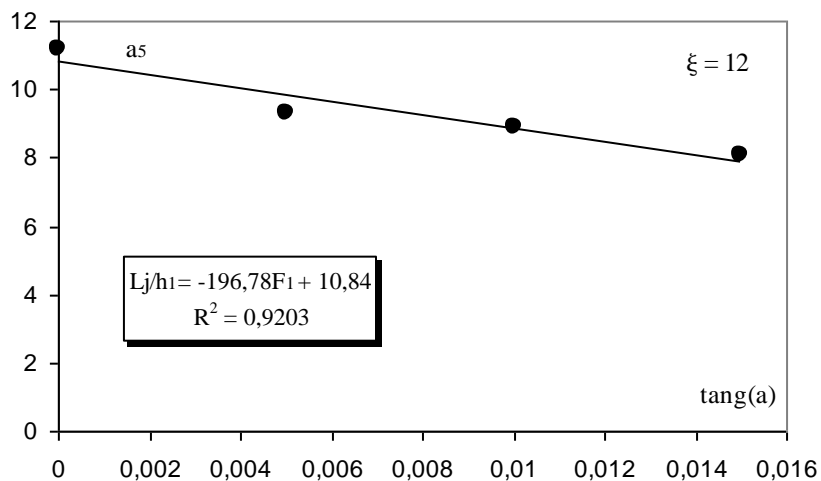


Figure 3.22 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α).

La figure (3.18) à (3.22) montre clairement que la variation de a en fonction de la pente du canal $\tan(\alpha)$ suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

$$\begin{aligned}
 a_1 &= -96F_1 + 12,666 & R^2 &= 0,9879 & ; \varepsilon &= (0) \\
 a_2 &= -128,7F_1 + 12,01 & R^2 &= 0,9677 & ; \varepsilon &= (6) \\
 a_3 &= -159,57F_1 + 11,45 & R^2 &= 0,9306 & ; \varepsilon &= (8) \\
 a_4 &= -163,78F_1 + 11,37 & R^2 &= 0,90 & ; \varepsilon &= (10) \\
 a_5 &= -196,78F_1 + 10,84 & R^2 &= 0,9203 & ; \varepsilon &= (12)
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Remplaçant les paramètres a par leurs expressions respectives dans la relation $L_j = a F_1$, on

$$\begin{aligned}
 L_j/h_1 &= [-96\tan(\alpha) - 0,1478(\varepsilon) + 12,73]F_1 & ; \varepsilon &= (0) \\
 L_j/h_1 &= [-128,7\tan(\alpha) - 0,1478(\varepsilon) + 12,73]F_1 & ; \varepsilon &= (6) \\
 L_j/h_1 &= [-159,57\tan(\alpha) - 0,1478(\varepsilon) + 12,73]F_1 & ; \varepsilon &= (8) \\
 L_j/h_1 &= [-163,78\tan(\alpha) - 0,1478(\varepsilon) + 12,73]F_1 & ; \varepsilon &= (10) \\
 L_j/h_1 &= [-196,78\tan(\alpha) - 0,1478(\varepsilon) + 12,73]F_1 & ; \varepsilon &= (12)
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Le tableau représente les valeurs a et b du coefficient de rugosité avec l'angle d'inclinaison du canal

Tableau 3.22 : Valeurs des paramètres a et b

| Tang (α) | 0 ; 0,005 ; 0,01 ; 0,015 | | |
|----------------------------|--------------------------|--------|--------|
| Rugosité (ε) | a | b | R |
| 0 | -96 | 12,666 | 0,9879 |
| 6 | -128,7 | 12,01 | 0,9697 |
| 8 | -159,57 | 11,45 | 0,9306 |
| 10 | -163,78 | 11,37 | 0,9000 |
| 12 | -196,78 | 10,84 | 0,9203 |

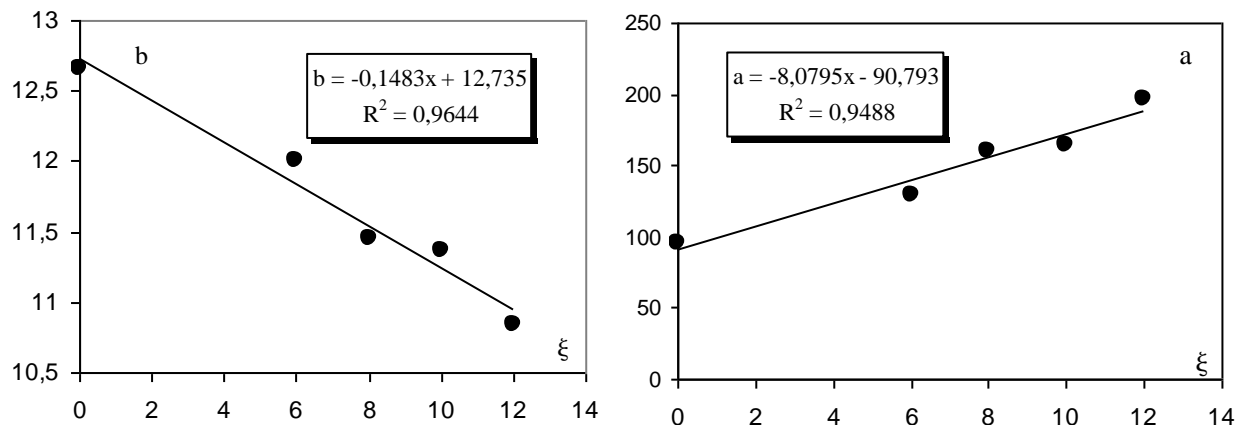


Figure 3.23 : Variation du paramètre 'a' et 'b' en fonction de Rugosité (ε)

La figure (3.23) montre clairement que la variation de a et b en fonction de la Rugosité (ε) suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

$$a^* = -8,0795(\varepsilon) - 90,793 \quad R^2 = 0,9488 \quad \varepsilon = (0; 6; 8; 10; 12) \quad (3.8)$$

$$b^* = -0,1478(\varepsilon) + 12,73 \quad R^2 = 0,9637 \quad \varepsilon = (0; 6; 8; 10; 12) \quad (3.9)$$

Il serait pratique de reformuler les cinq relations en une équation inclusive sous la forme

Approximative suivante :

$$Lj/h_1^* = [(-8,0795(\varepsilon) - 90,793)\text{tang}(\alpha) - (0,1478(\varepsilon) - 12,73)]F_1 \quad (3.10)$$

La figure (3.24) montre que la relation (3.10) ajuste avec une bonne Corrélation pour des points de mesures expérimentales obtenues et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice et justifient la fiabilité de l'approche obtenue.

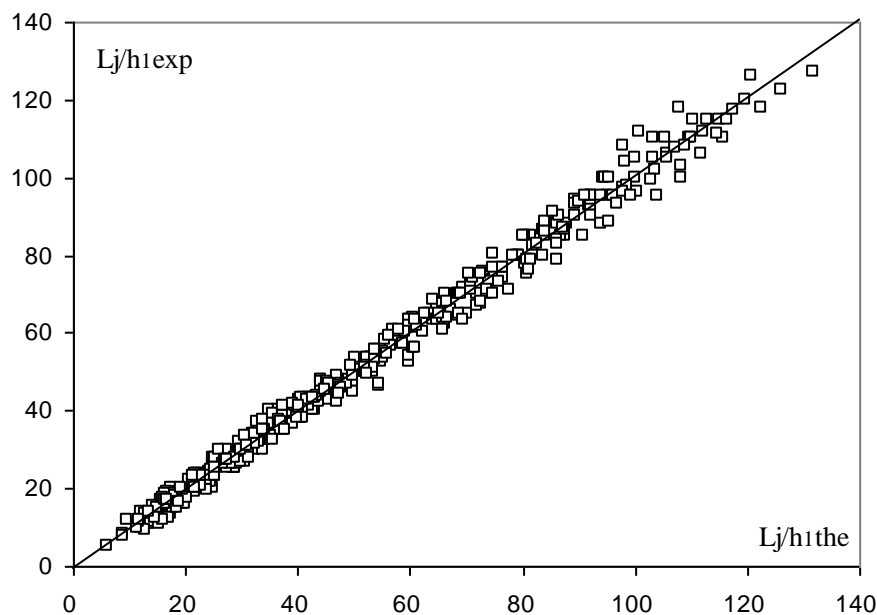


Figure 3.24 : Variation de la relation $f(F_1, \alpha)$ en fonction de la hauteur relative Lj/h_1 du seuil. (\square) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $f(F_1, \alpha) = Lj/h_1$.

III.2.2.2.2. Variation de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 :

Les figures de (3.25) à (3.29) montrent la représentation graphique de la variation de hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 , pour quatre angles d'inclinaison α distincts, tels que : $\text{tang}(\alpha) = 0,00; 0,005; 0,01; 0,015$, avec de valeurs de rugosités absolues : (ε mm) = 0 ; $\varepsilon = 06$; $\varepsilon = 08$; $\varepsilon = 10$, et $\varepsilon = 12$

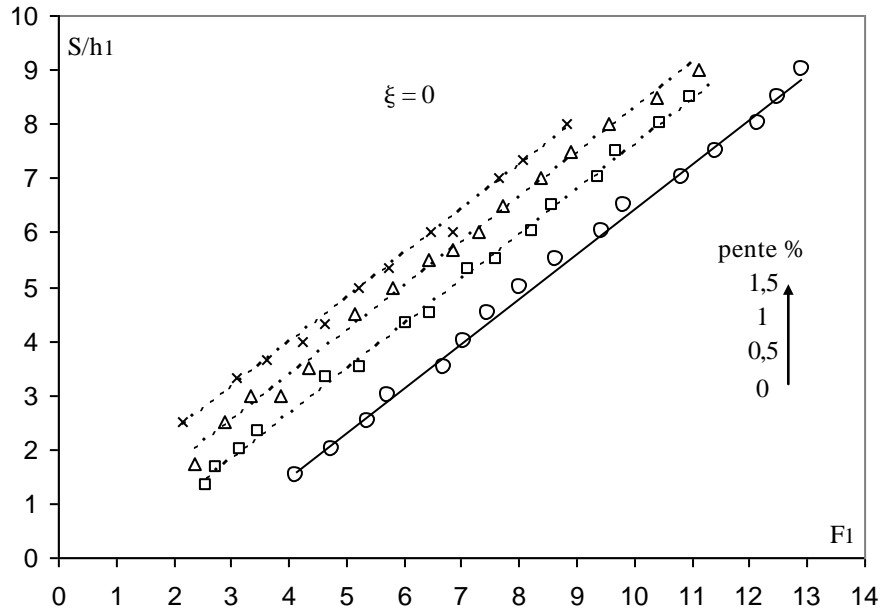


Figure 3.25 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ (○) ; $\text{tana} = 0,005$ (□) ; $\text{tana} = 0,01$ (Δ) ; $\text{tana} = -0,015$ (×) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

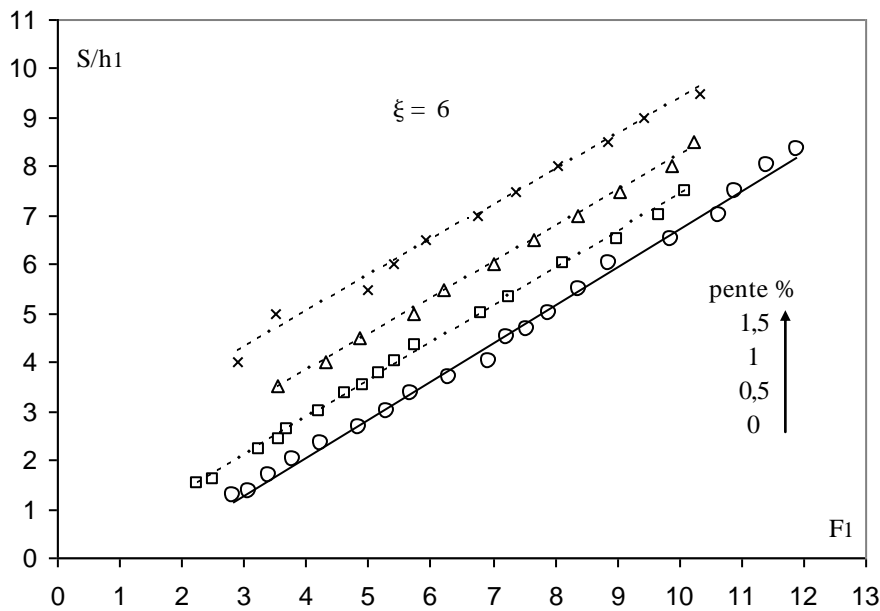


Figure 3.26 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ (○) ; $\text{tana} = 0,005$ (□) ; $\text{tana} = 0,01$ (Δ) ; $\text{tana} = -0,015$ (×) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

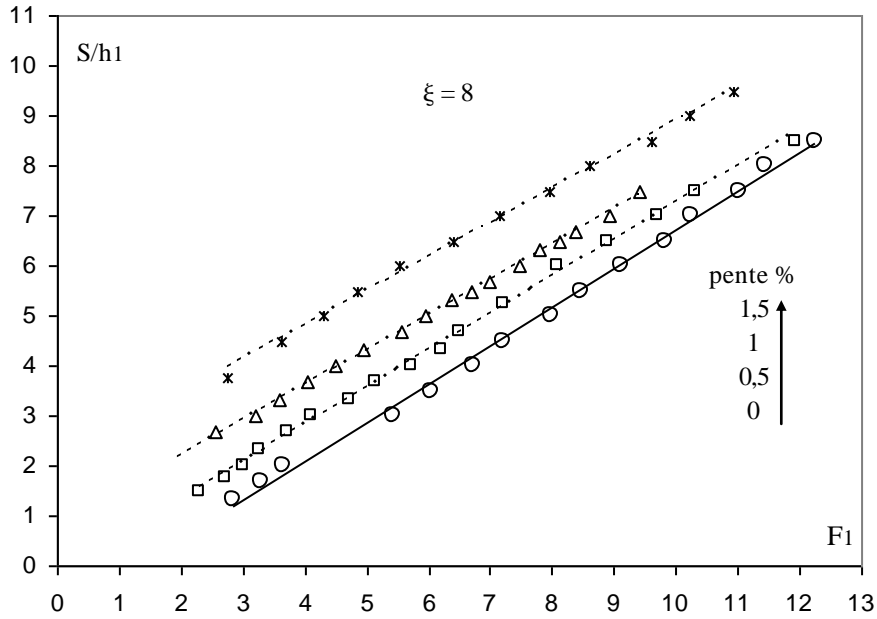


Figure 3.27 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $Tang \alpha = 0,00$ (\circ) ; $tana = 0,005$ (\square) ; $tana = 0,01$ (Δ) ; $tana = -0,015$ (\times) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

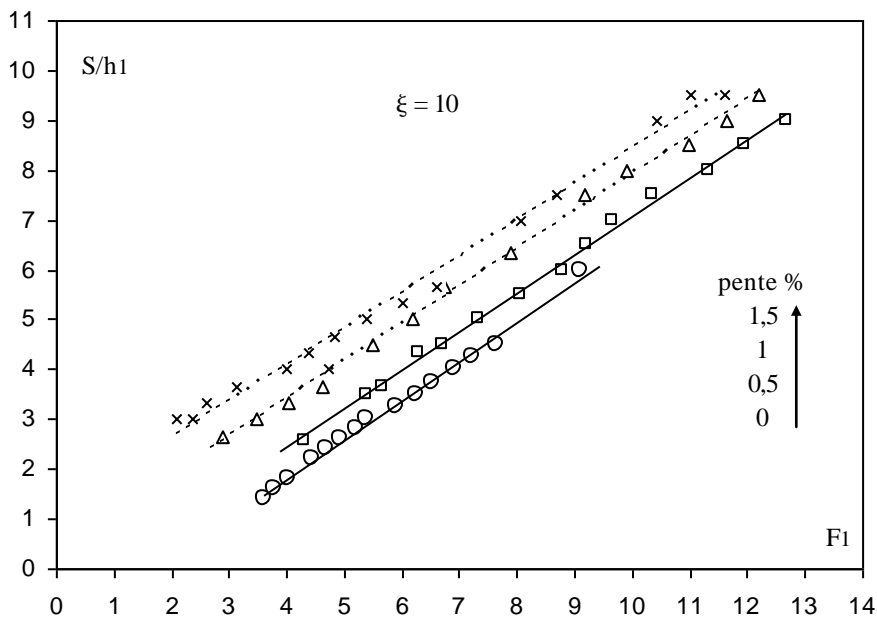


Figure 3.28 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $Tang \alpha = 0,00$ (\circ) ; $tana = 0,005$ (\square) ; $tana = 0,01$ (Δ) ; $tana = -0,015$ (\times) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement

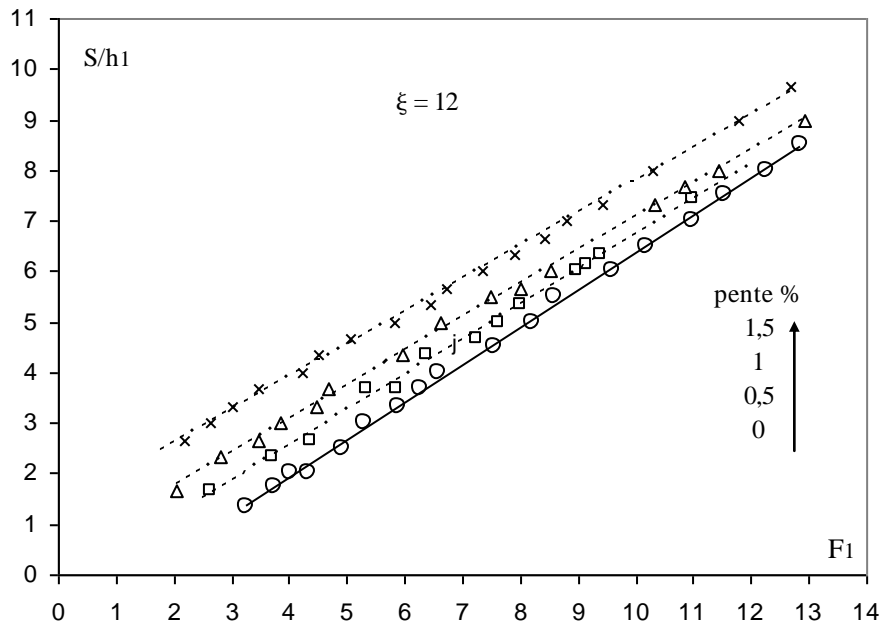


Figure 3.29 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ (\circ) ; $\text{tana} = 0,005$ (\square) ; $\text{tana} = 0,01$ (Δ) ; $\text{tana} = -0,015$ (\times) points expérimentaux. (—) Courbes d’ajustement

L’analyse de ces résultats montre que la hauteur relative s/h_1 augmente au fur et à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente aussi et ceci pour toutes les rugosités. En outre, l’augmentation relative de la rugosité ϵ provoque la diminution de la hauteur relative s/h_1 , ceci est dû à la rugosité du fond du canal qui engendre la compacité du ressaut hydraulique.

Tableau 2.23 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F_1

| Rugosité 0 mm | | | | | | | |
|-----------------------|------|---------------------------|------|--------------------------|------|---------------------------|------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F1 | S | F1 | S | F1 | S | F1 | S |
| 4,14 | 1,50 | 5,25 | 3,50 | 2,87 | 2,50 | 7,65 | 7,00 |
| 4,77 | 2,00 | 6,03 | 4,33 | 3,34 | 3,00 | 8,06 | 7,33 |
| 5,38 | 2,50 | 6,47 | 4,50 | 4,34 | 3,50 | 8,84 | 8,00 |
| 5,74 | 3,00 | 7,13 | 5,33 | 5,15 | 4,50 | 2,15 | 2,50 |
| 6,72 | 3,50 | 7,59 | 5,50 | 6,42 | 5,50 | 3,10 | 3,33 |
| 7,06 | 4,00 | 8,24 | 6,00 | 7,28 | 6,00 | 3,62 | 3,67 |
| 7,46 | 4,50 | 8,60 | 6,50 | 7,72 | 6,50 | 4,24 | 4,00 |
| 8,04 | 5,00 | 9,39 | 7,00 | 8,37 | 7,00 | 4,62 | 4,33 |
| 8,64 | 5,50 | 9,70 | 7,50 | 8,89 | 7,50 | 5,21 | 5,00 |
| 9,44 | 6,00 | 10,47 | 8,00 | 9,57 | 8,00 | 5,74 | 5,33 |
| 9,81 | 6,50 | 10,98 | 8,50 | 10,40 | 8,50 | 6,45 | 6,00 |
| 10,84 | 7,00 | 2,56 | 1,33 | 11,11 | 9,00 | 6,84 | 6,00 |
| 11,44 | 7,50 | 2,75 | 1,67 | 3,86 | 3,00 | | |
| 12,18 | 8,00 | 3,17 | 2,00 | 5,82 | 5,00 | | |
| 12,52 | 8,50 | 3,49 | 2,33 | 6,85 | 5,67 | | |
| 12,93 | 9,00 | 4,65 | 3,33 | 2,36 | 1,75 | | |

Tableau 2.24 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F1

| Rugosité 6 mm | | | | | | | |
|-----------------------|------|---------------------------|------|--------------------------|------|---------------------------|------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F1 | S | F1 | S | F1 | S | F1 | S |
| 7,23 | 4,50 | 4,63 | 3,33 | 3,54 | 3,50 | 2,90 | 4,00 |
| 8,40 | 5,50 | 5,43 | 4,00 | 4,32 | 4,00 | 3,52 | 5,00 |
| 8,88 | 6,00 | 5,76 | 4,33 | 4,87 | 4,50 | 4,99 | 5,50 |
| 9,88 | 6,50 | 6,81 | 5,00 | 5,73 | 5,00 | 5,41 | 6,00 |
| 10,65 | 7,00 | 7,28 | 5,33 | 6,20 | 5,50 | 5,91 | 6,50 |
| 10,91 | 7,50 | 8,13 | 6,00 | 7,00 | 6,00 | 6,76 | 7,00 |
| 11,44 | 8,00 | 9,00 | 6,50 | 7,64 | 6,50 | 7,36 | 7,50 |
| 11,90 | 8,33 | 9,67 | 7,00 | 8,37 | 7,00 | 8,05 | 8,00 |
| 3,10 | 1,33 | 10,12 | 7,50 | 9,04 | 7,50 | 8,84 | 8,50 |
| 3,42 | 1,67 | 4,22 | 3,00 | 9,88 | 8,00 | 9,42 | 9,00 |
| 3,81 | 2,00 | 4,94 | 3,50 | 10,23 | 8,50 | 10,33 | 9,50 |
| 4,25 | 2,33 | 2,26 | 3,75 | | | | |
| 4,87 | 2,67 | 2,51 | 1,50 | | | | |
| 5,31 | 3,00 | | | | | | |
| 5,69 | 3,33 | | | | | | |

Tableau 3.25 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F1

| Rugosité 8 mm | | | | | | | |
|-----------------------|------|---------------------------|------|--------------------------|------|---------------------------|------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F1 | S | F1 | S | F1 | S | F1 | S |
| 5,43 | 3,00 | 8,07 | 6,00 | 6,68 | 5,50 | 3,61 | 4,50 |
| 6,06 | 3,50 | 8,91 | 6,50 | 8,12 | 6,50 | 4,30 | 5,00 |
| 6,72 | 4,00 | 9,70 | 7,00 | 8,94 | 7,00 | 4,85 | 5,50 |
| 7,23 | 4,50 | 10,31 | 7,50 | 9,40 | 7,50 | 5,54 | 6,00 |
| 7,98 | 5,00 | 11,92 | 8,50 | 2,57 | 2,67 | 6,40 | 6,50 |
| 8,46 | 5,50 | 3,28 | 2,33 | 3,20 | 3,00 | 7,16 | 7,00 |
| 9,13 | 6,00 | 3,73 | 2,67 | 3,60 | 3,33 | 7,94 | 7,50 |
| 9,81 | 6,50 | 4,12 | 3,00 | 4,06 | 3,67 | 8,61 | 8,00 |
| 10,26 | 7,00 | 4,71 | 3,33 | 4,49 | 4,00 | 9,59 | 8,50 |
| 11,04 | 7,50 | 5,13 | 3,67 | 4,94 | 4,33 | 10,22 | 9,00 |
| 11,44 | 8,00 | 5,72 | 4,00 | 5,56 | 4,67 | 10,94 | 9,50 |
| 12,24 | 8,50 | 6,22 | 4,33 | 5,96 | 5,00 | 2,74 | 3,77 |

Tableau 3.26 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F₁

| Rugosité 10 mm | | | | | | | |
|----------------|------|------------------|------|-----------------|------|------------------|------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F1 | S | F1 | S | F1 | S | F1 | S |
| 9,10 | 6,00 | 7,35 | 5,00 | 5,49 | 4,50 | 10,42 | 9,00 |
| 5,91 | 3,25 | 8,77 | 6,00 | 6,19 | 5,00 | 11,01 | 9,50 |
| 6,25 | 3,50 | 9,21 | 6,50 | 6,73 | 5,66 | 11,61 | 9,50 |
| 6,54 | 3,75 | 9,64 | 7,00 | 9,17 | 7,50 | 2,08 | 3,00 |
| 6,92 | 4,00 | 10,35 | 7,50 | 9,92 | 8,00 | 2,61 | 3,33 |
| 7,21 | 4,25 | 11,33 | 8,00 | 10,97 | 8,50 | 3,12 | 3,67 |
| 7,63 | 4,50 | 11,94 | 8,50 | 11,62 | 9,00 | 4,01 | 4,00 |
| 3,61 | 1,40 | 12,69 | 9,00 | 12,21 | 9,50 | 4,37 | 4,33 |
| 3,78 | 1,60 | 4,32 | 2,55 | 2,90 | 2,67 | 4,82 | 4,67 |
| 4,03 | 1,80 | 5,39 | 3,50 | 3,47 | 3,00 | 5,39 | 5,00 |
| 4,43 | 2,20 | 5,67 | 3,67 | 4,03 | 3,33 | 5,99 | 5,33 |
| 4,70 | 2,40 | 6,28 | 4,33 | 4,63 | 3,67 | 6,61 | 5,67 |
| 4,95 | 2,60 | 6,72 | 4,50 | 7,89 | 6,33 | 8,05 | 7,00 |
| 5,20 | 2,80 | 8,07 | 5,50 | | | 8,69 | 7,50 |
| 5,40 | 3,00 | | | | | 2,35 | 3,00 |
| | | | | | | 4,74 | 4,00 |

Tableau 3.27 : Mesures expérimentales de la pente positive ayant servi au traçage des courbes de S en fonction de F₁

| Rugosité 12 mm | | | | | | | |
|----------------|------|------------------|------|-----------------|------|------------------|------|
| tang (α) = 0 | | tang (α) = 0,005 | | tang (α) = 0,01 | | tang (α) = 0,015 | |
| F1 | S | F1 | S | F1 | S | F1 | S |
| 9,59 | 6,00 | 9,39 | 6,33 | 10,32 | 7,33 | 10,29 | 8,00 |
| 10,19 | 6,50 | 11,00 | 7,44 | 10,83 | 7,67 | 11,79 | 9,00 |
| 11,00 | 7,00 | 2,65 | 1,67 | 11,42 | 8,00 | 12,68 | 9,66 |
| 11,53 | 7,50 | 3,72 | 2,33 | 12,93 | 9,00 | 2,18 | 2,67 |
| 12,28 | 8,00 | 4,35 | 2,67 | 2,04 | 1,67 | 2,62 | 3,00 |
| 12,87 | 8,50 | 5,35 | 3,67 | 2,81 | 2,33 | 3,02 | 3,33 |
| 3,25 | 1,33 | 5,85 | 3,67 | 3,45 | 2,67 | 3,47 | 3,67 |
| 4,33 | 2,00 | 6,39 | 4,33 | 3,85 | 3,00 | 4,24 | 4,00 |
| 4,93 | 2,50 | 7,25 | 4,67 | 4,45 | 3,33 | 4,51 | 4,33 |
| 5,29 | 3,00 | 7,64 | 5,00 | 4,67 | 3,67 | 5,07 | 4,67 |
| 5,89 | 3,33 | 7,99 | 5,33 | 5,97 | 4,33 | 5,81 | 5,00 |
| 6,26 | 3,67 | 8,96 | 6,00 | 6,62 | 5,00 | 6,46 | 5,33 |
| 6,58 | 4,00 | 9,16 | | 7,50 | 5,50 | 6,72 | 5,67 |
| 7,57 | 4,50 | 6,13 | | 8,00 | 5,67 | 7,36 | 6,00 |
| 8,23 | 5,00 | | | 8,52 | 6,00 | 7,91 | 6,33 |
| 8,61 | 5,50 | | | | | 8,43 | 6,67 |
| 3,73 | 1,75 | | | | | 8,82 | 7,00 |

Selon les figures (3.25) à (3.29), l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire de la forme : $S/h_1 = a F_1 + b$

Le tableau (3.28) à (3.32) représente le paramètre 'a' pour les quatre valeurs de pentes considérées.

Tableau 3.28 : Valeurs des paramètres a et b1

| Rugosité 0 mm | | | |
|-------------------|--------------------|-------|--------|
| Tang (α) | a | b | R^2 |
| 0,00 | 0,8304 | -1,86 | 0,9968 |
| 0,005 | 0,8273 | -0,67 | 0,9983 |
| 0,01 | 0,8222 | 0,06 | 0,9988 |
| 0,015 | 0,8175 | 0,67 | 0,9975 |
| | $a \approx 0,8243$ | | |

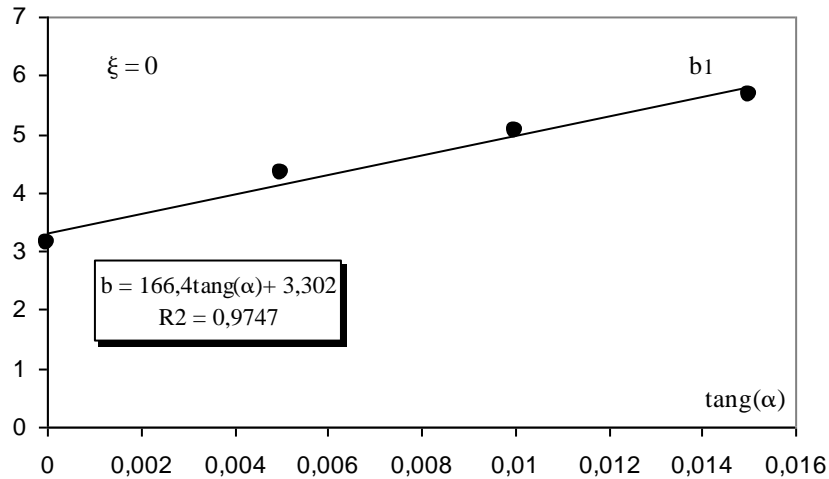


Figure 3.30 : Variation du paramètre 'b' en fonction de $\text{tang}(\alpha)$.

Tableau 3.29 : Valeurs des paramètres a et b2

| Rugosité 6 mm | | | |
|-------------------|--------------------|---------|--------|
| Tang (α) | a | b | R^2 |
| 0,00 | 0,7774 | -1,0807 | 0,9962 |
| 0,005 | 0,7588 | -0,2128 | 0,9982 |
| 0,01 | 0,7328 | 0,88 | 0,9983 |
| 0,015 | 0,7241 | 2,117 | 0,992 |
| | $a \approx 0,7482$ | | |

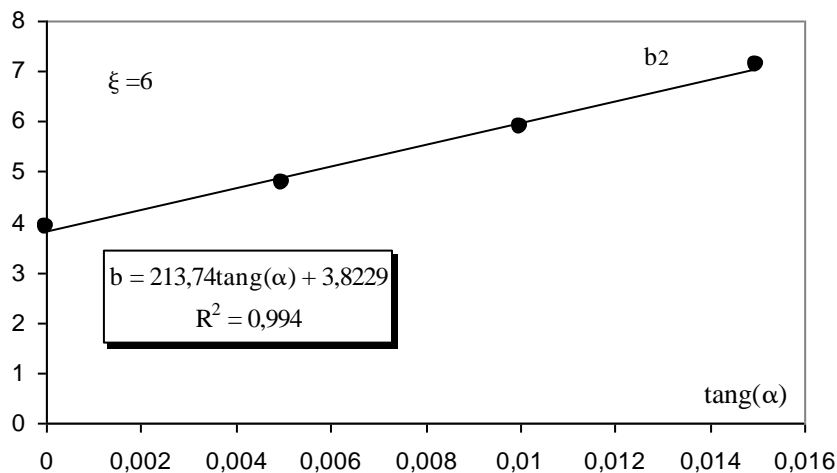


Figure 3.31 : Variation du paramètre 'b' en fonction de $\text{tang}(\alpha)$.

Tableau 3.30 : Valeurs des paramètres a et b3

| Rugosité 8 mm | | | |
|---------------|-------------|---------|----------------|
| Tang (α) | a | b | R ² |
| 0,00 | 0,7699 | -1,0002 | 0,9968 |
| 0,005 | 0,7389 | -0,1479 | 0,9983 |
| 0,01 | 0,70 | 0,8238 | 0,9988 |
| 0,015 | 0,6811 | 2,0817 | 0,9975 |
| | a ≈ 0,72247 | | |

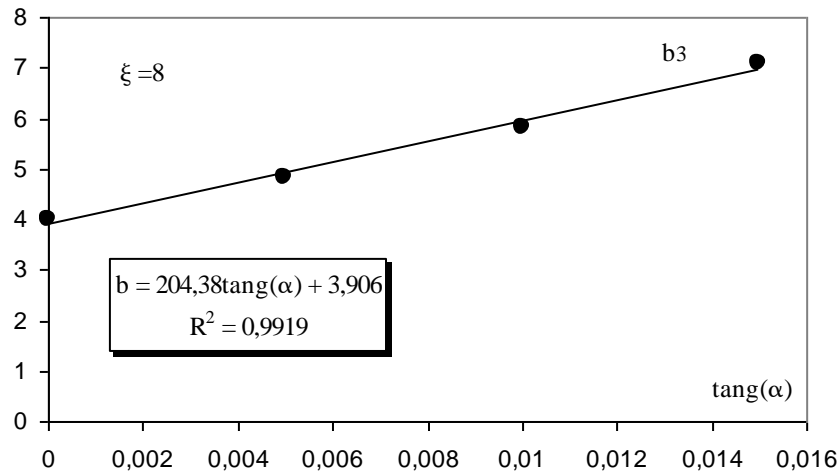


Figure 3.32 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang(α)

Tableau 3.31 : Valeurs des paramètres a et b4

| Rugosité 10 mm | | | |
|----------------|------------|---------|----------------|
| Tang (α) | a | b | R ² |
| 0,00 | 0,7888 | -1,3679 | 0,9947 |
| 0,005 | 0,7715 | -0,6623 | 0,9968 |
| 0,01 | 0,7498 | 0,4058 | 0,9969 |
| 0,015 | 0,725 | 1,1872 | 0,9878 |
| | a ≈ 0,7587 | | |

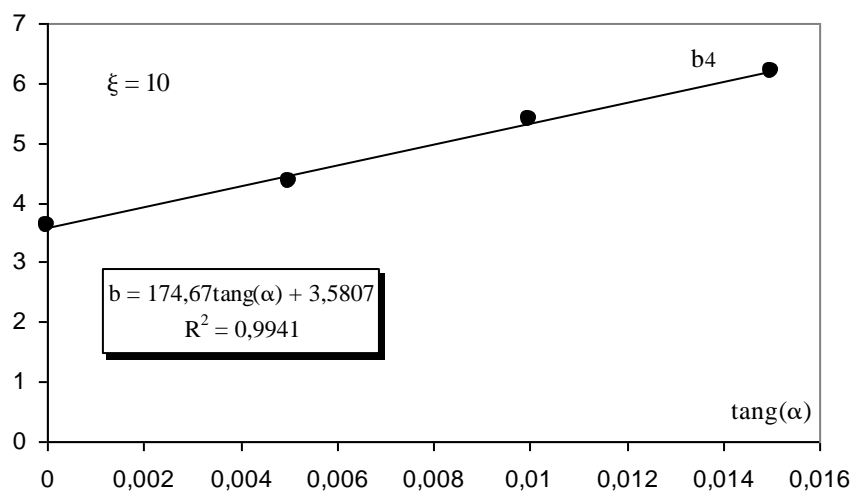


Figure 3.33 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang(α)

Tableau 3.32 : Valeurs des paramètres a et b5

| Rugosité 12 mm | | | |
|----------------|-------------------|---------|----------------|
| Tang (α) | a | b | R ² |
| 0,00 | 0,7378 | -1,0202 | 0,9984 |
| 0,005 | 0,6959 | -0,245 | 0,9966 |
| 0,01 | 0,6667 | 0,4151 | 0,9966 |
| 0,015 | 0,6486 | 1,2957 | 0,9982 |
| | a ≈ 0,6872 | | |

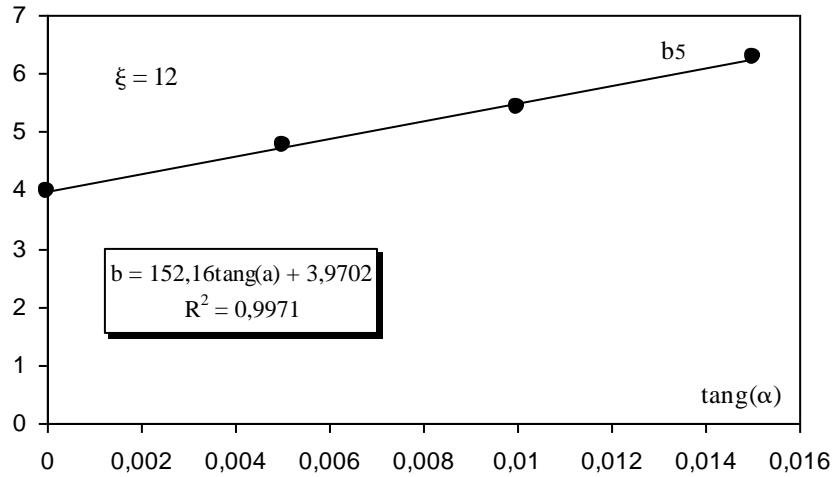


Figure 3.34 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang(α)

La figure (3.30) à (3.34) montre clairement que la variation de b en fonction de la pente du canal tan (α) suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

$$\begin{aligned}
 b_1 &= [166,4 \text{ tang}(a) - 1,698] & R^2 &= 0,9747 & ; \varepsilon &= (0) \\
 b_2 &= [213,74 \text{ tang}(a) - 1,1771] & R^2 &= 0,994 & ; \varepsilon &= (6) \\
 b_3 &= [204,38 \text{ tang}(a) - 1,094] & R^2 &= 0,9919 & ; \varepsilon &= (8) \\
 b_3 &= [174,67 \text{ tang}(a) - 1,4193] & R^2 &= 0,9747 & ; \varepsilon &= (10) \\
 b_4 &= [152,16 \text{ tang}(a) - 1,0298] & R^2 &= 0,9971 & ; \varepsilon &= (12)
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

Remplaçant les paramètres a par leurs expressions respectives dans la relation $S/h_1 = a F_1 + b$, on

$$\begin{aligned}
 \frac{S}{h_1} &= [(-0,0117(\varepsilon) + 0,8163)]F_1 + [(166,4\text{tang}(\alpha) - 1,698)] & ; \varepsilon &= (0) \\
 \frac{S}{h_1} &= [(-0,0117(\varepsilon) + 0,8163)]F_1 + [(213,74\text{tang}(\alpha) - 1,1771)] & ; \varepsilon &= (6) \\
 \frac{S}{h_1} &= [(-0,0117(\varepsilon) + 0,8163)]F_1 + [(204,38 \text{ tang}(\alpha) - 1,094)] & ; \varepsilon &= (8) \\
 \frac{S}{h_1} &= [(-0,0117(\varepsilon) + 0,8163)]F_1 + [(174,67\text{tang}(\alpha) - 1,4193)] & ; \varepsilon &= (10) \\
 \frac{S}{h_1} &= [(-0,0117(\varepsilon) + 0,8163)]F_1 + [(152,16\text{tang}(\alpha) - 1,0298)] & ; \varepsilon &= (12)
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

Le tableau représente les valeurs \bar{b} du coefficient de rugosité avec l'angle d'inclinaison du canal

Tableau 3.33 : Valeurs des paramètres \bar{b}

| Rugosité (ε) | \bar{b} | R^2 |
|----------------------------|-----------|--------|
| 0 | 166,4 | 0,9747 |
| 6 | 213,74 | 0,994 |
| 8 | 204,38 | 0,9919 |
| 10 | 174,67 | 0,9941 |
| 12 | 152,16 | 0,9971 |

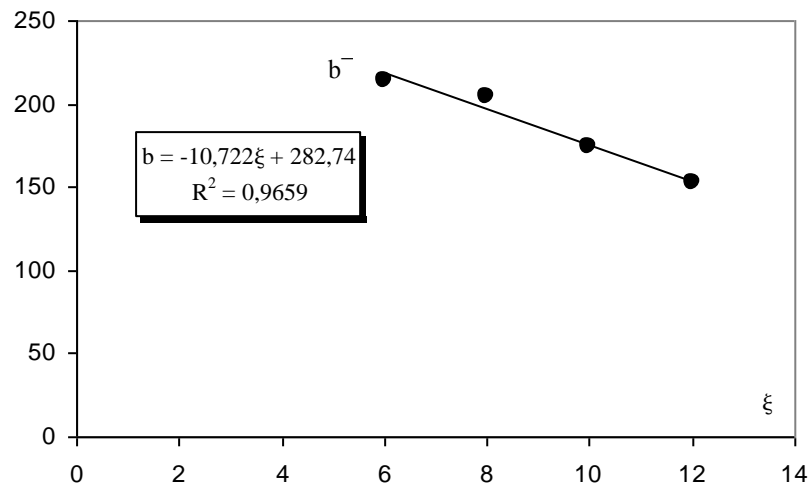


Figure 3.35 : Variation du paramètre 'b' en fonction de Rugosité (ε)

La figure (3.23) montre clairement que la variation de \bar{b} en fonction de la Rugosité (ε) suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

$$\bar{b} = -10,722(\varepsilon) + 282,74 \quad R^2 = 0,9659 \quad \varepsilon = (0; 6; 8; 10; 12) \quad (3.13)$$

Il serait pratique de reformuler les cinq relations en une équation inclusive sous la forme

Approximative suivante :

$$S/h_1^* = [(-0,0117(\varepsilon) + 0,8163)]F_1 + [(-10,722(\varepsilon) + 282,74)]\text{tang}(a) - 1,18 \quad (3.14)$$

III.3. EXEMPLE D'APPLICATION :

Soit de déterminer les caractéristiques d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil au fond du canal lisse, et du fond du canal rugueux dans un canal rectangulaire, connaissant le débit volumique $Q = 5\text{m}^3/\text{s}$, la profondeur conjuguée en amont du ressaut $h_1 = 0,7\text{ m}$, largeur du canal $b = 0,25\text{ m}$.

III.3.1. Calcul du nombre de Froude F_1 :

Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident dans la section initiale 1-1 - c'est-à-dire au pied de l'avancée ce nombre s'exprime en règle générale par la relation Exemple d'application Soit pour déterminer les caractéristiques d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil en fond de chenal lisse, et fond de chenal brut dans un chenal rectangulaire, connaissant le débit volumique $Q = 5\text{m}^3/\text{s}$, la profondeur cumulée en amont du ressaut $h_1 = 0,7\text{m}$, largeur du chenal $b = 0,25\text{m}$

Le nombre de Froude F_1 du flux incident dans la section initiale 1-1- c'est-à-dire au pied de la projection ce nombre s'exprime en règle générale par la relation

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^2} \frac{\partial A_1}{\partial h_1}$$

L'étude montre que cette dérivée représente la largeur de la masse d'eau quelle que soit la forme géométrique du profil de liquide en écoulement.

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gB^2 [h_1 \cos(\alpha)]^3}$$

Remplacez chaque paramètre par sa valeur dans l'équation $F_1 = 10,9$

III.3.2. Ressaut à fond incline rugueux : $\varepsilon = 0$; $\alpha = 0.005$ **III.3.2.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :**

L'analyse des résultats expérimentaux de l'évaluation du saut de seuil contrôlé lisse dans un canal rectangulaire, nous a donné une relation entre le rapport des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 s'écrit comme suit

$$Y^* = [(-0,838(\varepsilon) + 0,232)\text{tang}(\alpha) + (0,0135(\varepsilon) + 1,246)]F_1 = 13,79$$

D'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut.

$$h_2 \cong 9,65\text{m}$$

III.3.2.2. Longueur relative du ressaut hydraulique L_j/h_1

Les résultats expérimentaux conduisent à une autre relation, reliant la longueur relative du ressaut hydraulique et le nombre de Froude F_1 s'écrit comme suit :

$$L_j/h_1^* = [(-8,0795(\varepsilon) - 90,793)\text{tang}(\alpha) - (0,1478(\varepsilon) - 12,73)]F_1 = 133,80$$

D'où la longueur du ressaut $L_j \cong 191,15$ m.

III.3.2.3 La hauteur relative du seuil s/h_1

$$S/h_1^* = [(-0,0117(\varepsilon) + 0,8163)]F_1 + [(-10,722(\varepsilon) + 282,74)]\text{tang}(\alpha) - 1,18 = 9,13$$

D'où la hauteur du ressaut $S/h_1 \cong 6,40$ m

III.3.3. Ressaut à fond incliné rugueux. $\varepsilon = 12$; $\alpha = 0.005$

III.3.3.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.

L'analyse des résultats expérimentaux de l'évaluation du saut de seuil contrôlé rugueux dans un canal rectangulaire, nous a donné une relation entre le rapport des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 s'écrit comme suit :

$$Y^* = [(-0,838(\varepsilon) + 0,232)\text{tang}(\alpha) + (0,0135(\varepsilon) + 1,246)]F_1 = 14,81$$

D'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut.

$$h_2 \cong 21,15 \text{ m}$$

III.3.3.2 Longueur relative du ressaut hydraulique L_j/h_1

Les résultats expérimentaux conduisent à une autre relation, reliant la longueur relative du ressaut hydraulique et le nombre de Froude F_1 s'écrit comme suit.

$$L_j/h_1^* = [(-8,0795(\varepsilon) - 90,793)\text{tang}(\alpha) - (0,1478(\varepsilon) - 12,73)]F_1 = 109,19$$

D'où la longueur du ressaut $L_j \cong 76,43$ m.

III.3.3.3. La hauteur relative du seuil s/h_1

$$S/h_1^* = [(-0,0117(\varepsilon) + 0,8163)]F_1 + [(-10,722(\varepsilon) + 282,74)]\text{tang}(\alpha) - 1,18 = 6,96$$

D'où la hauteur du ressaut $S/h_1 \cong 4,87$ m

III.4.CONCLUSION :

Dans cette dernière section, nous montrons l'ensemble des résultats expérimentaux et étude semi-théorique de notre étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à fond rugueux.

Nous avons tenté d'établir une relation d'approximation pour remplacer la relation semi-théorique hautement implicite en Y pour la recherche théorique. Celle-ci permet de trouver le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient C_r de résistance du fond du canal de nombre de Froude F_1 incident de l'écoulement. D'autre part, nous avons pu évaluer la relation liant le coefficient C_r de résistance à la rugosité absolue ε et l'expression semi théorique $f(Y, F_1, C_r)$ devient de la forme $f(Y, F_1, \alpha, \varepsilon)$.

Nous avons présenté les résultats de nos expériences, qui nous permettent d'en déduire des relations expérimentales explicites. Pour ce faire, nous avons commencé par calculer le rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 du saut en fonction du nombre de Froude F_1 pour chacune des cinq valeurs différentes de rugosité testées, correspond chacun à une valeur bien déterminée de la rugosité. Par ailleurs, du rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 augmente avec l'accroissement de nombre de Froude et réduit avec l'augmentation de la rugosité imposée au fond du canal l'ajustement statistique des points de mesures du ressaut à fond rugueux, de type linéaire, a permis d'aboutir, avec une assez bonne corrélation, à une équation de type linéaire liant Y, F_1, α et ε

En plus, nous avons analysé expérimentalement les mesures des longueurs relatives du ressaut L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 incident de l'écoulement, ainsi cette analyse nous a permis d'obtenir une relation de type linéaire entre la longueur relative du ressaut et du nombre de Froude de l'écoulement.

L'analyse statistique des points de mesures expérimentales du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal à fond rugueux, montre qu'un ajustement de type puissance est possible entre L_j/h_1 et F_1 .

En plus, nous avons aussi analysé expérimentalement variation de la hauteur relative du seuil S/h_1 en fonction du Froude F_1 .

III.5. ANALYSE THEORIQUE DE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A PENTE INCLINE RUGUEUX

III.5.1.INTRODUCTION

Cette recherche a pour but d'étudier d'une manière théorique le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire rugueux à pente variable. L'objectif principal étant la détermination des relations fonctionnelles pratiques permettant le dimensionnement des bassins de dissipation de charge hydraulique à l'aval des barrages, ainsi que le dimensionnement des canaux d'irrigation. En effet, il a été étudié d'une manière théorique. Le développement théorique, permettant de trouver une relation semi-théorique de la forme $f(Y, F_1, \alpha, Cr)$, tels que Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, F_1 est le nombre de Froude incident et Cr est le coefficient de résistance et α la pente du canal.

III.5.2. Analyse théorique :

La Figure. (3.35) montre un ressaut contrôlé par seuil dans un canal de section rectangulaire à rugueux inclinée. Le seuil dénoyé est placé à l'extrémité aval du canal, afin de surélever le plan d'eau à l'aval. h_1 et h_2 représentent les hauteurs conjuguées respectivement de la section initiale et finale du ressaut.

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

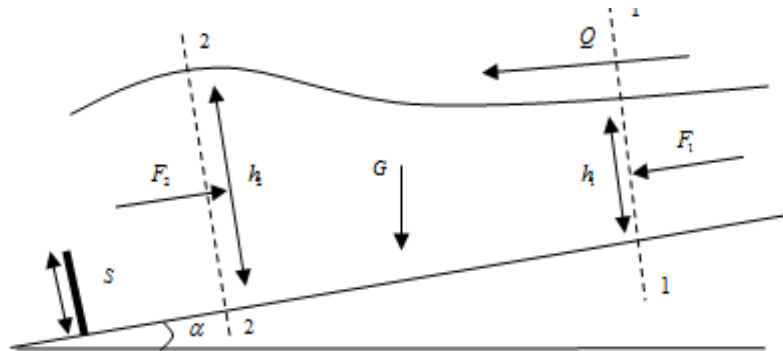


Figure.3.36 : Ressaut contrôlé par un seuil un canal rectangulaire.

Étant donnée les hypothèses simplificatrices suivantes :

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

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

$$F_1 - F_2 - F_R + G \sin(\alpha) = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad (3.15)$$

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

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

ρ est la masse volumique du liquide,

Q est le débit volume.

G : Le poids appliqué au centre de gravité du volume d'eau formé par le ressaut

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

$$\text{suivante : } F_R = C \rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) p \quad (3.16)$$

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

L_j : Longueur du ressaut (m) ;

C : un coefficient du à la rugosité ;

p : Périmètre mouillé du canal.

L'équation peut s'écrire alors sous la forme :

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 - C \rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) p - G \sin(\alpha) = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad (3.17)$$

P étant la pression hydrostatique.

$$\frac{Q^2}{g A_1} + \bar{h}_1 A_1 + V \sin(\alpha) = \frac{Q^2}{g A_2} + \bar{h}_2 A_2 \quad (3.18)$$

Les expressions de A_1 , A_2 , \bar{h}_1 et \bar{h}_2 puissent être déterminé géométriquement en se basant sur la figure (3.37)

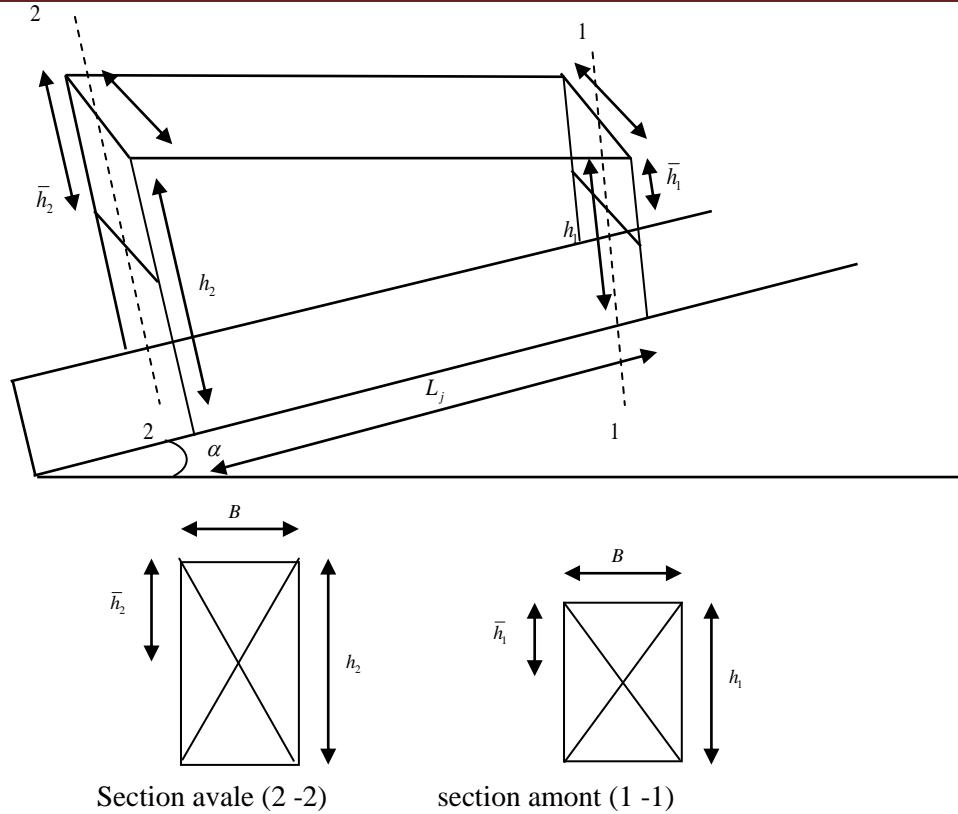


Figure 3.37 : a) Représentation géométrique du volume d'eau engendré par le ressaut
b) Représentation géométrique des sections amont et aval

D'où

$$A_1 = Bh_1 \quad (3.19)$$

$$A_2 = Bh_2 \quad (3.20)$$

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6 \cos(\alpha)} \times \frac{3B}{A_1} \quad (3.21)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6 \cos(\alpha)} \times \frac{3B}{A_2} \quad (3.22)$$

III.5.3. Détermination du volume du ressaut :

III.5.3.1. Détermination analytique du volume du ressaut :

Soit un canal rectangulaire de largeur B et de longueur L_j et de hauteur initiale h_1 et de hauteur finale h_2

A_1 et A_2 représentent respectivement les sections amont et aval de ce canal.

Le volume moyen de ce canal est donné par la relation suivante :

$$V = \frac{1}{2} (A_1 + A_2) \times L_j \quad (3.23)$$

En tenant compte que :

$A_1 = Bh_1$ et $A_2 = Bh_2$, on aura alors

$$V = \frac{B}{2}(h_1 + h_2)L_j \quad (3.24)$$

III.5.3.2. Détermination géométrique du volume de ressaut :

Soit la section 1234 représenté dans la vue de profil de la figure (3.36), cette section peut être divisée en deux sections :

$$S = S_1 + S_2 \quad (3.25)$$

S_1 est donnée par la relation suivante :

$$S_1 = L_j h_1$$

(3.26)

S_2 est calculée par l'intégral suivant :

$$S_2 = \int_0^{L_j} \frac{(h_2 - h_1)}{L_j} x dx \quad (3.27)$$

Et on obtient :

$$S_2 = (h_2 - h_1) \frac{L_j}{2} \quad (3.28)$$

En remplaçant dans la relation on obtient la relation suivante :

$$S = \frac{1}{2}(h_1 + h_2)L_j \quad (3.29)$$

En multipliant cette section par la largeur du canal, on obtient le volume total déterminé précédemment :

$$V = \frac{B}{2}(h_1 + h_2)L_j \quad (3.30)$$

Le rapport des hauteurs conjuguées est donné par la relation suivante :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} \quad (3.31)$$

En remplaçant par cette expression dans la relation (3.31), on aura :

$$V = \frac{B}{2}(Y + 1)h_1 L_j \quad (3.32)$$

Y Étant le rapport des hauteurs conjuguées

La relation représente le volume calculé du ressaut hydraulique.

III.5.3.3. Le Facteur De Correction :

Le volume réel du ressaut hydraulique est très difficile à déterminer théoriquement à cause de la perturbation de la surface libre de l'eau due au rouleau de surface, pour cela, il est nécessaire de corriger ce volume en le multipliant par un coefficient K dit facteur de correction.

La relation devient :

$$V = \frac{KB}{2}(Y+1)h_1 L_j \quad (3.33)$$

K Étant le rapport du volume réel au volume calculé du ressaut, il sera estimé par voie expérimentale.

$$\frac{Q^2}{gBh_1} + \frac{h_1^2}{6\cos(\alpha)} \frac{3B}{Bh_1} + \frac{KB}{2}(Y+1)h_1 L_j \sin(\alpha) - G\sin(\alpha) = \frac{Q^2}{gBh_2} + \frac{h_2^2}{6\cos(\alpha)} \frac{3B}{Bh_2} \quad (3.34)$$

En arrangeant cette relation, elle devient :

$$\frac{Q^2}{gBh_1} + \frac{Bh_1^2}{2\cos(\alpha)} + \frac{Bh_1}{2}(Y+1)KL_j \sin(\alpha) - G\sin(\alpha) = \frac{Q^2}{gBh_2} + \frac{Bh_2^2}{2\cos(\alpha)}$$

En divisant les deux membres de la relation (6.36) par Bh_1^2 , elle devient :

$$\frac{Q^2}{gB^2h_1^3} + \frac{1}{2\cos(\alpha)} + \frac{K}{2}(Y+1)\frac{L_j}{h_1} \sin(\alpha) = \frac{Q^2}{gB^2h_1^2h_2} + \frac{h_2^2}{2h_1^2 \cos(\alpha)}$$

La longueur relative du ressaut λ est donnée par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{L_j}{h_1} \quad (3.35)$$

III.5.3.4. Le nombre de Froude :

Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident est l'un des caractéristiques les plus significatives dans l'étude de ressaut hydraulique, il sera calculé à la section initiale (1-1), c'est-à-dire au pied du ressaut. Il est donné par la relation suivante :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial h_1} \quad (3.36)$$

Cette relation montre que le nombre de Froude F_1 est en fonction de :

- Le débit volume de l'écoulement Q (m^3/s) ;
- L'accélération de la pesanteur g (m/s^2) ;
- L'aire de la section transversale mouillée au pied de ressaut A_1 (m^2) ;

- La dérivée partielle $\frac{\partial A_1}{\partial h_1}$ de l'aire de la section A_1 au pied de ressaut par rapport à la hauteur h_1 .

$$\frac{\partial A_1}{\partial h_1} = B \quad (3.37)$$

À cause de l'inclinaison du canal avec un angle α par rapport à l'horizontal, on doit écrire la hauteur initiale $h_1 \cos(\alpha)$

En tenant compte de ces constatations, la relation devient : $F_1^2 = \frac{Q^2}{gB^2h_1^3}$

En remplaçant dans la relation elle devient :

$$(1 - Cr)F_1^2 + \frac{1}{2\cos(\alpha)} + (Y + 1)\frac{K\lambda}{2}\sin(\alpha) = \frac{F_1^2}{Y} + \frac{Y^2}{2\cos(\alpha)} \quad (3.38)$$

Cette relation est déterminée à partir de l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre deux sections délimitant un ressaut hydraulique à pente positive variable évoluant dans un canal rectangulaire. Elle montre que ce type de ressaut est régi par :

- Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident à la section amont du ressaut ;
- Le rapport Y des hauteurs conjuguées h_1 et h_2 respectivement à l'amont et à l'aval du ressaut ;
- L'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontal (l'angle α) ;
- La longueur relative λ du ressaut.

On arrange cette relation comme suit pour avoir l'aspect final de la formule :

$$(1 - Cr)F_1^2 = \frac{Y(Y + 1)}{2} \left[\frac{1}{\cos(\alpha)} - \frac{K\lambda}{(Y - 1)} \sin(\alpha) \right] \quad (3.39)$$

La relation exprime le nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées, de l'angle d'inclinaison α du canal par rapport à l'horizontal et de la longueur relative $\lambda = L_j/h_1$ d'un ressaut hydraulique à pente positive variable évoluant dans un canal de section rectangulaire.

III.6. VALIDATION DE L'APPROCHE THEORIQUE PROPOSEE :

On applique la relation dans le cas d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire horizontal ($Cr = 0$) et on obtient la relation suivante :

$$F_1^2 = \frac{Y(Y+1)}{2} \quad (3.40)$$

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

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

$$Y = \frac{1}{2}(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1) \quad (3.41)$$

La relation est connue sous le nom d'équation de Bélanger et permet d'évaluer le rapport Y des hauteurs conjuguées d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire horizontal en fonction de nombre de Froude F_1 .

$$(3.37)$$

L'application de cette relation pour un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal ($\alpha = 0$ et $Cr = 0$) mène à écrire :

$$Y = \frac{1}{2}(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1) \quad (3.42)$$

Cette relation n'est autre que l'équation du rapport des hauteurs conjuguées dans un canal rectangulaire horizontale proposée par Bélanger.

Pour déterminer expérimentalement le facteur de correction K , on peut reformuler la relation (3.40) comme suit :

$$K = \frac{Y-1}{\lambda \sin(\alpha)} \left[\frac{1}{\cos(\alpha)} - \frac{2(1-Cr)F_1^2}{Y(Y+1)} \right] \quad (3.43)$$

Tel que F_1 , le nombre de Froude de l'écoulement incident est calculé selon la relation (5.36) et en remplaçant h_1 par $h_1 \cos(\alpha)$, on obtient :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gB^2 [h_1 \cos(\alpha)]^3} \quad (3.44)$$

Q : Débit de l'écoulement mesuré par le déversoir rectangulaire selon la relation en (m^3/s)

B : La largeur du canal en (m)

h_1 : La hauteur du niveau d'eau à la section amont du ressaut en (m)

g : L'accélération de la pesanteur en (m^2/s)

Les valeurs de Y , λ et α sont déterminées expérimentalement.

Tableau 3.34 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (0 mm) de lapent positive

| Rugosité 0 mm | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|------|----------------------------|-------|------|----------------------------|-------|------|
| tang (α) = 0 ,005 | | | tang (α) = 0 ,010 | | | tang (α) = 0 ,015 | | |
| F_1 | Y | K | F_1 | Y | K | F_1 | Y | K |
| 3,70 | 4,90 | 1,21 | 4,30 | 5,60 | 1,47 | 7,25 | 9,25 | 0,38 |
| 4,45 | 5,80 | 1,10 | 5,11 | 6,65 | 0,53 | 7,82 | 10,10 | 1,10 |
| 6,88 | 9,05 | 1,19 | 6,42 | 8,35 | 1,40 | 3,12 | 3,95 | 1,08 |
| 8,60 | 11,55 | 1,13 | 7,21 | 9,35 | 0,71 | 4,11 | 5,20 | 1,03 |
| 9,35 | 12,40 | 0,27 | 7,72 | 10,10 | 1,01 | 4,44 | 5,65 | 1,03 |
| 9,70 | 12,90 | 0,26 | 8,37 | 11,05 | 1,11 | 4,82 | 6,25 | 0,73 |
| 10,44 | 13,80 | 0,01 | 9,57 | 12,60 | 1,09 | 5,85 | 7,43 | 0,88 |
| 10,87 | 14,35 | 0,15 | 10,44 | 13,75 | 1,27 | 2,07 | 2,60 | 1,29 |
| 11,38 | 15,15 | 0,02 | 11,04 | 14,25 | 0,35 | 2,42 | 3,06 | 1,43 |
| 2,56 | 3,40 | 0,35 | 3,86 | 5,17 | 1,03 | 2,80 | 3,50 | 0,56 |
| 4,91 | 6,67 | 1,50 | 2,36 | 3,10 | 0,98 | 3,90 | 5,06 | 1,36 |
| 6,30 | 8,47 | 0,79 | 2,73 | 3,48 | 1,38 | 5,18 | 6,70 | 1,25 |
| 7,78 | 10,40 | 0,80 | 3,14 | 4,05 | 1,25 | | | |
| 2,10 | 2,85 | 0,73 | 3,53 | 4,63 | 1,17 | | | |
| 2,83 | 3,88 | 0,80 | 4,88 | 6,50 | 1,38 | | | |
| 3,06 | 4,25 | 1,15 | 5,64 | 7,50 | 1,01 | | | |
| | | | 6,07 | 8,00 | 0,20 | | | |

Tableau 3.35 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (6 mm) de lapent positive

| Rugosité 6 mm | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|------|----------------------------|------|------|----------------------------|------|------|
| tang (α) = 0 ,005 | | | tang (α) = 0 ,010 | | | tang (α) = 0 ,015 | | |
| F_1 | Y | K | F_1 | Y | K | F_1 | Y | K |
| 6,29 | 8,35 | 1,17 | 3,30 | 4,10 | 0,27 | 4,50 | 5,70 | 0,03 |
| 8,75 | 11,55 | 0,15 | 3,70 | 4,73 | 0,69 | 5,95 | 7,68 | 0,02 |
| 10,17 | 13,50 | 0,15 | 4,13 | 5,23 | 0,26 | 6,25 | 8,10 | 0,03 |
| 10,80 | 14,35 | 0,11 | 4,52 | 5,83 | 0,53 | 2,27 | 2,96 | 1,50 |
| 11,39 | 15,15 | 0,08 | 4,92 | 6,37 | 0,39 | 2,69 | 3,36 | 0,70 |
| 5,43 | 7,23 | 1,43 | 5,70 | 7,47 | 0,43 | 3,00 | 3,72 | 0,35 |
| 6,81 | 8,87 | 0,07 | 6,00 | 7,87 | 0,36 | 3,20 | 4,10 | 0,82 |
| 3,10 | 3,88 | 1,29 | 6,53 | 8,53 | 0,17 | 3,51 | 4,48 | 0,55 |
| 4,80 | 6,21 | 0,89 | 7,13 | 9,30 | 0,03 | 3,85 | 4,88 | 0,26 |
| 5,20 | 6,74 | 0,74 | 7,60 | 9,88 | 0,13 | 4,12 | 5,26 | 0,28 |
| 2,69 | 3,23 | 0,14 | 2,68 | 3,33 | 0,95 | 4,76 | 6,12 | 0,19 |
| 3,50 | 4,46 | 1,50 | 3,00 | 3,80 | 1,35 | 5,20 | 6,68 | 0,07 |
| 3,90 | 4,95 | 0,77 | | | | 7,60 | 9,48 | 1,25 |
| 4,20 | 5,42 | 1,25 | | | | | | |

Tableau 3.36 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (8 mm) de lapent positive

| Rugosité 8 mm | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|------|----------------------------|-------|------|----------------------------|------|------|
| tang (α) = 0 ,005 | | | tang (α) = 0 ,010 | | | tang (α) = 0 ,015 | | |
| F ₁ | Y | K | F ₁ | Y | K | F ₁ | Y | K |
| 6,03 | 7,90 | 1,31 | 3,04 | 4,00 | 1,21 | 6,22 | 8,00 | 1,02 |
| 6,73 | 8,50 | 0,27 | 5,35 | 7,05 | 0,02 | 6,81 | 8,73 | 1,20 |
| 7,27 | 9,45 | 0,41 | 6,68 | 8,50 | 0,02 | 7,37 | 9,47 | 1,47 |
| 8,07 | 10,10 | 1,41 | 8,12 | 10,00 | 0,05 | 7,85 | 9,80 | 0,28 |
| 8,91 | 11,20 | 1,50 | 8,94 | 11,00 | 0,05 | 3,50 | 4,38 | 0,24 |
| 10,31 | 13,20 | 1,44 | 9,15 | 11,70 | 0,03 | 4,33 | 5,35 | 1,36 |
| 2,80 | 4,20 | 1,52 | 9,93 | 12,76 | 0,02 | 5,10 | 6,55 | 1,13 |
| 3,73 | 5,30 | 1,85 | 11,20 | 13,99 | 0,14 | 5,51 | 6,95 | 1,47 |
| 4,71 | 6,47 | 0,74 | 11,66 | 14,33 | 1,26 | 2,49 | 3,22 | 0,94 |
| 5,13 | 7,10 | 1,05 | 2,57 | 3,03 | 1,39 | 2,75 | 3,48 | 0,59 |
| 5,72 | 7,57 | 1,49 | 3,60 | 4,80 | 0,75 | 2,93 | 3,82 | 1,24 |
| 6,22 | 8,20 | 1,40 | 4,06 | 5,40 | 0,11 | 3,25 | 4,16 | 1,19 |
| 6,49 | 8,67 | 0,53 | 4,49 | 6,00 | 0,09 | 3,90 | 4,98 | 0,55 |
| 7,21 | 9,43 | 1,36 | 5,96 | 8,00 | 0,67 | 4,77 | 5,78 | 1,50 |
| 7,45 | 9,83 | 1,23 | 7,48 | 9,70 | 0,22 | 5,27 | 6,26 | 1,35 |
| 7,70 | 10,27 | 1,34 | 8,36 | 10,77 | 0,47 | | | |
| 2,29 | 3,45 | 1,47 | 1,93 | 2,75 | 1,15 | | | |
| 2,72 | 3,85 | 1,25 | 4,91 | 6,50 | 1,33 | | | |
| 3,01 | 4,38 | 0,97 | 5,70 | 7,60 | 1,46 | | | |
| 3,43 | 4,90 | 1,50 | | | | | | |
| 3,77 | 5,30 | 1,48 | | | | | | |
| 4,14 | 5,68 | 1,33 | | | | | | |

Tableau 3.37 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (10 mm) de lapent positive

| Rugosité 10 mm | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|------|----------------------------|-------|------|----------------------------|-------|------|
| tang (α) = 0 ,005 | | | tang (α) = 0 ,010 | | | tang (α) = 0 ,015 | | |
| F ₁ | Y | K | F ₁ | Y | K | F ₁ | Y | K |
| 6,72 | 9,10 | 1,08 | 6,61 | 8,50 | 0,06 | 5,45 | 6,85 | 0,06 |
| 7,00 | 9,50 | 1,12 | 6,98 | 9,50 | 1,23 | 6,48 | 8,25 | 0,09 |
| 7,55 | 10,10 | 1,38 | 7,70 | 10,13 | 0,39 | 8,38 | 10,80 | 0,06 |
| 8,07 | 10,87 | 1,40 | 3,19 | 4,15 | 1,45 | 8,88 | 11,45 | 0,04 |
| 8,40 | 11,23 | 1,10 | 3,55 | 4,50 | 0,67 | 9,40 | 12,20 | 0,11 |
| 8,60 | 11,47 | 1,01 | 3,90 | 4,95 | 0,47 | 10,20 | 13,20 | 0,01 |
| 2,64 | 3,38 | 1,45 | 5,03 | 6,48 | 0,52 | 10,80 | 13,80 | 0,24 |
| 2,89 | 3,61 | 1,60 | 5,35 | 6,93 | 0,54 | 11,80 | 14,59 | 0,81 |
| 4,70 | 6,20 | 1,43 | 5,61 | 7,18 | 0,18 | 4,27 | 5,27 | 0,06 |
| 5,10 | 6,75 | 1,40 | 5,81 | 7,50 | 0,31 | 5,99 | 7,80 | 0,53 |
| 5,65 | 7,43 | 1,38 | 6,33 | 8,18 | 0,19 | 7,68 | 9,90 | 0,14 |
| 5,91 | 7,83 | 1,50 | 4,25 | 5,42 | 0,71 | 3,68 | 4,70 | 0,95 |
| 5,09 | 6,75 | 1,36 | 4,55 | 5,92 | 0,89 | 4,74 | 6,00 | 0,35 |
| 5,41 | 7,10 | 1,49 | | | | 2,55 | 3,04 | 0,62 |
| 5,65 | 7,43 | 1,43 | | | | 2,80 | 3,50 | 1,26 |
| 5,90 | 7,83 | 1,50 | | | | 3,08 | 3,84 | 0,96 |
| 6,20 | 8,28 | 1,48 | | | | | | |
| 3,40 | 4,40 | 1,02 | | | | | | |
| 4,12 | 5,28 | 0,99 | | | | | | |

Tableau 3.38 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (12 mm) de lapent positive

| Rugosité 12 mm | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|------|----------------------------|-------|------|----------------------------|-------|------|
| tang (α) = 0 ,005 | | | tang (α) = 0 ,010 | | | tang (α) = 0 ,015 | | |
| F _l | Y | K | F _l | Y | K | F _l | Y | K |
| 3,70 | 4,80 | 1,26 | 3,20 | 4,23 | 1,41 | 7,91 | 10,23 | 0,44 |
| 3,95 | 5,60 | 1,46 | 5,45 | 7,30 | 1,34 | 8,43 | 10,77 | 0,13 |
| 4,73 | 6,55 | 1,48 | 6,16 | 8,05 | 1,33 | 8,82 | 11,20 | 0,10 |
| 5,98 | 8,35 | 1,47 | 6,83 | 9,00 | 1,40 | 9,35 | 11,53 | 0,51 |
| 6,72 | 9,20 | 3,85 | 7,92 | 10,35 | 0,87 | 4,20 | 5,38 | 1,10 |
| 7,35 | 9,95 | 1,23 | 8,60 | 11,20 | 0,69 | 4,37 | 5,70 | 1,41 |
| 7,87 | 10,70 | 1,33 | 10,32 | 13,23 | 0,06 | 4,81 | 6,18 | 0,98 |
| 8,95 | 12,20 | 1,40 | 10,50 | 13,73 | 0,59 | 5,17 | 6,58 | 0,58 |
| 9,45 | 12,95 | 1,49 | 11,00 | 14,33 | 0,43 | 5,35 | 7,00 | 1,08 |
| 10,28 | 13,90 | 1,23 | 2,04 | 3,00 | 1,51 | 6,18 | 7,75 | 0,11 |
| 10,58 | 14,30 | 1,32 | 2,36 | 3,33 | 1,37 | 6,54 | 8,15 | 1,08 |
| 11,00 | 14,90 | 1,50 | 2,81 | 3,85 | 1,08 | 1,78 | 2,06 | 1,02 |
| 2,60 | 3,67 | 1,48 | 3,45 | 4,80 | 1,27 | 2,13 | 2,72 | 1,99 |
| 3,00 | 4,10 | 1,50 | 3,85 | 5,00 | 0,60 | 2,49 | 3,08 | 1,19 |
| | | | 4,67 | 6,00 | 0,48 | 2,72 | 3,54 | 1,76 |
| | | | | | | 3,12 | 3,94 | 1,09 |

Le tableau (3.34 à 3.38) montre que le coefficient de correction k est sans aucun doute une valeur constante. En éliminant quelques valeurs extrêmes, la moyenne arithmétique de toutes les valeurs de k donne la constante ($\pm 0,92$). Obtenues en introduisant les données expérimentales dans la relation (3.43).

Pour valider l'équation semi-théorique (3.39), celle-ci est comparée au nombre de Froude expérimental calculé en appliquant la relation (3.44)

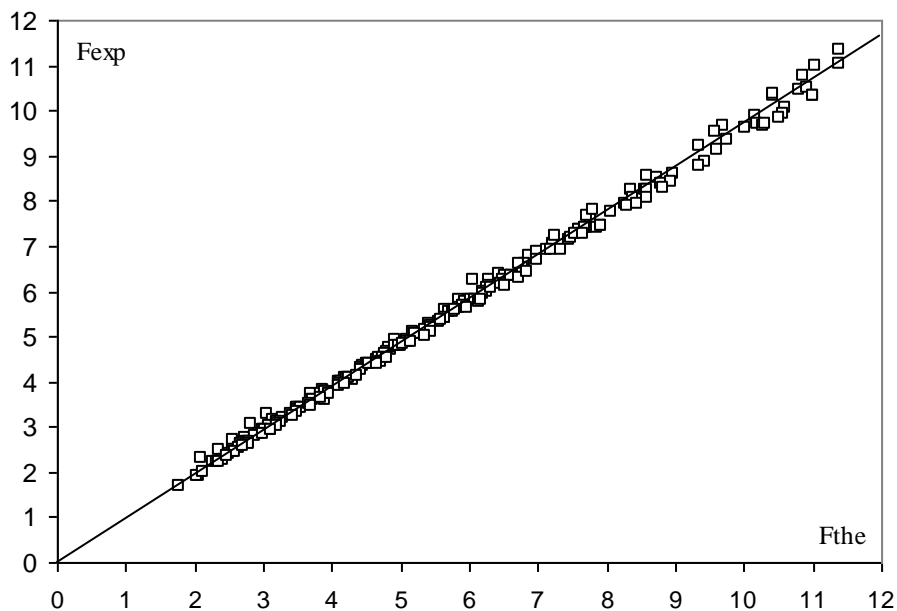


Figure 3.38 : Variation du nombre de Froude expérimental $F_{l\text{exp}}$ en fonction du nombre de Froude théorique $F_{l\text{th}}$ calculée selon la relation (3.43). (—) Première bissectrice d'équation : $F_{l\text{exp}} = F_{l\text{th}}$.

III.7.CONCLUSION :

Aux fins de l'investigation théorique, nous avons présenté un développement théorique dans le but d'exprimer la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, Cr) = 0$ pour le saut hydraulique qui était contrôlé par un seuil mince et dont on observait qu'il évoluait dans un canal avec une section rectangulaire qui avait une variable de pente positive. Permettant la formation d'une relation qui n'est que partiellement théorique. Ceci a été rendu possible par application de l'équation de quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut hydraulique. Pour $\alpha=0$, la relation théorique (3.39) obtenue conduit à la relation (3.40) du ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal rectangulaire. Cette dernière considération confirme en quelque sorte la validité du développement théorique entreprise. au cours de l'analyse de l'expérience, les mesures effectuées ont permis d'estimer le coefficient de correction k , défini comme le rapport du volume réel au volume calculé du ressaut.

En fait, une valeur moyenne cohérente de $k = 0,92$ a été découverte pour les quatre (4) pentes étudiées.

Du fait que les écarts relatifs entre le nombre de Froude théorique et son homologue expérimental Sont, pour la plupart, moins de 5 %, nous pouvons en tirer la conclusion que la connexion (3.38), que nous avons établi avant, est digne de confiance.

De plus la relation générale (3.38), qui existe sous une forme implicite concernant le rapport Y des hauteurs Conjuguées, nécessite l'emploi d'une procédure itérative pour être appliquée. Ceci nous a conduit à proposer de remplacer la relation (3.38) par une relation d'approximation explicite (3.5) pour déterminer facilement le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal. Comparaison de la relation approchée (3.5) avec la relation théorique (3.38). Par rapport à la relation implicite, la relation (3.5) génère le plus d'écarts relatifs inférieurs à 5 %.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Cette partie de notre travail porte sur notre contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à parois minces évoluant dans un canal rectangulaire à pente variable fond rugueux.

Nous avons pu diviser cette section en trois parties ; le premier chapitre décrit le modèle expérimental, qui sert de base à l'investigation expérimentale, les instruments de mesure utilisés sont donc évoqués en profondeur, étudier ensuite le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à fond rugueux.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse résultats expérimentaux obtenus, ça vient à dire de déterminer expérimentalement l'effet de la pente du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique, que l'on ne peut trouver théoriquement, à savoir la longueur du ressaut et la longueur du rouleau de surface. Il a été montré que l'inclinaison du canal, n'a pas d'influence sur les relations $\lambda_j(F_1) S = s/h_1$ et $\lambda_r(F_1)$. En outre, l'analyse statistique des mesures expérimentales a montré que les deux relations suivent une loi de type linéaire.

L'analyse théorique, consiste à déterminer le coefficient K, également appelé facteur de correction. K est défini comme le rapport du volume réel au volume calculé de la quantité d'eau affectée par le ressaut.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats expérimentaux. L'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire pente incline à fond rugueuses, a été conduite pour cinq rugosités absolues, à savoir : (ϵ mm) = (00 ; 6 ; 08, 10 et 12) .en faisant les différentes rugosités préparées au laboratoire et d'un angle positif avec l'horizontal (0; 0,5 ;1 et 1,5), l'expérimentation a été menée sous cinq ouvertures de hauteurs : $h_1 = 2$ cm, 3cm, 4 cm, 5 cm et 6 cm, avec plusieurs seuils.

L'investigation expérimentale s'est alors concentrée sur la détermination de l'évolution du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, noté par la formule $Y=h_2/h_1$, en fonction du nombre de Froude d'incidence, On à découvert que le rapport des hauteurs conjuguées augmente avec une augmentation du nombre de Froude, mais il diminue avec une augmentation de la rugosité du canal et une pente relativement modérée. De plus, l'ajustement statistique des points de mesure a permis d'arriver, avec une corrélation assez forte, à une équation linéaire couplant Y, F_1 , et ϵ . Ceci a été rendu possible par le fait que l'ajustement statistique des points de mesure.

Dans un second temps, nous avons abordé la variation de la longueur relative L_j/h_1 . Il y avait une large gamme de débit et de nombre de Froude. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'évolution de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude pour les cinq valeurs de rugosité étudiées en changeant à chaque fois l'angle du canal.

Il a été découvert que la rugosité du fond a un effet qualitatif sur la longueur relative L_j/h_1 . En fait, la longueur relative L_j/h_1 croît lorsque le nombre de Froude augmente. Aussi, étant donné le même nombre de Froude incident, la longueur relative L_j/h_1 du ressaut diminue en fonction de l'importance de la rugosité testée par rapport à l'inclinaison du canal.

L'étude expérimentale s'est intéressée ensuite à la variation de la hauteur relative du seuil du ressaut S/h_1 en fonction du nombre de Froude incident et de la rugosité. Il a été déterminé que le rapport des hauteurs conjuguées augmente à mesure que le nombre de Froude augmente et diminue à mesure que la rugosité augmente. De plus, la modification statistique des points de données a permis de dériver une équation linéaire entre S/h_1 , F_1 , et ε avec un degré raisonnable de corrélation.

L'étude expérimentale s'est intéressée ensuite à la dissipation de l'énergie cinétique. Finalement, on peut conclure que le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire pente inclinée fond rugueux présente un effet réducteur perceptible dans les caractéristiques hydrauliques.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Il est nécessaire de disposer d'un bassin de dissipation pour pouvoir disperser l'énergie cinétique créée par un écoulement torrentiel situé en aval d'un ouvrage hydraulique. En effet, la dissipation d'énergie par ressaut hydraulique s'avère être la méthode à la fois la plus pratique et la moins coûteuse. La formation de ce phénomène hydraulique est obtenue en positionnant une obstruction dans l'écoulement de l'eau. Les variations des conditions d'écoulement en amont ou en aval peuvent conduire à la formation d'une variété de configurations de saut différentes.

Notre étude concerne la contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à Paroi mince, évoluant dans un canal rectangulaire pente incline à fond rugueux.

Il était nécessaire d'avoir deux éléments clés :

Une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine de recherche, et une deuxième partie qui a concerné notre propre contribution.

La première partie a été subdivisée en trois chapitres :

- La première section de cette bibliographie permet de passer en revue les principaux ouvrages sur l'évolution de l'hydraulique dans un canal rectangulaire à pente zéro.
- Le second chapitre de cette partie, s'est intéressé au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond rugueux
- Le troisième chapitre, s'est intéressé au ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire à fonds rugueux incline.
- Pour le premier chapitre de la partie bibliographique nous avons abordé pour le cas du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire : Le ressaut hydraulique classique.

Nous nous sommes concentrés sur la catégorisation de (Bradley et Peterka, 1957) du ressaut hydraulique classique, qui ont classifié le ressaut hydraulique basée sur le nombre de Froude du flux incident F_1 .

Dans un second temps nous avons passé en revue l'étude de (Hager, 1990) Pour le ressaut hydraulique classique, relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. Nous avons montré que la relation de Bélanger, qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, peut être obtenue en appliquant l'équation de quantité de mouvement entre ses sections initiale et finale en négligeant les pertes de charge autre que celui dû au ressaut.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le deuxième chapitre de la partie bibliographique nous avons abordé pour le cas du ressaut hydraulique incliné : la pente positive et la pente négative

Pour le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente positive, nous avons montré que la première étude complète du ressaut hydraulique incliné a été menée par (Bakhmeteff et Matzke, 1936), qui ont discuté dans leur travail du profil de surface, de la durée du ressaut et de la distribution des vitesses. De plus, (Kindsvater, 1944) a classé les ressauts inclinés pente positive en quatre catégories principales, à savoir les types A, B, C et D. En plus de cela, il a suggéré une méthode pour calculer le rapport des hauteurs conjuguées pour le saut de type C.

Parmi les chercheurs qui ont étudié le problème du ressaut hydraulique négative (McCorquodale et Mohamed, 1994), ont abordé le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente négative, où il a été étudié le cas limite d'existence du ressaut. Les auteurs attestent du fait que ce type particulier de ressaut est extrêmement sensible à tout changement dans les profondeurs conjuguées pour les nombres de Froude $F_1 < 4$.

Par ailleurs, l'étude bibliographique a abordé le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente positive. Où les recherches menées par (M. Debabeche *et al.*, 2009) a été présentée. Cette recherche a porté sur l'étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. Une relation générale liant déterminé que le rapport des profondeurs conjuguées, Y , est proportionnel au nombre de Froude, F_1 , et à l'inclinaison, du canal. Le but de l'expérience était également de mesurer les longueurs de saut et de roulis de surface, deux caractéristiques déterminantes d'un ressaut hydraulique, et de démontrer que la pente du chenal n'avait pas d'effet significatif sur ces relations $\lambda(F_1)$ et $\lambda_r(F_1)$.

Le dernier chapitre de la partie bibliographique a concerné l'étude du ressaut hydraulique en canal rectangulaire à fond rugueux nous avons basé sur les résultats expérimentaux obtenus par (Rajaratnam, 1968) La rugosité relative s'avère être une caractéristique essentielle lorsqu'on considère la situation du canal rectangulaire à fond rugueux. De plus, il a été démontré comment la longueur relative du ressaut hydraulique, désignée par le symbole L_{rh2} , varie avec le nombre de Froude incident, F_1 . On peut en déduire que L_{rh2} est très proche de la valeur 3.0. On a remarqué que la longueur du ressaut sur un lit avec des ondulations est d'environ la moitié de celle de son homologue, le ressaut traditionnel.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La deuxième partie a été divisée en trois chapitres :

- Description du modèle expérimental, étudier ensuite le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à fond rugueux ;
- Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus dans un canal incliné avec analyse théorique;
- Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats expérimentaux dans un canal rectangulaire à pente inclinée à fond accidenté, suivi d'une analyse théorique;
- Dans un premier temps nous avons présenté le modèle expérimental utilisé et les appareils de mesure ainsi que le protocole expérimental utilisé à l'expérimentation.

Deux types de ressauts, le ressaut contrôlé à fond lisse et le ressaut à fond rugueux, ont été analysés expérimentalement. En effet, il a été découvert que les longueurs relatives du bassin et l'emplacement à la rugosité du fond sont peu dépendants pour les deux configurations de projection. Pour les deux sauts, ils peuvent être écrits sous forme de fonctions linéaires : $L_j = f(F_1)$.

Les longueurs maximales sont obtenues avec la projection inférieure lisse et sous contrôle, tandis que les longueurs minimales sont obtenues avec la projection inférieure rugueuse et incontrôlée. La fonction $= f(F_1)$ définit le rendement de dissipation, qui augmente comme avec F_1 . Les fonds lisses ne sautent pas aussi haut que les fonds rugueux, mais les fonds rugueux sont globalement plus efficaces. Pour cette raison, les avantages de la projection grossière à fine seraient les plus grands.

Le deuxième chapitre a abordé deux parties relatives à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal de section droite rectangulaire à pente positive fond lisses.

Pour la première partie de notre contribution, nous avons examiné les caractéristiques du ressaut hydraulique, notamment le rapport des hauteurs combinées $Y = h_2/h_1$, la longueur relative du ressaut L_j/h_1 , la longueur relative du rouleau L_r/h_1 , et la hauteur relative du seuil S/h_1 en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident F_1 . En effet, les résultats des recherches expérimentales ont démontré que la fluctuation du rapport S par rapport au nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident obéit à une loi de type linéaire. L'expérience avait également pour objectif secondaire de déterminer les longueurs typiques des sauts hydrauliques. Il a été démontré que les relations entre (F_1) et r ne sont pas affectés par l'inclinaison du canal (F_1) .

L'analyse statistique des données expérimentales a révélé que les deux associations sont linéaires. De plus, la dissipation de l'énergie cinétique était importante pour l'étude

CONCLUSION GÉNÉRALE

expérimentale qui a été menée. Le fait que l'efficacité du ressaut hydraulique varie en fonction du nombre de Froude qui lui est incident démontre que la pente du canal ne favorise pas la perte d'énergie.

La deuxième partie a été consacré à un développement théorique exprimant la relation fonctionnelle $F_1 = f(Y, \lambda, \alpha) = 0$. Cette approche a mené à l'établissement d'une relation semi-théorique. Cela a été rendu possible en utilisant l'équation de quantité de mouvement entre les parties aval et amont du saut hydraulique, ce qui a permis de diriger le flux d'eau dans la direction souhaitée. Dans la deuxième étape du processus, une étude expérimentale de la connexion semi-théorique a été réalisée. En effet, les données expérimentales ont permis d'estimer le coefficient de correction k , ce qui a été un succès. Les quatre pentes qui ont été étudiées avaient toutes la même valeur moyenne, qui s'est avérée être de 0,59.

Il est raisonnable de conclure que le lien théorique qui a été établi est crédible puisque les écarts relatifs entre le nombre de Froude théorique et son homologue expérimental sont dans leur majorité inférieure à 5 %. Une relation approchée explicite en Y a été proposée, qui permet de déterminer le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal. Cette relation a été développée afin que le rapport des hauteurs conjuguées puisse être calculé.

Le troisième chapitre de notre thèse de doctorat a concerné l'analyse théorique et expérimentale du ressaut hydraulique évoluent dans un canal rectangulaire incliné à fond rugueux, également d'un point de vue théorique et expérimentale. Pour l'étude expérimentale on a trouvé une relation approchée explicite en remplacement à la relation semi théorique très implicite, préalablement trouvé. Celle-ci permet de trouver le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient C_r de résistance du fond du canal, et du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. D'autre part, nous avons pu évaluer la relation liant le coefficient C_r de résistance et la rugosité absolue (ϵ), et l'expression semi théorique, devient de la forme $f(y, F_1, C_r, \alpha)$.

A travers l'étude expérimentale du dernier chapitre précédent, le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à fond rugueux a été étudié expérimentalement. Ensuite, cinq rugosités correspondantes ont été évaluées : (ϵ mm), 0, 6, 8, 10 et 12. Des expériences ont été menées pour chacune des rugosités correspondantes sous cinq hauteurs d'ouverture et une large gamme de vitesses d'écoulement et de nombres de Froude. Nous avons d'abord examiné la longueur relative du ressaut L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude incident F_1 pour cinq niveaux de rugosité. cinq nuages de points ont été observés, chacun correspondant à une valeur de rugosité bien définie, illustrant comment la rugosité affecte la longueur relative

CONCLUSION GÉNÉRALE

du ressaut L_j/h_1 et le nombre de Froude incident F_1 . Le nombre de Froude F_1 semble augmenter la longueur relative L_j/h_1 .

De plus, un réglage de type puissance est réalisable entre L_j/h_1 et F_1 comme le montre l'analyse statistique des points de mesure expérimentale du saut hydraulique contrôlé dans un canal rectangulaire inline à fond rugueux.

Néanmoins, nous avons également mené une expérience pour enquêter comment la hauteur relative du seuil S/h_1 a changé en fonction du Froude F_1 .

De plus, la dissipation de l'énergie cinétique était importante pour la recherche expérimentale qui a été réalisée. Le rendement est destiné à illustrer ce concept. En conséquence, la fluctuation de l'efficacité du saut hydraulique en fonction du nombre d'incidents de Froude démontre que le saut dans notre canal est capable de mieux absorber l'énergie lorsque la rugosité augmente.

En conclusion, notre enquête expérimentale s'est axée sur le profil généralisé du saut, qui démontre la nature compacte du saut hydraulique.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Achour, B., Debabeche, (2003). Ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en U, J. Hydraulic Research Vol. 41, No. 3, pp. 97-103

Achour, B., Debabeche, M., (2003), Ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en U, J. Hydraulic Research, vol. 41, N0.3, pp.319-325.

B

Bakhmeteff, B. A., Matzke, A E, (1936). The Hydraulic Jump terms of dynamic similarity, Transactions, American society of civil engineers, Vol.101, pp, 630-647.

Belanger, J.B., (1828). Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes, Carilian-Goeury, Paris.

Bradley, J.N., Peterka, A.J., (1957), The hydraulic design of stilling basins : Hydraulic jumps on a horizontal apron, paper 1401, proc. Amer. Soc. Civ. Engrs., J. Hydraulic. Division, Vol.83, HY5.

Bretz, N., V., (1988). Ressaut Hydraulique Forcé par seuil, Laboratoire de constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, Communication No. 2.

C

Cherhabil, S., (2010), Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à pente variable, Doctorat en sciences, Département de Génie Civil et Hydraulique, Université de Biskra.

D

Darcy, H., azin, H. (1865). Recherches hydrauliques : Recherches expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts. 1ère partie (Vol. 1) : Impr Impériale.

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

Debabeche, M., Achour, B., (2007), Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel, J. Hydraulic Research Vol. 45, No. 1, pp. 135–139.

Debabeche, M., Cherhabil, S., Hafnaoui, A. et Achour, B. (2009), Hydraulic jump in a sloped triangular channel, Can. J. Civ; Eng. 36 : 655-658 (2009).

G

Ghomri, A., (2005), Ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant en canal profilé en "U", Mémoire de Magister en Sciences Hydrauliques, Département d'Hydraulique, Université de Biskra.

Ghomri, A., Debabeche, M., Riguet, F., (2009). l'étude semi théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en U à fond rugueux, Revues des sciences fondamentales et appliquées, centre universitaire d'Oued Souf, No 01, pp.40-57.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ghomri, A., Kateb, S., Riguet, F. (2018). contribution a l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire a pente variable.

H

Hachemi Rachedi, L. (2006). *Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale*. Université Mohamed Khider-Biskra.

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, 1985, Vol. 24, pp. 207-215, 1986.

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

Hager, W.H., Bretz, N.V., (1988), Sill-controlled stilling basin, the international symposium on hydraulics for high dams, 273-280.

Hager, W.H., Bretz, N.V., (1988), Sill-controlled stilling basin, the international symposium on hydraulics for high dams, 273-280.

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

K

Kateb, S., Ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal triangulaire à parois rugueuses, Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2006.

Kindsvater (1944). The hydraulic jump in sloping channels. 109(1), 1107-1120

M

Mc Corcodal, 1994, Journal of Hydraulic Research, VOL. 32, 1994, NO.1; 119-130.

N

Nouacer, B., Kateb, S., & Abd Elouahed. (2021). experimental approach to the length of the threshold-controlled hydraulic flow in a rectangular channel with a rough bottom : experimental approach to the length of the threshold-controlled hydraulic flow in a rectangular channel with a rough bottom. 13(1), 648-661.

O

Ohashi et al. (1973) : Design of Combined Hydraulic Jump and Ski-Jump Energy Dissipator of Flood Spillway. XIII ICOLD Congress Madrid Q.41, R.19 : 311-333

Ohtsu, I., et Yasuda, (1991). Hydraulic jump in sloping channels. 117(7), 905-921

Okada, A., et Aki, S. (1955). Experimental study of hydraulic jump on reversed slope apron. J. Tech. Lab., 5(6), Tokyo (in Japanese).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

P

Pagliara, S. et peruginelli, A. 2000, Journal of Hydraulic Engineering/ November 2000/ 847-850.

R

Rajartnam, N. (1963) : Discussion to "General Solution of the Hydraulic Jump in sloping Channels" by P.A. Argyropoulos. Proc. ASCE, J. Hydraulics Division 89(HY1) : 258-261.

Rajaratnam, N., (1966), Hydraulic jump in sloping channel, J. irrigation and Power (India), 23(Apr) : pp.137-149, Discussion, 1967, 24(Jump) : pp.285-293.

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

Rajaratnam, N., Subramania, K., (1968, 1969, 1970), Profil of the hydraulic jump, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, vol. 94, 1968, HY3 663-673; vol. 95, 1969, HY1 546-557, HY2 725-727; vol. 96, 1970, HY2 579-581

Rajaratnam, N., Murahari,(1974). Flow characteristics of sloping channel jumps. *100*(6), 731-740.

Rajaratnam, N., (2002)., Hydraulic jumps on corrugated beds. J Hydraulic Engineering. ASCE 128 (7), 656-336.

Rand, W., (1957), An approach to generalised design of stilling basin, Trans. New-York, Academy of Sciences, Vol. 20(2), 173-191.

S

Safranez, K.M. (1927). Wechselsprung und die energievernichtung des wassers. Verlag nicht ermittelbar

Safranez, K. (1929). Un tersuchungen Uber den Wechselsprung. Bauingenieur 10(37) : 649-651 :

Sinniger, R., Hager, W. H. (1988). *Constructions Hydrauliques-Ecoulements Stationnaires* (Wasserbau-Stationäre Abflüsse) : Presse Polytechnique de la Suisse Romande.