

Université Mohamed Khider-Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique
Ref :



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

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Spécialité : Hydraulique

Option : Hydraulique

Présenté par :

BOURICHE Fouzi

Thème

DISTRIBUTION DES VITESSES DES RESSAITS HYDRAULIQUES DANS DES CANAUX A CIEL OUVERT

Soutenue le : .. / .. / 2024 devant le jury composé de :

Mr OUAMANE Ahmed	Professeur	Président	Université de Biskra
Mr DEBABECHE Mahmoud	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Mr REMINI Boualem	Professeur	Examineur	Université de Blida
Mr BERREKSI Ali	Professeur	Examineur	Université de Bejaia

اهداء

الى روح ابي العزيز الطاهرة رحمة الله عليه حبا وتقديرا وامتنان له لما
اسداه لي من دعم في الحياة.

الى روح والدتي العزيزة الطاهرة رحمة الله عليها من اعطتني وعلمتني
الحب والحنان.

الى من كانوا دعما وسندا لي، اخوتي الأعمام بن مهدي ومحمد نبيل
ونصر الدين وغنية وسعاد اطال الله في اعمارهم. الي اخوتي اللدين لم
تلدهم امي عبد الصمد والعربي.

الى شريكتي في الحياة ورفيقة دربي، زوجتي التي كان صبرها معي بمثابة
الدعم المعنوي.

الي ولداي احبائي أبو القاسم و ألفة حفصهم الله و رعاهم و وفقهم في
حياتهم.

الي كل من ساندني و لو بالقليل من بعيد او من قريب.

Remerciements

Je tiens à remercier Dieu Tout-Puissant, avant tout, pour cette bénédiction qui m'a amené à ce niveau de réussite.

Je voudrais dans un premier temps exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de Thèse, Debabeche Mahmoud, professeur à l'université de Biskra, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à l'achèvement de ma thèse.

Je souhaite exprimer ma sincère gratitude envers Monsieur Ouamane Ahmed, professeur à l'université de Biskra, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury de soutenance.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à Monsieur Boualem Remini, professeur à l'université de Blida, pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers Monsieur Berreksi Ali, professeur à l'université de Bejaia, d'avoir participé en tant que membre du jury.

Mes remerciements sincères vont à Monsieur Djeddou Messaoud, professeur à l'université Oum El-Bouaghi, pour son soutien et sa contribution à la réalisation de mon article.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les enseignants du département hydraulique de l'université de Biskra et les membres du laboratoire LAHE, en particulier au Pr. Ouamane Ahmed, Pr. Labadi Abdalah, Pr. Zerarka Fawzi, Dr. Bassem Athmani, Dr. Mohamed Yagoub et Dr. Abdessalem Issam, qui n'ont ménagé aucun effort tout au long de la réalisation de ma thèse de doctorat.

Enfin, mes plus vifs remerciements vont à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Abstract

The present thesis constitutes a relevant contribution in the broader context of research on velocity distribution in river flows as well as in compound channels. It also represents a crucial source of information for the design and stabilization of canals, flood management, and hydraulic development projects. This study focuses on a theoretical and experimental approach to the distribution of average horizontal velocities in two types of hydraulic jumps, namely the jump controlled by a thin threshold and the forced jump of type "A", also by thin thresholds, evolving in a channel composed of a trapezoidal shape (major bed) with a rectangular base (minor bed) and zero slope. This work begins with bibliographic research exploring the types of hydraulic jumps used in this study by seeking the functional relationships between these characteristics. The experimental study then concentrates, in the first part, on the presentation and analysis of the results of the measurements of horizontal average velocities, exploring the behavior of the jump, particularly in the roll region. Based on these results obtained, we will undertake the evaluation of the correlation between relative velocities ($U^* = U_i/U_1$) and relative positions ($X^* = X/L_j$), in order to establish a functional relationship ($U^* = f(X^*)$) using the least squares statistical method. The robustness of the relationship between these two dimensionless parameters (very high R^2 , oscillating between 0.73 and 0.98) allowed us to attribute a universal use of these ratios of relative velocities (U^*) and relative positions (X^*). This will make it possible to determine the speeds according to their positions, referring to the percentages presented in this study. These relative ratios are linked to the initial speed values (U_1) and the length of the jump (L_j). This approach is applicable independently of the specific hydraulic and geometric characteristics of the jumps considered ($Q, U_1, H_1, H_s, L_s, L_r, L_j$), whether it is a controlled or forced jump of type "A" in a channel composed of the same section shape as that used in our study.

Keywords: Controlled hydraulic jump, Forced hydraulic jump type "A", Jump length, Compound channel, Initial velocity, Horizontal average velocity, Relative velocity, Relative position.

RESUME.

La présente thèse constitue une contribution dans le contexte plus vaste de la recherche sur la distribution des vitesses dans les écoulements fluviaux ainsi que dans les canaux composés. Il représente également une source d'information pour la conception et la stabilisation des canaux, la gestion des crues et les projets d'aménagement hydraulique.

Cette étude, se focalise sur une étude théorique et expérimentale de la distribution des vitesses moyennes horizontales dans deux types de ressauts hydrauliques, à savoir le ressaut contrôlé par seuil mince et le ressaut forcé de type "A" également par seuils minces, évoluant dans un canal composé de forme trapézoïdale (lit majeur) à base rectangulaire (lit mineur) et de pente nulle.

Ce travail commence par une recherche bibliographique explorant les types de ressauts hydrauliques utilisés dans cette étude en cherchant les relation fonctionnelle entre ces caractéristiques, puis par une étude expérimentale qui se concentre en première partie, sur la présentation et l'analyse des résultats des mesures des vitesses moyennes horizontales en explorant le comportement du ressaut notamment dans la région du rouleau. Sur la base des résultats obtenues, nous avons entrepris l'évaluation de la corrélation entre les vitesses relatives ($U^* = U_i/U_1$) et les positions relatives ($X^* = X/L_J$), afin d'établir une relation fonctionnelle ($U^* = f(X^*)$) en utilisant la méthode statistique des moindres carrés. La robustesse de la relation entre ces deux paramètres adimensionnels (R^2 très élevés, oscillant entre 0.73 et 0.98) nous a permis d'attribuer une utilisation universelle de ces rapports des vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*). Cela permettra de déterminer les vitesses en fonction de leurs positions, en se référant aux pourcentages présentés dans cette étude. Ces rapports relatifs sont liés aux valeurs de vitesse initiale (U_1) et à la longueur du ressaut (L_J).

Cette approche est applicable indépendamment des caractéristiques hydrauliques et géométriques spécifiques des ressauts considérés ($Q, U_1, H_1, H_S, L_S, L_R, L_J$), qu'il s'agisse d'un ressaut contrôlé ou forcé de type "A" dans un canal composé de la même forme de section que celle utilisée dans notre étude.

MOTS-CLÉS : Ressaut hydraulique contrôlé, Ressaut hydraulique forcé de type "A", Longueur du ressaut, Canal composé, Vitesse initiale, Vitesse moyenne horizontale, Vitesse relative, Position relative.

ملخص.

تشكل الأطروحة الحالية مساهمة ذات صلة في السياق الأوسع للبحث حول توزيع السرعة في تدفقات الأنهار وكذلك في القنوات المركبة. كما أنها تمثل مصدرًا مهمًا للمعلومات لتصميم وتثبيت القنوات وإدارة الفيضانات ومشاريع التهئية الهيدروليكية. تركز هذه الدراسة على المنهج النظري والتجريبي لتوزيع متوسط السرعات الأفقية في نوعين من القفزات الهيدروليكية، وهما القفز المتحكم فيه بواسطة عتبة رقيقة والقفز القسري من النوع "أ"، أيضا بواسطة عتبات رقيقة، تتطور في قناة مكونة من شكل شبه منحرف (سرير كبير) وقاعدة مستطيلة (سرير صغير) وانحدار صفر. يبدأ هذا العمل ببحث بيليوغرافي يستكشف أنواع القفزات الهيدروليكية المستخدمة في هذه الدراسة من خلال البحث عن العلاقات الوظيفية بين هذه الخصائص، ثم بدراسة تجريبية تركز في الجزء الأول على عرض وتحليل نتائج قياسات السرعات المتوسطة الأفقية، واستكشاف سلوك القفزة وخاصة في منطقة الاضطراب. بناءً على هذه النتائج التي تم الحصول عليها، سنجري تقييم الارتباط بين السرعات النسبية ($U^* = U_i/U_1$) والمواضع النسبية ($X^* = X/L_f$)، من أجل إقامة علاقة وظيفية ($U^* = f(X^*)$) باستخدام الطريقة الإحصائية للمربعات الصغرى. أتاحت لنا قوة العلاقة بين هاتين المعلمتين اللتين ليس لهما أبعاد (R^2 عالية جدًا، تتأرجح بين 0.73 و0.98) (الاستخدام الشامل لهذه النسب من السرعات النسبية (U^*) والمواضع النسبية (X^*) وهذا سيجعل من الممكن تحديد السرعات حسب مواقعها، وذلك بالرجوع إلى النسب المقدمة في هذه الدراسة. وترتبط هذه النسب بقيم السرعة الأولية (U_1) وطول القفزة (L_f) حيث ينطبق هذا الأسلوب بشكل مستقل عن الخصائص الهيدروليكية والهندسية المحددة للقفزات التي تم النظر فيها ($Q, U_1, H_1, H_s, L_s, L_r$)، سواء كانت قفزة متحكم بها أو قسرية من النوع "A" في قناة مكونة من نفس شكل المستخدم في دراستنا.

الكلمات المفتاحية: القفز الهيدروليكي المتحكم فيه، القفز الهيدروليكي القسري نوع "أ"، طول القفز، القناة المركبة، السرعة الأولية، السرعة المتوسطة الأفقية، السرعة النسبية، الموقع النسبي.

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Ressaut hydraulique dans les canaux composés

I.1	Introduction	5
I.2	Ressaut hydraulique dans un canal de section rectangulaire.....	6
I.2.1	Ressaut classique selon l'étude de Hager (1990)	6
I.2.2	Ressaut hydraulique contrôle par seuil mince selon l'étude de Forster et Skrinde	8
I.2.3	Ressaut hydraulique forcé par seuil mince selon l'étude de Rend (1957)	9
I.3	Ressaut hydraulique dans différents canaux de formes composés.....	11
I.3.1	Ressaut hydraulique dans un canal de section composé rectangle-rectangle.....	13
I.3.1.1	Etude de Khattaoui et Achour 2012	13
I.3.1.1.1	Rapport des hauteurs conjuguées.....	14
I.3.1.1.2	Rendement du ressaut	17
I.3.1.2	Etude de Riguet, (2021).....	18
I.3.1.2.1	Rapport des hauteurs conjuguées (Y) en fonction du nombre de Froude (F_1)	19
I.3.1.2.2	Rendement du ressaut hydraulique (η) en fonction du nombre de Froude (F_1)....	19
I.3.2	Ressaut hydraulique dans un canal composé de forme en 'U'	20
I.3.2.1	Etude de Hager, (1989)	21
I.3.2.1.1	Expérience et analyse	21
I.3.2.1.2	Les caractéristiques géométriques	22
I.3.2.2	Etude de Achour et Debabeche, (2003)	23
I.3.2.2.1	Caractérisation du ressaut hydraulique selon Achour et Debabeche, (2003)	25
I.3.2.2.2	Les conclusions déduites par Achour et Debabeche, (2003).....	25
I.4	Conclusion.....	26

Chapitre II : Les vitesses dans le ressaut hydraulique

II.1	Introduction	28
II.2	La distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique classique	29
II.2.1	Approche de Schröder (1963)	29
II.2.2	Approche de Rajaratnam et Subramanya (1968)	30
II.2.3	Approche de Hager (2013).....	31

II.2.4	Approche de Chen et al., (2014).....	35
II.2.4.1	Disposition expérimentale	36
II.2.4.2	Les vitesses des couches horizontales	38
II.2.4.3	Discussion des résultats	41
II.2.4.4	Analyse comparative	41
II.3	La distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique en canal profilé en ‘‘U’’ Selon l’approche de Debabeche, (2003).....	42
II.4	La distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique en canal de section triangulaire Selon l’approche de Debabeche, (1996).....	44
II.5	Conclusion.....	48

Chapitre III : Matériels et méthodes expérimentales

III.1	Introduction	49
III.2	Model expérimental.....	49
III.2.1	Description du canal	49
III.2.2	Les seuils à parois minces	51
III.3	Appareillages de mesure	52
III.3.1	Déversoirs de mesure de débit de l’écoulement	52
III.3.2	Mesure de la profondeur de l’écoulement ‘‘Limnimètre’’	53
III.3.3	Instruments de mesure des vitesses moyennes de l’écoulement	54
III.4	Protocole des essais	55
III.4.1	Ressaut hydraulique contrôlé par seuil a paroi mince	55
III.4.2	Ressaut hydraulique Forcé de type ‘‘A’’ par seuil à paroi mince	57
III.4.3	Opérations de mesure de la vitesse.....	57
III.5	Conclusion.....	59

Chapitre IV : Résultats et Analyses

IV.1	Introduction	60
IV.2	Ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince.....	61
IV.2.1	Présentation et analyse de la première série d’essais.....	61
IV.2.1.1	Distribution des vitesses dans des sections longitudinales.....	61
IV.2.1.2	Distribution des vitesses dans des sections transversales	66
IV.2.2	Présentation et analyse de la deuxième série d’essais	69
IV.2.2.1	Distribution des vitesses dans des sections longitudinales.....	69
IV.2.2.2	Distribution des vitesses dans des sections transversales	72
IV.3	Ressaut hydraulique forcé de type ‘‘A’’ par seuil a paroi mince.....	74
IV.3.1	Présentation et analyse de la première série d’essais.....	74
IV.3.1.1	Distribution des vitesses dans des sections longitudinales.....	74
IV.3.1.2	Distribution des vitesses dans des sections transversales	77

IV.3.2	Présentation et analyse de la deuxième série d'essais	78
IV.3.2.1	Distribution des vitesses dans des sections longitudinales	79
IV.3.2.2	Distribution des vitesses dans des sections transversales	82
IV.4	Conclusion.....	85

Chapitre V : Etude de la relation entre les vitesses relatives et les positions relatives

V.1	Introduction	87
V.2	Évaluation de la relation entre les vitesses relatives et les positions relatives dans un ressaut hydraulique Contrôlé.....	87
V.2.1	La première série d'essais	88
V.2.2	La deuxième série d'essais.....	94
V.3	Évaluation de la relation entre les vitesses relatives et les positions relatives dans un ressaut hydraulique Forcé de Type 'A'	100
V.3.1	La première série d'essais	100
V.3.2	La deuxième série d'essais	106
V.4	Discussion des résultats.....	112
V.5	Conclusion.....	114
	Conclusion générale	115

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma du ressaut hydraulique classique.	6
Figure 1.2 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger (1828).	7
Figure 1.3 : La variation du nombre de Froude (IF1) en fonction de la hauteur relative s/h_1 .	9
Figure 1.4 : Typologie du ressaut forcé.	10
Figure 1.5 : Hauteurs conjuguées $h_2/h_1 = f(S, K)$, $F1 = 9$.	11
Figure 1.6 : Composition de l'écoulement en trois dimensions dans un lit composé, d'après (Shiono and Knight, 1991).	12
Figure 1.7 : Schéma illustratif d'un canal de section rectangulaire composée	13
Figure 1.8 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit de Khattaoui et Achour (2012).	14
Figure 1.9 : Variation de Y, calculé par (1.5), en fonction de F1, (---) : $\beta = 1$ Khattaoui et Achour (2012).	17
Figure 1.10 : Variation de Y en fonction de F1. (o) : équation (1.5), (+) : équation (1.6), Khattaoui et Achour (2012).	17
Figure 1.11 : Variation de η en fonction de F1. (---) : $\beta = 1$.	18
Figure 1.12 : Variation de η en fonction de IF1. (o) : équation (1.35), (+) équation (1.34), Khattaoui et Achour (2012).	18
Figure 1.13 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F1, pour les trois configurations contrôlé par : () seuil mince, (Δ) seuil épais et (\circ) marche positive.	19
Figure 1.14 : Variation du rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F1, pour les trois configurations contrôlé par : () seuil mince, (Δ) seuil épais et (\circ) marche positive.	20
Figure 1.15 : Allure schématique de l'écoulement pour de petit y_1	22
Figure 1.16 : Géométrie de la section en forme de "U"	23
Figure 1.17 : Ressaut hydraulique à seuil épais dans un canal composé de forme en U	24
Figure 2.1 : Schéma de la coordonnée verticale du ressaut hydraulique Schröder (1963)	29
Figure 2.2 : La vitesse 'V' adimensionnelle en fonction de la composante verticale (z), Selon Schröder (1963).	30
Figure 2.3 : Distribution des vitesses U(z) dans la partie inférieure du ressaut	30
Figure 2.4 : Les vitesses U(Z), pour différentes longueurs adimensionnelle ($X = x/L$).	32
Figure 2.5 : Vitesse maximale inférieure relative (U_m) en fonction de la longueur relative X.	32

Figure 2.6 : Vitesse maximale supérieure relative U_s en fonction de la longueur relative X .	33
Figure 2.7 : Accroissement de la hauteur relative $\delta_o / (h_2 - h_1)$ en fonction de la longueur relative X .	33
Figure 2.8 : Vitesse de surface adimensionnelle pour $0 < x < L_r$ et $x > L_r$ ($X = x/L_r$, $f = V_s/V_t$)	34
Figure 2.9 : Vitesse relative $f = (V_f - V_2) / (V_1 - V_2)$ le long du fond en fonction de la coordonnée longitudinale relative x / L_r .	35
Figure 2.10 : Schéma de principe de l'installation d'essai	37
Figure 2.11 : Les vitesses horizontales des orifices de la couche supérieure	39
Figure 2.12 : Les vitesses horizontales des orifices de la couche inférieure	40
Figure 2.13 : Profil des vitesses moyennes horizontales du ressaut classique dans l'axe de symétrie du canal, pour différentes positions x (cm) : (\square)30, (\square)40, (\square)50, (\times)60, (\square)70, (\circ)90, (+)110. $h_1 = 2,3$ cm. $IF_1 = 5,35$. $L_j = 100$ cm, $h_2 = 9,6$ cm.	43
Figure 2.14 : Ressaut classique. Profil des vitesses moyennes horizontales dans l'axe de symétrie du canal, pour différentes positions x (cm).	43
Figure 2.15 : Ressaut classique en canal profilé en "U". Variation de la vitesse moyenne horizontale relative V_f/V_1 en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, pour huit positions x : x (cm).	44
Figure 2.16 : Les vitesses moyennes horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $x/L_r = 0,12$.	45
Figure 2.17 : Les vitesses moyennes horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $x/L_r = 0,2$.	45
Figure 2.18 : Les vitesses moyennes horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $x/L_r = 0,41$.	46
Figure 2.19 : Les vitesses moyennes horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $x/L_r = 0,65$.	46
Figure 2.20 : Les vitesses moyennes horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $x/L_r = 1,10$.	47
Figure 2.21 : Les vitesses moyennes horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $x/L_r = 1,23$.	47
Figure 3.1 : Photographie du modèle expérimental du canal	50
Figure 3.2 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal à base rectangulaire, ayant servi à l'expérimentation.	50
Figure 3.3 : Photographie de la forme du canal	51
Figure 3.4 : Photo des seuils minces avec leurs supports pour le ressaut contrôlé.	51

Figure 3.5 : Photo des seuils minces avec leurs supports pour le ressaut forcé de type "A".	52
Figure 3.6 : Photo du déversoir rectangulaire	53
Figure 3.7 : Photo des convergents	53
Figure 3.8 : Schéma illustratif du limnimètre	54
Figure 3.9 : Photo de la Micro moulinet et ses instruments annexes	55
Figure 3.10 : Ressaut contrôlé par seuil mince	56
Figure 3.11 : Photo d'un ressaut hydraulique contrôlé dans un canal trapézoïdal à base rectangulaire.	56
Figure 3.12 : Ressaut forcé type A par seuil mince.	57
Figure 3.13 : Système d'axes adoptés pour la mesure des vitesses	58
Figure 4.1 : La variation des vitesses " $U=f(X)$ " dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section longitudinale médiane $Y = - 0$ cm.	62
Figure 4.2 : La variation des vitesses " $U=f(X)$ " dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm.	63
Figure 4.3 : La variation des vitesses " $U=f(X)$ " dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = +4$ cm	63
Figure 4.4 : La variation des vitesses " $U=f(X)$ " dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = -8$ cm	64
Figure 4.5 : La variation des vitesses " $U=f(X)$ " dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = +8$ cm	64
Figure 4.6 : La variation des vitesses " $U=f(X)$ " dans les niveaux Z_3, Z_4 cm pour les sections longitudinales $Y = -10$ cm	65
Figure 4.7 : La variation des vitesses " $U=f(X)$ " dans les niveaux Z_3, Z_4 cm pour les sections longitudinales $Y = +10$ cm	65
Figure 4.8 : La variation des vitesses " $U=f(Y)$ " dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections transversales $X = 120$ cm	66
Figure 4.9 : La variation des vitesses " $U=f(Y)$ " dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections transversales $X = 140$ cm	66
Figure 4.10 : La variation des vitesses " $U=f(Y)$ " dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 160$ cm	67
Figure 4.11 : La variation des vitesses " $U=f(Y)$ " dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 220$ cm	67
Figure 4.12 : La variation des vitesses " $U=f(Y)$ " dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections transversales $X = 360$ cm	68
Figure 4.13 : La variation des vitesses " $U=f(Y)$ " dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections transversales $X = 380$ cm	68

Figure 4.14 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section longitudinale médiane Y = 0 cm.	70
Figure 4.15 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour les sections longitudinales Y = - 4.’	71
Figure 4.16 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour les sections longitudinales Y = + 4	71
Figure 4.17 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour les sections longitudinales Y = -8	71
Figure 4.18 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour les sections longitudinales Y = +8	71
Figure 4.19 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans le niveau Z ₄ cm pour les sections longitudinales Y= -10 cm.	72
Figure 4.20 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans le niveau Z ₄ cm pour les sections longitudinales Y= +10 cm.	72
Figure 4.21 : La variation des vitesses ‘‘U=f(Y)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section transversale x = 130 cm.	72
Figure 4.22 : La variation des vitesses ‘‘U=f(Y)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section transversale x = 250cm.	73
Figure 4.23 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section longitudinale médiane Y = 0 cm.	75
Figure 4.24 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section longitudinale Y = -4 cm	75
Figure 4.25 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section longitudinale Y = +4 cm	75
Figure 4.26 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section longitudinale Y = - 8 cm	76
Figure 4.27 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section longitudinale Y = + 8 cm	76
Figure 4.28 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section longitudinale Y = -11 cm	76
Figure 4.29 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section longitudinale Y = +11 cm	76
Figure 4.30 : La variation des vitesses ‘‘U=f(Y)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section transversale X = 140 cm	77
Figure 4.31 : La variation des vitesses ‘‘U=f(Y)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section transversale X = 180 cm	77
Figure 4.32 : La variation des vitesses ‘‘U=f(Y)’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section transversale X = 260 cm.	78
Figure 4.33 : La variation des vitesses ‘‘ U=f(X) ’’ dans les niveaux Z ₁ , Z ₂ , Z ₃ , Z ₄ pour la section longitudinale centrale Y= 0 cm.	79

Figure 4.34 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(X)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm	80
Figure 4.35 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(X)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = +4$ cm	80
Figure 4.36 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(X)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = - 8$ cm	81
Figure 4.37 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(X)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = + 8$ cm	81
Figure 4.38 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(X)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = - 11$ cm	82
Figure 4.39 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(X)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = + 11$ cm	82
Figure 4.40 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(Y)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 160$ cm	83
Figure 4.41 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(Y)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 180$ cm	83
Figure 4.42 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(Y)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 200$ cm	83
Figure 4.43 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(Y)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 220$ cm	83
Figure 4.44 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(Y)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 240$ cm	84
Figure 4.45 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(Y)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 260$ cm	84
Figure 4.46 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(Y)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 280$ cm	84
Figure 4.47 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(Y)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 300$ cm	84
Figure 5.1 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale médiane $Y= 0$ cm	89
Figure 5.2 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y=- 4$ cm	90
Figure 5.3 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y=+ 4$ cm	90
Figure 5.4 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y=- 8$ cm	91
Figure 5.5 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y= + 8$ cm	92

Figure 5.6 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y=-10 cm	93
Figure 5.7 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y=+ 10 cm	93
Figure 5.8 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y=0 cm	95
Figure 5.9 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y=- 4 cm	96
Figure 5.10 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= + 4 cm	96
Figure 5.11 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= - 8 cm.	97
Figure 5.12 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= + 8 cm.	98
Figure 5.13 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= -10 cm.	99
Figure 5.14 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= + 10 cm.	99
Figure 5.15 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= 0 cm.	101
Figure 5.16 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= - 4 cm.	102
Figure 5.17 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= + 4 cm.	102
Figure 5.18 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= - 8 cm.	103
Figure 5.19 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= + 8 cm.	104
Figure 5.20 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= - 11 cm.	105
Figure 5.21 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= + 11 cm.	105
Figure 5.22 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= 0 cm.	107
Figure 5.23 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= - 4 cm.	108
Figure 5.24 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= + 4 cm.	108
Figure 5.25 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale Y= - 8 cm.	109

- Figure 5.26** : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale 110
Y= + 8 cm.
- Figure 5.27** : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale 111
Y= - 11 cm.
- Figure 5.28** : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale 111
Y= + 11 cm.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Paramètres hydrauliques de l'expérience de Chen et al. (2014).....	36
Tableau 2.2 : Paramètres hydrauliques de l'expérience de Debabeche (1996).....	44
Tableau 2.1 : Paramètres hydrauliques de l'expérience de Chen et al. (2014)	36
Tableau 2.2 : Paramètres hydrauliques de l'expérience de Debabeche (1996)	44
Tableau 4.1 : Caractéristiques hydrauliques de la première série d'essais du ressaut contrôlé.	61
Tableau 4.2 : Caractéristiques hydrauliques de la deuxième série d'essais du ressaut contrôlé.	69
Tableau 4.3 : Caractéristiques hydrauliques de la première série d'essais du ressaut forcé de type "A".	74
Tableau 4.4 : Caractéristiques hydrauliques de la deuxième série d'essais du ressaut forcé de type "A".	78
Tableau 5.1 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour la section longitudinale $Y = 0$ cm.	88
Tableau 5.2 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.	89
Tableau 5.3 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales	91
Tableau 5.4 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = -10$ cm et $Y = +10$ cm.	92
Tableau 4.5 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour la section longitudinale $Y = 0$ cm.	94
Tableau 5.6 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.	95
Tableau 5.7 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 8$ cm et $Y = + 8$ cm.	97
Tableau 5.8 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 10$ cm et $Y = +10$ cm.	98
Tableau 5.9 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour la section longitudinale $Y = - 0$ cm.	100
Tableau 5.10 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.	101

Tableau 5.11 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.	103
Tableau 5.12 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.	104
Tableau 5.13 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour la section longitudinale $Y = - 0$ cm.	106
Tableau 5.14 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.	107
Tableau 5.15 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales pour $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.	109
Tableau 5.16 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.	110

Principales Notations

A_1	L'aire de la section mouillée initiale	$[m^2]$
A_2	L'aire de la section mouillée finale	$[m^2]$
B	Largeur du lit majeur	$[m]$
b	Largeur du lit mineur	$[m]$
F_1	Nombre de Froude incident	$[-]$
f_x	Force de résistance	$[N/ m^2]$
f_1	Les forces hydrostatiques au pied du ressaut	N
f_2	Les forces hydrostatiques à la fin du ressaut	N
g	Accélération de la pesanteur	$[m/s^2]$
G	Poids de la tranche liquide	$[N]$
H	Hauteur du ressaut	$[m]$
h_0	Hauteur de plein bord du lit mineur	
h_1	Hauteur initiale du ressaut	$[m]$
h_2	Hauteur finale du ressaut	$[m]$
h_1^*	Première hauteur conjuguée relative	$[m]$
h_2^*	Deuxième hauteur conjuguée relative	$[m]$
\bar{h}	Distance entre le centre de gravité de la section transversale et la surface libre de l'écoulement	$[m]$
$h(x)$	Profondeur d'eau à la distance x du pied du ressaut	$[m]$
H	Charge totale	$[m]$
H_1	Hauteur initiale du pied de ressaut (hauteur du 1 ^{er} convergent)	$[m]$
H_2	Hauteur initiale du pied de ressaut (hauteur du 2 ^{em} convergent)	$[m]$
H_S	Hauteur de seuil	$[m]$
ΔH	Perte de charge due au ressaut	$[m]$
K	Facteur de position	$[-]$
L_J	Longueur du ressaut	$[m]$
L_R	Longueur du rouleau de surface	$[m]$
L_S	Position du seuil ou d'une marche par rapport au début de ressaut	$[m]$
L_{Rf}	Longueur du rouleau de fond	$[m]$
L_B	Longueur du bassin $[m]$	$[m]$

P_1	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	[N]
P_2	Force de pression exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	[N]
Q	Débit volume	[m ³ /s]
q	Débit unitaire	[m ³ /s]
s	Hauteur du seuil	[m]
S	Hauteur relative du seuil	[-]
U_1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m/s]
U_2	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	[m/s]
U^*	Vitesse relative égale U/U_1	[-]
W	Rapport d'aspect $W = h_1/b$	[-]
x	Position de seuil	[m]
X^*	Position relative de la mesure de vitesse égale à X/L_J	[-]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	[-]
Y^*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
α	Facteur de correction de l'énergie cinétique	[-]
θ	Angle d'inclinaison du canal	[-]
$\bar{\omega}$	Poids spécifique du liquide	[-]
η	Rendement du ressaut	[-]
τ	Rapport des hauteurs	[-]
x_{rf}	Position de la fin du rouleau de fond à l'aval	[m]
U_i/U_1	Vitesse relative	[-]
X/L_J	Rapport de position relative	[-]
X/L_S	Rapport de la longueur de seuil	[-]
X/L_r	Rapport de la longueur de rouleau	[-]
H_d	La hauteur de la lame d'eau	[m]
β	Rapport de l'élargissement $\beta = b/B$	[-]
β_1	Facteurs de correction de la quantité de mouvement à l'amant et à	[-]
β_2	l'aval égale à l'unité	

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Dans les cours d'eau naturels, lors de crues importantes, le canal principal (lit mineur) peut être dépassé par le ruissellement, débordant ainsi sur les plaines inondables adjacentes (lit majeur), caractérisant ainsi le flux résultant comme un flux de canal composé (Peltier et al., 2013). Un canal composé se compose de deux niveaux, à savoir un lit mineur et un lit majeur. Cette configuration est observable à la fois dans la nature (rivières, oueds, etc.) et dans les réseaux d'assainissement, où le lit majeur prend la forme d'une banquette permettant d'évacuer une crue et de faciliter le passage des équipements de curage mécanique et des agents d'entretien.

L'étude des écoulements non uniformes en lit composé est complexe en raison des processus de transfert de masse et de quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al., 2005). Ces processus, se manifestant de diverses manières, constituent des sources supplémentaires de dissipation d'énergie dans un lit composé. En outre, le phénomène de ressaut hydraulique, qui se produit lors du passage abrupt d'un écoulement supercritique à un écoulement sous-critique, représente la forme la plus adéquate et suffisante de dissipation d'énergie, ce phénomène provoquant à se produire en aval des ouvrages hydrauliques, tels que les déversoirs normaux, les vannes et les déversoirs en accolade (Saghebian, 2018). Il s'agit d'un écoulement diphasique (air-eau) turbulent avec une discontinuité de la profondeur d'écoulement et le champ de vitesse (Leutheusser and Kartha, 1972). L'étude du ressaut dans ce type de canaux (composé) a fait l'objet de recherches limitées, avec des travaux notables réalisés par Benabdesselam et al., (2022), Parsaie et al., (2016), Khattaoui and Achour, (2012), Houichi et al., (2012), entre autres.

La distribution de la vitesse dans les écoulements fluviaux sur un lit (canal) composé constitue une information essentielle pour la conception, la stabilisation des canaux, le contrôle des crues et les projets d'aménagement hydraulique (Bousmar et al., 2005). De nombreuses investigations expérimentales ont été menées pour clarifier les distributions de vitesse moyenne des écoulements dans des canaux composés, telles que les travaux de LI et al., (2005), Yang et al., (2005), Huang et al., (2002), Wang et al., (1998), Shiono and Knight, (1991) et Tominaga and Nezu, (1991).

La présence substantielle de bulles d'air a entravé l'application de la plupart des techniques de mesure de turbulence non intrusives (indirecte). Les mesures intrusives (directes) des écoulements air-eau dans les ressauts hydrauliques remontent à Maatooq and Taleb, (2018) et Peltier et al., (2013) qui ont utilisé dans leurs travaux de recherche le vélocimètre à micro-moulinet destiné à mesurer les vitesses instantanées des écoulements diphasiques. Rajaratnam, (1962), a mesuré le taux de vide (bulles d'air) et la distribution de vitesse dans le ressaut (Wang and Chanson, 2015). Notre intérêt particulier a été suscité par les travaux antérieurs de (Rajaratnam, 1962), Hager, (1992), Debabeche (2003) et Chen et al., (2014) soulignant ainsi l'importance de ces études dans notre contexte de recherche.

L'objectif primordiale de cette thèse est d'explorer expérimentalement la distribution des vitesses dans deux types de ressaut hydraulique : le ressaut contrôlé par seuil mince et le ressaut forcé de type A par seuil mince. Ces investigations sont menées dans un canal composé de section trapézoïdale à base rectangulaire et de pente nulle. Le but principal est d'évaluer la relation entre la distribution des vitesses relatives (adimensionnelles) ($U^* = U_i/U_1$) et les positions relatives ($X^* = X/L_j$), afin d'établir une relation fonctionnelle ($U^* = f(X^*)$) en utilisant la méthode statistique des moindres carrés. Ces caractéristiques (U^* et X^*) sont exprimées sous forme de rapports adimensionnels, favorisant une application universelle et une meilleure applicabilité dans le domaine pratique.

Pour ce faire, nous avons réparti ce travail en cinq chapitres, le premier et le deuxième sont dédiés à une recherche bibliographique explorant les types de ressauts hydrauliques utilisés dans cette étude.

Le troisième chapitre est consacré à la description et l'illustration des méthodes et matériels utilisés dans notre expérimentation, le quatrième chapitre se concentre sur la présentation et l'analyse des résultats obtenues. Enfin, dans le cinquième et dernier chapitre nous entreprenons l'évaluations d'une relation fonctionnelle adimensionnelle entre les vitesses relatives et les positions relatives.

Le premier chapitre examine, en première partie, les recherches sur le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, en se concentrant sur le ressaut classique, le ressaut contrôlé par seuil mince et le ressaut forcé de type 'A'. La deuxième partie se consacre à la revue bibliographique sur le ressaut hydraulique dans un canal composé, en mettant l'accent sur les études de

(Khattaoui and Achour, 2012) et Riguet, (2021), ainsi que d'autres travaux sur des canaux de forme composée en U, dont ceux de Hager, (1987) et Debabeche, (2003).

Le deuxième chapitre est une revue bibliographique sur la distribution des vitesses dans le ressaut hydraulique, en mettant l'accent sur divers types de canaux. En premier lieu, nous examinerons les travaux relatifs à la mesure de la vitesse, conduits dans différentes configurations de canaux telles que le canal rectangulaire, comme étudié par Rajaratnam and Subramanya, (1968), Hager, (2013) et Chen et al., (2014). En deuxième lieu, nous porterons notre attention sur la distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil, explorant des canaux de section droite triangulaire et de forme profilée en "U". Nous accorderons une attention particulière aux recherches de Debabeche, (1996) et Debabeche, (2003).

Le troisième chapitre présente l'équipement utilisé dans nos expériences, notamment un canal de forme composée en plexiglas et décrit les éléments clés pour induire le ressaut hydraulique. Il expose également le protocole pour les essais de mesure des vitesses dans deux types de ressauts contrôlés et forcés de type 'A'.

Le quatrième chapitre expose et analyse les résultats expérimentaux, comprenant deux séries pour chaque type de ressaut. La première série, comprenant 648 points de mesure de vitesse, est approfondie et confirmée par une seconde série avec 286 points mesurés, visant à clarifier la distribution des vitesses dans un ressaut contrôlé de notre canal composé. Une approche similaire est suivie pour le ressaut forcé de type "A" avec 408 points de mesures pour le premier essai et 360 points de mesure pour le deuxième essai. L'analyse se concentre sur la distribution des vitesses moyennes horizontales sur 7 sections longitudinales réparties sur différents plans et plusieurs sections transversales à différentes positions pour chaque essai. L'objectif principal est de mesurer et d'analyser les variations de vitesse à travers les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé et forcé de type "A" dans un canal composé, mettant particulièrement l'accent sur l'analyse descriptive des changements des valeurs de vitesse et de direction à l'intérieur du ressaut.

Dans le cinquième et dernier chapitre de notre étude expérimentale, l'objectif primordial est d'analyser la distribution des vitesses relatives (adimensionnelles) ($U^* = U_i/U_1$) en corrélation avec les positions relatives ($X^* = X/L_j$) pour établir une relation fonctionnelle ($U^* = f(X^*)$) en utilisant la méthode statistique des moindres carrés. La variable U_i représente la valeur

expérimentale mesuré de la vitesse moyenne horizontale, considérée comme une valeur absolue (positives), tandis que U_1 représente la vitesse de l'écoulement à la sortie du convergent. La position (X) est l'abscisse de mesure de la vitesse, et L_J désigne la longueur du ressaut hydraulique. Nous procéderons à l'analyse de la distribution des vitesses relatives selon une approche similaire à celle décrite dans le chapitre précédent pour les ressauts mentionnés précédemment.

Chapitre 1

Ressauts hydrauliques dans des canaux composés

I.1 INTRODUCTION

Dans ce premier chapitre, nous nous penchons sur la complexité du ressaut hydraulique, un phénomène marqué par une transition abrupte entre un écoulement turbulent et un écoulement calme, engendrant des perturbations à la surface de l'écoulement sur une distance définie comme la longueur du rouleau (Hager et al., 1990). Cette manifestation hydraulique revêt diverses formes, parmi lesquelles se distingue le ressaut hydraulique "classique" qui se manifeste dans un canal de section rectangulaire à pente nulle ou faible. La variabilité du ressaut hydraulique est étroitement liée à sa régulation par une réunion de mécanismes, dont des seuils à paroi mince ou épaisse, continus ou discontinus, et des marches positives ou négatives (Forster and Skrinde, 1950); (Achour and Debabèche, 2003); (Hager and Sinniger, 1985).

Ces caractéristiques complexes font du ressaut hydraulique un objet d'étude prenant et multidimensionnel. Au cours de cette exploration, nous aborderons en détail les différentes figures du ressaut hydraulique, en mettant l'accent sur son développement dans un canal de section rectangulaire. Cette exploration approfondie constituera la première partie de notre étude, avant de nous tourner vers une revue bibliographique sur le ressaut hydraulique dans des canaux composés.

La structure de ce chapitre est subdivisée en deux parties distinctes. La première se focalise sur les principaux types de ressauts dans un canal rectangulaire. Une attention particulière est accordée au ressaut hydraulique classique à travers une étude approfondie menée par (Hager et al., 1990), qui propose une formule pour représenter le profil de surface du ressaut. Nous examinons également le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince, mettant en lumière les travaux de Forster and Skrinde, (1950). Enfin, nous explorons le ressaut hydraulique forcé de type "A" par seuil mince en nous appuyant sur l'approche de Rand, (1957).

La seconde partie de ce chapitre est consacrée à la revue bibliographique sur le ressaut hydraulique dans un canal composé. Nous mettrons en avant les études de Khattaoui & Achour, (2012) ainsi que celles de Riguet, (2021), réalisées dans des canaux composés de forme rectangle-rectangle. En outre, nous référençons d'autres travaux significatifs portant sur des canaux de forme composée en U, notamment les contributions de Hager, (1987) et Achour and Debabeche, (2003).

I.2 RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL DE SECTION RECTANGULAIRE

I.2.1 Ressaut classique selon l'étude de Hager (1990)

Dans leur étude approfondie, Hager et al., (1990) ont examiné attentivement les propriétés du ressaut hydraulique classique, en se concentrant principalement sur deux caractéristiques fondamentales déterminantes ; qui sont la hauteur initiale h_1 et la hauteur finale h_2 . Tout d'abord, la hauteur initiale h_1 mesurée au pied du ressaut, a été considérée comme une référence essentielle. De manière tout aussi cruciale, la hauteur finale h_2 , enregistrée à la fin du ressaut où la profondeur atteint son maximum par rapport à la surface libre, a été étudiée en détail. Pour évaluer la relation entre ces hauteurs, les chercheurs ont défini le rapport $Y = \frac{h_1}{h_2}$, connu comme le rapport des hauteurs conjuguées.

Outre ces paramètres, l'équipe de recherche s'est également penchée sur des longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique. La longueur L_r du rouleau de surface, mesurée dans la région tourbillonnante de l'écoulement, a été examinée en détail. De plus, la longueur L_j du ressaut, mesurée entre les hauteurs initiale h_1 et finale h_2 , a été examinée pour comprendre la dynamique complète du phénomène. La figure 1.1 accompagne leur analyse, illustrant le ressaut classique en évolution entre ses sections initiale et finale, numérotées 1 et 2. Cette exploration approfondie des caractéristiques du ressaut hydraulique lancera une nouvelle lumière sur les mécanismes complexes de ce phénomène hydraulique.

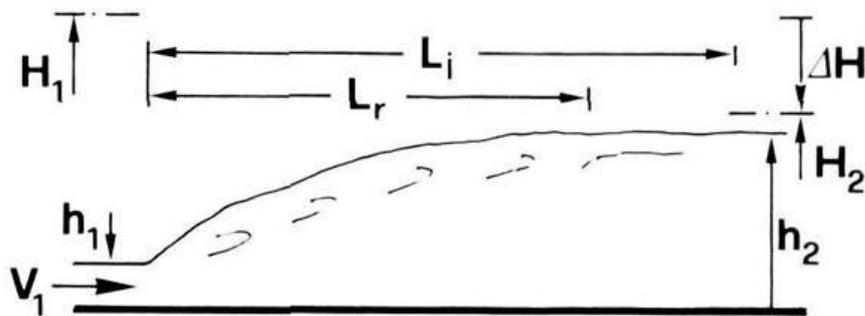


Figure 1.1 : Schéma du ressaut hydraulique classique.

L'examen du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, comme étudié par Hager en 1990, s'articule autour de l'établissement de la relation fondamentale entre le rapport $Y = \frac{h_1}{h_2}$ est

l'objectif de l'application de l'équation de la quantité de mouvement qui régit le ressaut hydraulique.

Au niveau de l'amont du ressaut (au point d'origine), l'écoulement présente une profondeur h_1 et une vitesse moyenne V_1 . La formulation de cette relation découle de l'application de l'équation de continuité, laquelle peut être exprimée de la manière suivante :

$$\frac{1}{2}\rho g b h_1^2 + \rho Q V_1 = \frac{1}{2}\rho g b h_2^2 + \rho Q V_2 \tag{1.1}$$

Dans cette relation, il est supposé que la distribution de la pression soit hydrostatique, que la distribution de la vitesse est uniforme, et que le frottement sur les parois est négligeable. Le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut peut être exprimé de la manière suivante :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{g \cdot b^2 \cdot h_1^3} \tag{1.2}$$

En divise l'équation I.1 par $\left(\frac{2}{g \cdot b \cdot h_1^2}\right)$

$$Y = \frac{h_2^*}{h_1^*} = \frac{1}{2}[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1] \tag{1.3}$$

Cette relation (1.3) permet de calculer le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F . Elle est connue sous le nom d'équation de Bélanger.

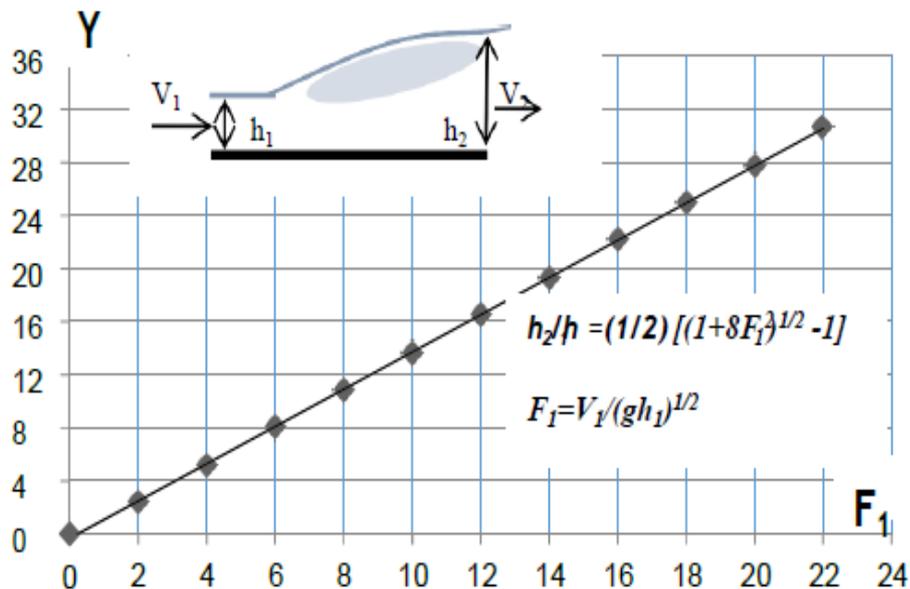


Figure 1.2 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger (1828).

Pour des valeurs considérables du nombre de Froude, $F_1 > 2$, Hager and Sinniger, (1985) ont établi une relation en se basant sur l'équation (1.3). Cette relation peut être exprimée de la manière suivante :

$$Y = \frac{h_2^*}{h_1^*} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2} \quad (1.4)$$

I.2.2 Ressaut hydraulique contrôle par seuil mince selon l'étude de Forster et Skrinde (1950)

Dans leur étude expérimentale Forster and Skrinde, (1950) se sont fixé pour objectif de caractériser la variation de la hauteur relative $\frac{s}{h_1}$ du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, tout en maintenant constantes les valeurs de la position x/h_2 du seuil pour chaque essai. Pour ce faire, le rapport $\frac{x}{h_2}$ a été maintenu invariable dans chaque expérimentation, assurant ainsi la formation complète du ressaut. La longueur du bassin amortisseur était équivalente à la position x du seuil, mesurée à partir du début du ressaut.

En se basant sur l'hypothèse d'une répartition hydrostatique des pressions et d'une distribution uniforme des vitesses dans les sections en amont et en aval du ressaut, Forster et Skrinde ont élaboré en 1950 un diagramme qui mettait en relation trois paramètres adimensionnels essentiels : le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, la position relative du seuil x/h_2 et la hauteur relative du seuil $\frac{s}{h_1}$.

Le seuil de hauteur s est dénoyé et fonctionne comme un déversoir ; la profondeur h de l'écoulement à l'aval n'a ainsi aucune influence sur le débit franchissant le seuil. Cette condition est satisfaite lorsque : $h_3 < h_2 - (0,75S)$.

Les mesures expérimentales obtenues sont traduites graphiquement sur la figure 1.3. Les trois graphes distincts qui ont été tracés pour trois valeurs distinctes de $\frac{x}{h_2}$, à savoir 3,5 et 10. Il est intéressant de noter que, quel que soit le nombre de Froude F_1 , les courbes expérimentales obtenues tendent à se rapprocher les unes des autres à mesure que la valeur de $\frac{x}{h_2}$ augmente. Plus spécifiquement, pour des valeurs de $\frac{x}{h_2}$ comprises entre 5 et 10, la hauteur relative $\frac{s}{h_1}$ du seuil ne présente pas de variations significatives.

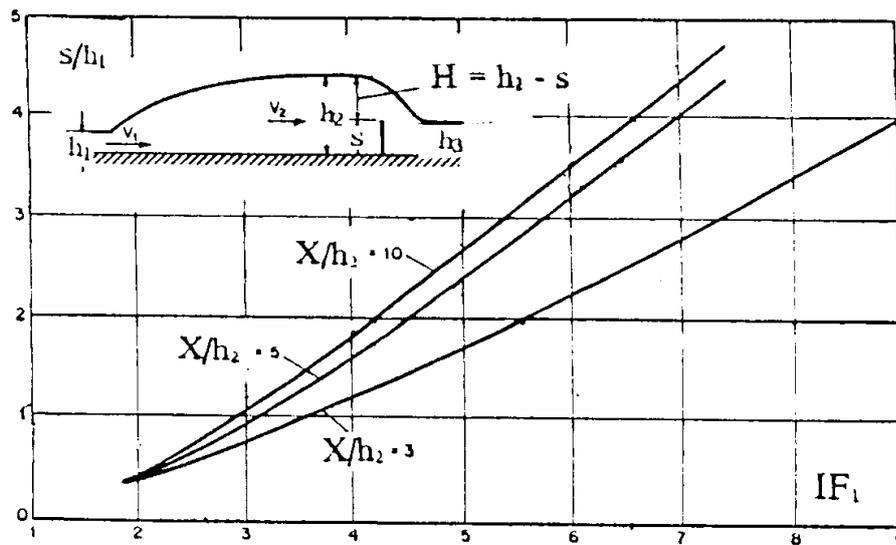


Figure 1.3 : La variation du nombre de Froude (IF_1) en fonction de la hauteur relative s/h_1 .

Cette observation suggère que, dans cette plage de positions relatives du seuil, la variation de la hauteur du seuil s'est stabilisée, indiquant une certaine insensibilité de la hauteur relative du seuil par rapport au nombre de Froude F_1 . En pratique, on considère généralement que la position relative du seuil $\frac{x}{h_2}$ est approximativement égale à 6.

I.2.3 Ressaut hydraulique forcé par seuil mince selon l'étude de Rend (1957)

Rand, (1957) a affiné la compréhension des différentes configurations associées au ressaut hydraulique, Rand s'est engagé dans l'élaboration d'une classification détaillée applicable aux bassins équipés d'un seuil continu à leur extrémité. Ce faisant, il est devenu pionnier en définissant dix cas typiques pour classer le ressaut induit par un seuil. Ces cas spécifiques englobent les variations tant en hauteur qu'en position du seuil, établissant ainsi le ressaut classique comme référence de base.

La diversité de ces cas peut être regroupée de manière significative en trois catégories distinctes, chaque catégorie étant déterminée par la position relative du seuil par rapport au pied du ressaut (comme illustré dans la figure 1.4) :

- Position minimale en amont (L_s, \min) : Cette catégorie concerne les situations où le seuil est positionné le plus en amont possible par rapport au ressaut, définissant ainsi des conditions spécifiques pour le déroulement du phénomène du ressaut hydraulique.

- Position intermédiaire (L_s) : Dans cette catégorie, le seuil est placé de manière intermédiaire par rapport au ressaut, présentant des caractéristiques particulières qui influent sur la dynamique du ressaut.
- Position maximale en amont (L_s, \max) : Cette catégorie englobe les configurations où le seuil est positionné le plus en amont par rapport au ressaut, créant des conditions uniques qui affectent le développement et le comportement du ressaut hydraulique.

Chacune de ces catégories offre une illustration spécifique sur les interactions complexes entre le seuil et le ressaut, permettant ainsi une classification claire des différents scénarios observables dans ces conditions hydrauliques particulières.

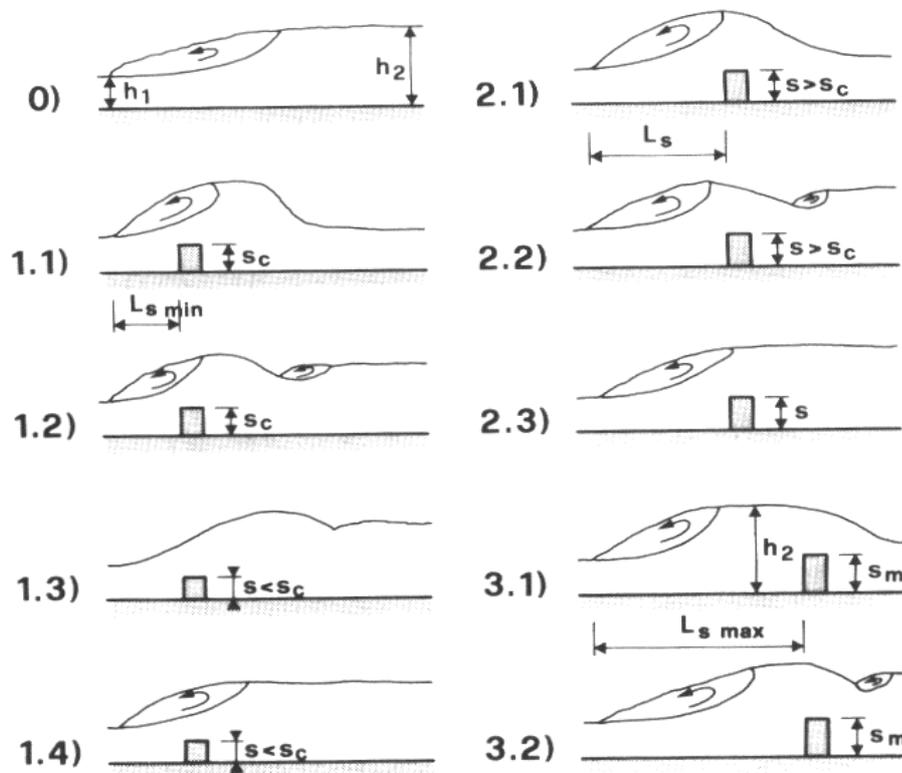


Figure 1.4 : Typologie du ressaut forcé. 0) ressaut classique ; 1) classe 1, longueur L_s, \min ; 2) classe 2, longueur intermédiaire L_s ; 3) classe 3, longueur L_s, \max , et 4) ressaut classique avec hauteurs conjuguées h_1 et h_2 . s : hauteur du seuil.

Rand a introduit le facteur de position (K) pour caractériser différents cas de ressauts induits par un seuil. Ce facteur, variant de $K = 0$ à $K = 1$, permet de définir la position du seuil par rapport au ressaut. En utilisant ce concept, Rand a développé des graphiques représentant le rapport des hauteurs conjuguées (Y_F) en fonction du nombre de Froude (F_1) pour diverses hauteurs relatives du seuil ($S = s/h$). Ces graphiques, élaborés pour cinq valeurs de K , illustrent que la diminution des hauteurs conjuguées est plus significative lorsque la hauteur relative du

seuil est élevée. De plus, l'impact du seuil diminue avec l'augmentation du nombre de Froude, suggérant que pour des valeurs élevées de F_1 , le seuil peut devenir inutile.

Ces graphiques ont non seulement permis de déterminer la hauteur de seuil nécessaire à la formation d'un ressaut, mais ils ont également constitué la base de la première classification de Rand, (1957) pour les différents cas possibles de ressaut induit par un seuil. Rand, (1965) a ajusté ces graphiques pour les présenter sous une forme différente, facilitant la détermination de h_1 dans un canal équipé d'une vanne plane. D'autre part, de cette amélioration pratique, chaque nombre de Froude nécessite un graphique distinct. La figure 1.5 illustre cette nouvelle présentation.

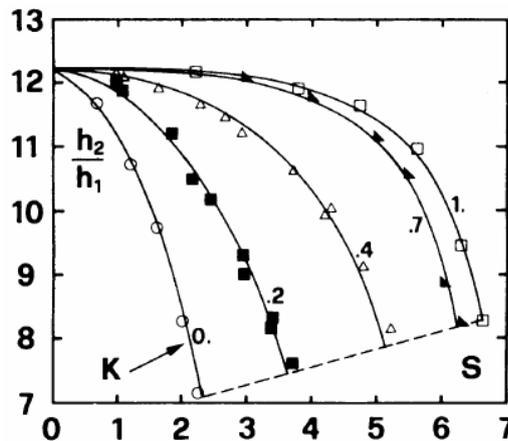


Figure 1.5 : Hauteurs conjuguées $h_2/h_1 = f(S, K)$, $F_1 = 9$. (---) limite d'influence de l'aval sur l'amont.

I.3 RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DIFFERENTS CANAUX DE FORMES COMPOSES

Les écoulements dans les lits composés (canal composé) se démarquent par une interaction significative entre deux composants distincts : d'une part, le flux rapide et profond du lit mineur, et d'autre part, le flux plus lent et moins profond du lit majeur. Cette interaction dynamique provoque un transfert de quantité de mouvement entre ces deux lits, donnant lieu à la formation de structures turbulentes qui dissipent une partie de l'énergie de l'écoulement. Selon les observations de Proust et al., (2006), cette interaction induit des modifications substantielles dans la capacité d'écoulement du lit mineur, du lit majeur et du lit composé dans son ensemble.

La complexité des processus physiques impliqués est accentuée par le fait que l'interaction turbulente entre les lits dépend à la fois de la géométrie combinée et des paramètres

hydrauliques tels que le débit total et la hauteur relative de débordement. Cette dernière est définie comme le rapport entre la hauteur d'eau dans le lit majeur et celle dans le lit mineur (Proust et al., 2006).

Les canaux naturels, notamment ceux de forme composée, se distinguent par leur diversité géométrique, caractérisée par des sections transversales changeantes, des variations de pente, des irrégularités de surface, des obstructions, voire des bifurcations. Chacune de ces particularités influence l'interaction entre l'écoulement et le canal. Par exemple, des sections transversales changeantes peuvent engendrer des variations locales de vitesse, des zones de recirculation, ou des points de séparation de l'écoulement, impactant ainsi la distribution de la quantité de mouvement.

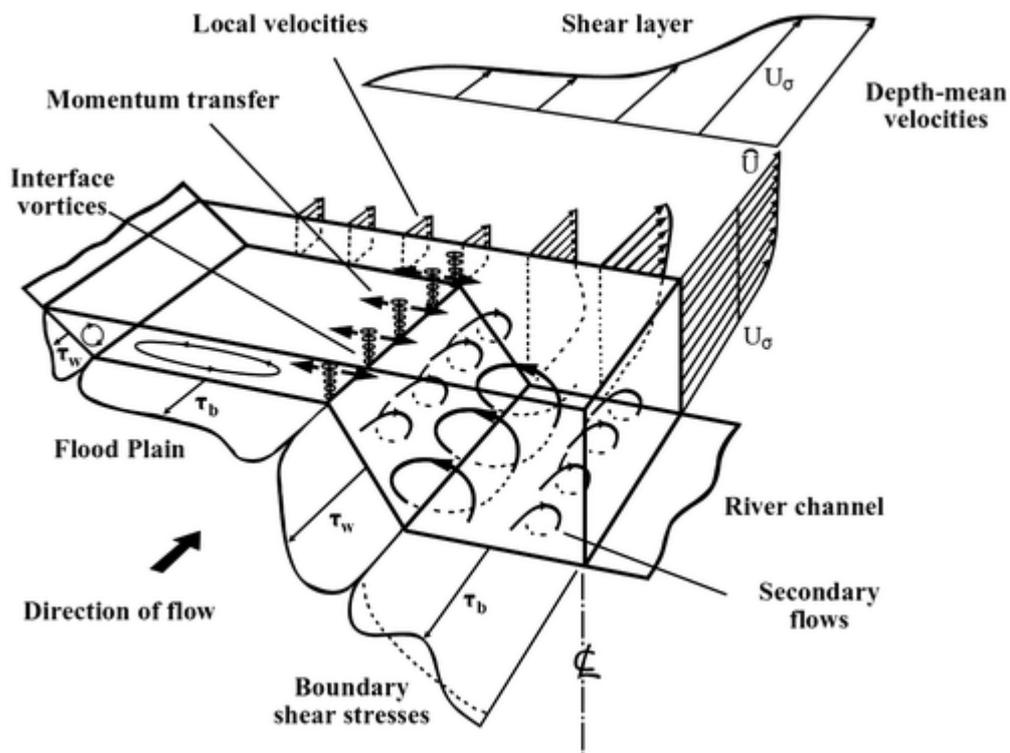


Figure 1.6 : Composition de l'écoulement en trois dimensions dans un lit composé, d'après (Shiono and Knight, 1991) Dissipation d'énergie de l'écoulement dans des canaux composés.

(Proust et al., 2006), dans le cadre de sa thèse, a entrepris des expérimentations au sein de trois canaux composés distincts, explorant diverses configurations d'écoulements, telles qu'une convergence abrupte de la plaine d'inondation, la présence d'un remblai routier dans le lit majeur, des divergences dans le lit majeur, ainsi que des écoulements non-uniformes en lit droit. L'objectif initial de cette recherche était de quantifier les phénomènes physiques prédominants au sein de chacun des écoulements non-uniformes examinés.

En appliquant les principes de la première loi de la thermodynamique, (Proust et al., 2010) est analysé les concepts de perte d'énergie et de perte de charge, établissant une distinction entre ces deux phénomènes. Leur étude a démontré des variations substantielles de ces phénomènes au sein de différentes sous-sections, que ce soit dans le canal principal ou dans la plaine inondable. Les auteurs ont examiné des données expérimentales relatives à la charge hydraulique à l'intérieur du canal principal et de la plaine inondable, prenant en compte des géométries de canal à largeur constante ou variable.

Il a également été constaté que les paramètres de débit sont influencés par le transport de quantité de mouvement résultant des échanges de masse dans toutes les géométries non prismatiques, particulièrement pour les faibles et moyennes profondeurs relatives. En revanche, ce phénomène se révèle négligeable pour les écoulements se développant dans une géométrie droite. En fin de compte, l'étude met en évidence l'importance d'une modélisation explicite de la conservation de masse entre les différentes sous-sections.

I.3.1 Ressaut hydraulique dans un canal de section composé rectangle-rectangle

I.3.1.1 Etude de Khattaoui et Achour 2012

La considération du ressaut hydraulique en tant que dissipateur d'énergie dans les canaux composés reste encore à être explorée. Selon la littérature examinée, il est évident que l'utilisation d'un canal composé pour la dissipation de l'énergie à travers le phénomène du ressaut hydraulique peut générer des résultats très favorables. Cela s'appuie sur les travaux de recherche de Khattaoui and Achour, (2012) portant sur le ressaut hydraulique en lit composé de forme rectangle-rectangle.

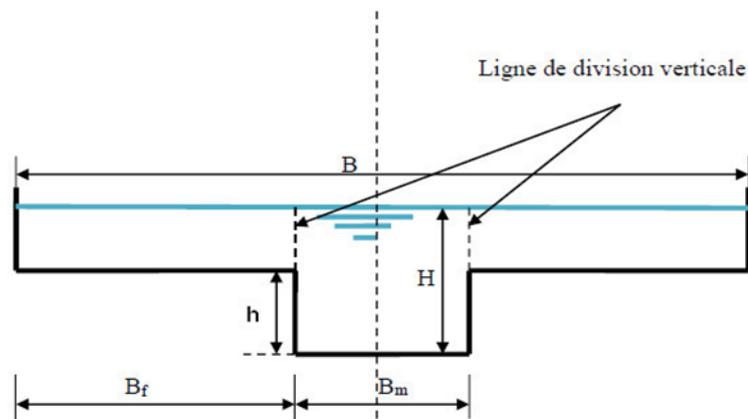


Figure 1.7 : Schéma illustratif d'un canal de section rectangulaire composée

La notation utilisée dans cette étude est définie comme suit :

B : est la largeur mémoire du canal

B_f : Largeur de la banquette (un coté du lit majeur)

B_m : Largeur du lit mineur

H : Profondeur de l'écoulement

h : Profondeur de la banquette

1.3.1.1 Rapport des hauteurs conjuguées

La figure présentée ci-dessous expose différentes propriétés géométriques et hydrauliques du ressaut dans un lit composé droit.

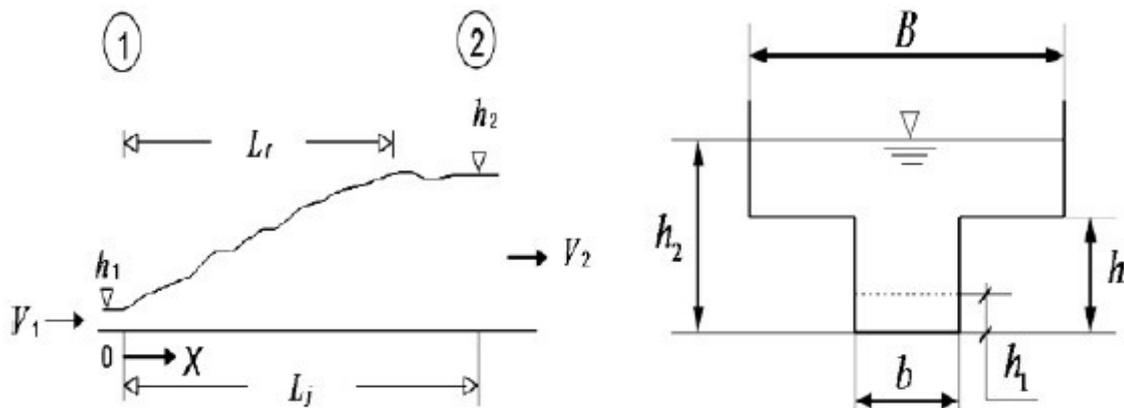


Figure 1.8 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit de Khattaoui et Achour (2012).

Le changement de masse et de quantité de mouvement a lieu à l'interface entre le lit mineur et le lit majeur, comme décrit par Bousmar et al., (2004). La relation de la quantité de mouvement appliquée entre l'amont et l'aval du ressaut, montré par la figure (1.8), peut être exprimée de la manière suivante :

$$\rho Q(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = f_1 - f_2 \quad (1.5)$$

où :

β_1 et β_2 : facteurs de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité quand le rangement des vitesses est supposé uniforme.

f_1 et f_2 : forces hydrostatique au pied et à la fin du ressaut.

ρ : la masse volumique du liquide en mouvement.

Q : débit volume.

V : vitesses moyennes au pied et à la fin du ressaut

En référence à l'étude de Achour, (2000) et en établissant une analogie avec la relation de Borda-Carnot, il semble approprié d'introduire une force de résistance, dont la composante horizontale peut être formulée de la manière suivante, en accord avec la structure de la relation (1.5) :

$$f_x = -k\varpi(h_2 - h)^x h_1^y (B - b)^z \quad (1.6)$$

f_x : Force de résistance

h_1 et h_2 : Charges d'eau au pied et à la fin du ressaut.

H : Hauteur de plein bord du lit mineur.

ϖ : Poids spécifique du liquide.

k : Coefficient.

b : Largeur du lit mineur.

B : Largeur du lit majeur.

Cette force de résistance ' f_x ', est une source de perte de charge liée nécessairement au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur. Les exposants x , y et z sont liés par la relation $x + y + z = 3$, le coefficient k est tel que :

$$k = \varphi. (L_j \text{ ou } L_r, h_2, h_1, h)$$

En tenant compte de f_x , l'équation d'Euler devient :

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = f_1 - f_2 + f_x \quad (1.7)$$

Analysons l'équation pour la fonction f_x

$$f_x = \left(\frac{1}{2} \right) \varpi (h_2 - h) h_1 (B - b) \quad (1.8)$$

L'hypothèse d'une distribution uniforme pour les vitesses dans les sections transversales correspondant au pied et à la fin du ressaut implique que $\beta_1 = \beta_2 = 1$. Les sections A_1 et A_2 sont données respectivement par $A_1 = bh_1$ et $A_2 = B(h_2 - h) + bh$. Prenons comme hypothèse aussi que la distribution des pressions est hydrostatique dans les sections 1 et 2 du ressaut, ce qui donne les expressions des forces :

$$f_1 = \bar{\omega} \left(\frac{h_1}{2} \right) \cdot bh_1 \text{ et } f_2 = \bar{\omega} \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) \cdot bh + \bar{\omega} \left[\frac{h_2 - h}{2} \right] \cdot (h_2 - h) \quad (1.9)$$

En tenant compte de toutes ces hypothèses et informations ainsi que de l'équation de continuité, $V_1 A_1 = V_2 A_2$ l'équation (1.7) s'écrit en définitive, après réarrangement, comme suit :

$$2F_1^2 \left[\frac{\beta}{Y - (1 - \beta) / \tau} - 1 \right] = 1 - \frac{\left(\frac{2Y-1}{\tau} \right)}{\tau} - \frac{\left(\frac{Y-1}{\beta} \right)^2}{\beta} - \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (1.10)$$

$$F_1 = \frac{Q}{\sqrt{b^2 h_1^3 g}} \quad (1.11)$$

$\tau = \frac{h_1}{h}$: Rapport des hauteurs.

$\beta = \frac{b}{B}$: Rapport de l'élargissement.

En négligeant la force de résistance f_x , l'équation résultante aurait comme expression :

$$2F_1^2 \left[\frac{\beta}{Y - (1 - \beta) / \tau} - 1 \right] = 1 - \frac{\left(\frac{2Y-1}{\tau} \right)}{\tau} - \frac{\left(\frac{Y-1}{\beta} \right)^2}{\beta} \quad (1.12)$$

Les relations (1.7) et (1.10) sont des équations fonctionnelles de forme : $(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$. Notons que les équations (1.10) et (1.12) peuvent s'écrire sous la forme : $Y^3 + aY^2 + bY + c = 0$. En faisant le changement de variable $Y = x - \frac{a}{3}$, l'équation de troisième degré devient sous la forme $Y^3 + pY + q = 0$, dont la résolution peut se faire aisément en utilisant la méthode trigonométrique.

La figure (1.9) illustre la variation de Y , calculé par l'équation (1.12) en fonction de F_1 . L'une des variables, β ou τ , est fixée, l'autre varie avec un pas de 0,2. Pour que le ressaut se produise effectivement dans le canal composé ($h_2 > h$), les valeurs de F_1 à considérer doivent être strictement supérieur à la valeur minimale correspondant à $h_2 = h$. On s'aperçoit de ces figures, que pour un β et τ données, Y augmente continuellement avec l'accroissement de F_1 .

$$F_1 = \left[\frac{1}{2\sqrt{2}} \right] \sqrt{\left(\frac{2}{r+1} \right)^2 - 1} \quad (1.13)$$

L'augmentation du rapport Y en fonction de F_1 est plus rapide pour les grandes valeurs de β et diminue avec l'augmentation de τ (Khattaoui and Achour, 2012). Sur la figure (1.10) nous avons représenté la variation de Y en fonction de F_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. On voit clairement que les Y calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont inférieures à celles en la négligeant. La différence est plus claire au fur et à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente. La force f_x traduit les pertes de charge dues à l'expression de l'écoulement vers le haut.

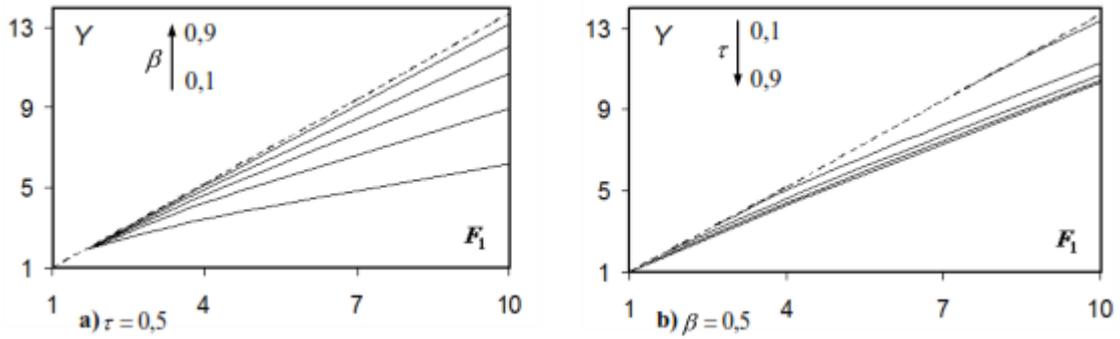


Figure 1.9 : Variation de Y, calculé par (1.5), en fonction de F_1 , (---) : $\beta = 1$ Khattaoui et Achour (2012).

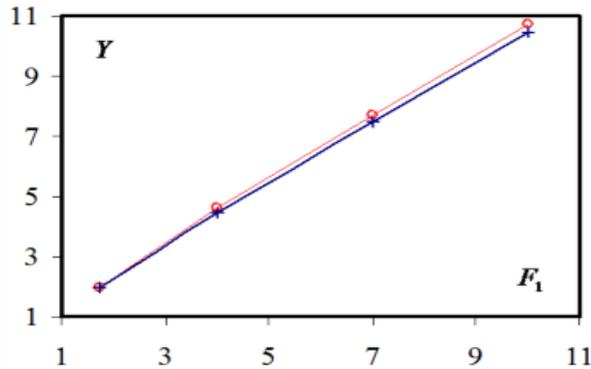


Figure 1.10 : Variation de Y en fonction de F_1 . (o) : équation (1.5), (+) : équation (1.6), Khattaoui et Achour (2012).

1.3.1.1.2 Rendement du ressaut

En considérant les mêmes hypothèses que pour le rapport des hauteurs conjuguées, le rendement, $\eta = \frac{\Delta H}{H_1}$, peut s'exprimer par :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \tag{1.14}$$

L'équation (1.14) permet le calcul, d'une manière explicite, le rendement du ressaut se produisant en lit composé droit, connaissant F_1 , Y ainsi que β et τ . En considérant les valeurs de Y calculées avec la relation (1.12), il est représenté sur la figure (1.11) la variation de η en fonction de F_1 . Pour un τ et un β fixés, il est clairement illustré sur la figure que le rendement η d'un ressaut hydraulique dans un lit composé, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de F_1 . Pour un τ connu, en fixant F_1 , η diminue avec l'augmentation de β et un F_1 fixés on peut aisément voir que le η augmente avec l'accroissement de τ .

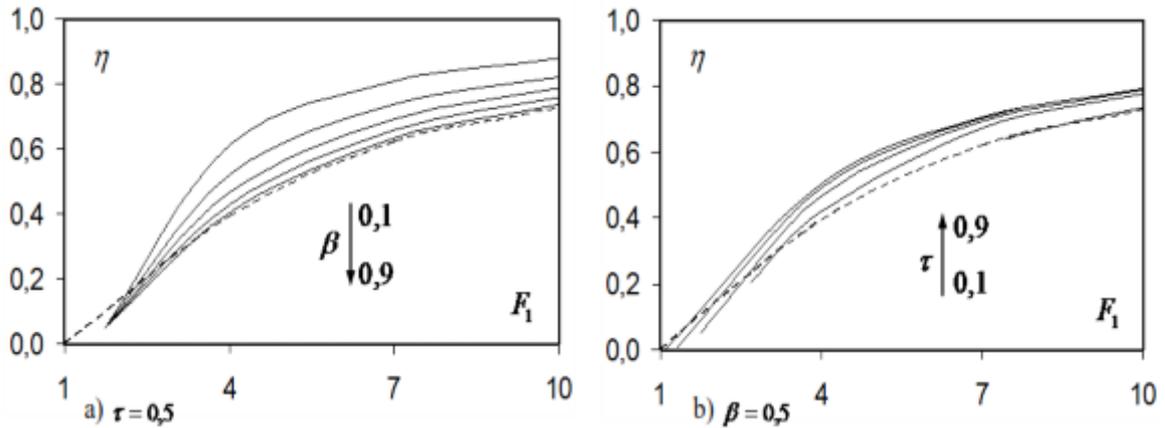


Figure 1.11 : Variation de η en fonction de F_1 . (---) : $\beta = 1$.

Sur la figure 1.12 est représentée la variation de η en fonction de F_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. Il est bien illustré que les η calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutés sont supérieurs à celles calculées en la négligeant.

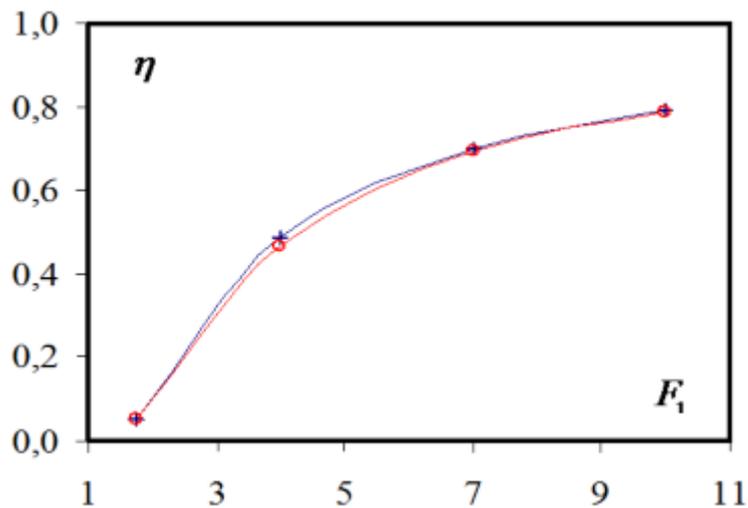


Figure 1.12 : Variation de η en fonction de IF_1 . (o) : équation (1.35), (+) équation (1.34), Khattaoui et Achour (2012).

1.3.1.2 Etude de Riguet, (2021)

Cette étude a été consacrée à l'examen expérimental du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince, un seuil épais et une marche positive dans un canal de section composée rectangulaire. Les résultats expérimentaux portent sur cinq hauteurs initiales (h_1) testées. Un large éventail de hauteurs de seuil mince, seuil épais et marche positive (S) a été exploré, conduisant ainsi à une variété de nombres de Froude incidents (F_1). L'objectif initial de l'étude

expérimentale était d'analyser la variation du rapport (Y) entre les hauteurs conjuguées et du rendement (η) en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

Par la suite, une comparaison de ces caractéristiques du ressaut a été effectuée pour les trois configurations mentionnées précédemment.

1.3.1.2.1 Rapport des hauteurs conjuguées (Y) en fonction du nombre de Froude (F_1)

La figure ci-dessous montre la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour les trois configurations du ressaut citées précédemment.

Cette figure montre que les courbes des ressauts contrôlés par seuil mince et épais sont presque quasi-confondues pour pratiquement toute la gamme des nombres de Froude F_1 . Cependant un léger effet de la marche positive sur le rapport des hauteurs conjuguées apparaît à partir du nombre de Froude F_1 supérieur à six (6) environ. Cette influence s'accroît avec l'augmentation du nombre de Froude F_1 .

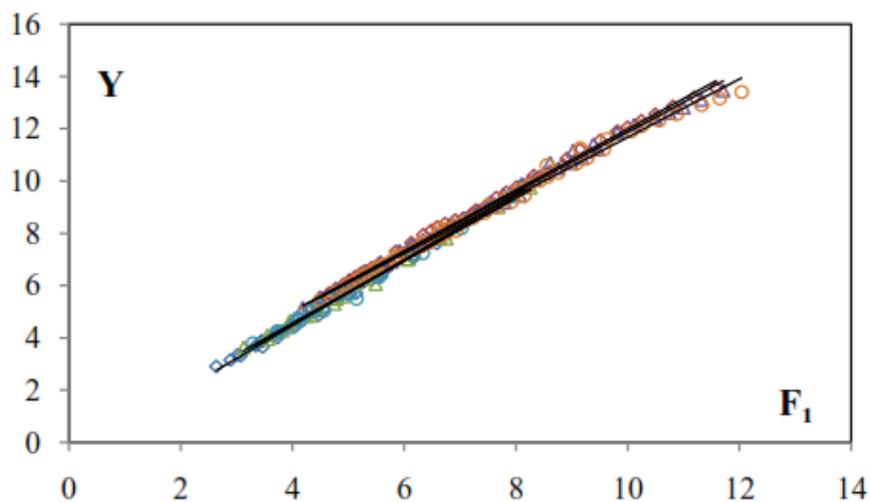


Figure 1.13 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les trois configurations. Contrôlé par : () seuil mince, (Δ) seuil épais et (\circ) marche positive.

1.3.1.2.2 Rendement du ressaut hydraulique (η) en fonction du nombre de Froude (F_1)

La figure (1.14 a et b) montre la variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 dans les deux parties du canal pour les trois configurations du ressaut testé.

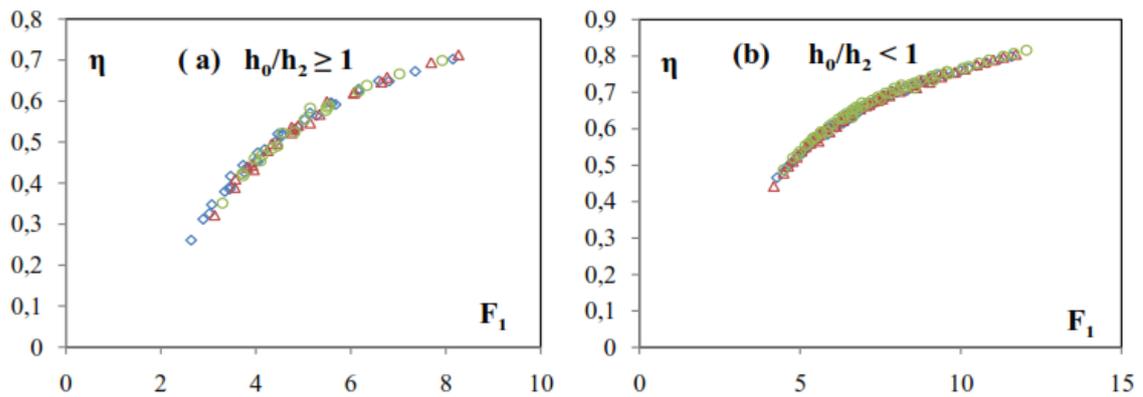


Figure 1.14 : Variation du rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les trois configurations contrôlé par : (\diamond) seuil mince, (Δ) seuil épais et (\circ) marche positive.

Cette représentation graphique montre que l'ensemble des points de mesure s'agence en un seul nuage de points dans le lit mineur. Cependant, dans la section du lit majeur, les points de mesure pour le ressaut contrôlé par une marche positive se situent légèrement au-dessus de ceux associés au seuil mince et au seuil épais. Cette observation indique que, quelle que soit la forme du seuil, l'effet de dissipation de la charge hydraulique est similaire pour les trois configurations de ressaut dans les deux lits du canal.

En effet, on peut conclure que le rendement du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal rectangulaire de section composée est indépendant de la géométrie du seuil (S).

I.3.2 Ressaut hydraulique dans un canal composé de forme en 'U'

La configuration en forme de "U" englobe une section circulaire et une section rectangulaire, et elle est de plus en plus employée comme section de transition dans les systèmes d'épuration, que ce soit pour les afflux vers des ouvrages spéciaux ou les installations de traitement des eaux usées. En raison de sa simplicité de construction et de ses excellentes propriétés d'écoulement, particulièrement en période de basses eaux, cette section s'impose comme une alternative aux sections plus complexes. En comparaison avec le profil à section circulaire, la section en "U" offre une facilité de mesurage expérimental des caractéristiques d'écoulement, permettant l'application directe des résultats des mesures, même pour des hauteurs de remplissage relativement réduites, au profil à section circulaire.

Malgré sa fréquente utilisation sur le terrain, une documentation substantielle fait toujours défaut en ce qui concerne l'évaluation des caractéristiques d'écoulement dans les profils en "U" et les sections circulaires lors d'un remplissage partiel. Les informations concernant les courbes de remous et de dépression sont limitées, et une étude expérimentale sur le ressaut hydraulique dans cette configuration en "U" n'a été entreprise qu'à partir de 1989, année où Hager, (1989) a proposé une étude approfondie. Deux ans plus tard, il a publié une seconde étude éclaircissant certains aspects fondamentaux du ressaut hydraulique dans les conduites circulaires à écoulement partiellement plein. Il convient de souligner que ces essais ont été réalisés dans une conduite profilée en "U", constituée d'un demi-cercle à la base et surmontée de deux parois verticales. La séquence de ce chapitre sera intégralement dédiée à l'approche de Hager, (1989) relative au ressaut hydraulique classique dans un canal composé profilé en "U".

1.3.2.1 Etude de Hager, (1989)

1.3.2.1.1 Expérience et analyse

Pour la réalisation des essais, HAGER a employé une rigole en aluminium de forme en "U", caractérisée par un diamètre de $D = 0,30$ m, une hauteur de $h = 0,40$ m et une longueur de 8,50 m. Le fond du canal présente une pente de 0,3 ‰, reposant sur une table constituée des éléments en béton, et l'alimentation du canal est régulée par des pompes à commande électronique.

Les propriétés géométriques de la section en forme de "U", selon l'approche de Hager (1987), sont définies par plusieurs paramètres clés. La largeur de la section, notée D , est un élément déterminant. Lorsque la profondeur d'écoulement, h , est inférieure à $\frac{D}{2}$, le débit s'écoule dans une section circulaire partiellement remplie. En revanche, lorsque $h \geq \frac{D}{2}$, le débit s'écoule dans une section rectangulaire dont la largeur est D . Ainsi, la section en forme de "U" est qualifiée de section composée, caractérisée par la distinction basée sur la valeur de y , définie comme $y = \frac{h}{D}$, où $y < 1/2$ et $y \geq 1/2$.

La figure 1.15 offre une clarification approfondie du phénomène d'écoulement tridimensionnel. Lorsque y_1 est de petite dimension, seule une fraction de la largeur du canal est occupée par le fluide. Ce phénomène résulte de la présence de la séparation au niveau du fond, où la vitesse élevée du jet détache le fluide de la base du canal est expulsée dans l'air, provoquant des

pulsations perceptibles. Dans la section frontale du ressaut, la turbulence atteint des niveaux élevés, mais diminue dans la portion aval.

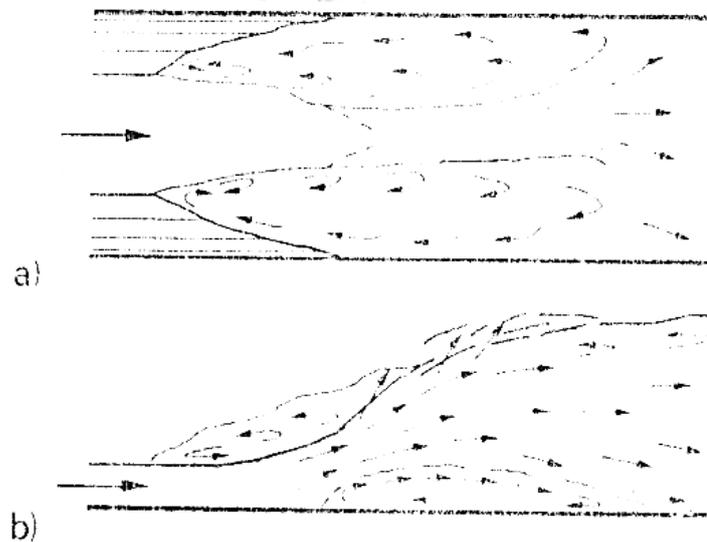


Figure 1.15 : Allure schématique de l'écoulement pour de petit y_1

Un rouleau de fond est également observé, atteignant une hauteur maximale estimée à $h_2/3$, qui disparaît complètement lorsque la profondeur relative de l'écoulement y devient plus importante. Plus en aval, des ondes se forment, et le fluide s'étend latéralement dans le canal, créant ainsi deux zones de courant de retour. Selon les observations de Hager, un ressaut hydraulique dans un canal en forme de "U" avec un faible y_1 manifeste un comportement spatial complexe, pouvant être distingué en cinq zones distinctes : (1) un jet à grande vitesse ; (2) une zone de séparation du fond axiale ; (3) une zone de séparation axiale ; (4) une zone de courant de retour latérale ; et (5) une surface à l'extrémité aval (fin du ressaut).

Conformément aux observations de Hager, le canal à profil en "U" exhibe un écoulement prédominant tridimensionnel, tel qu'illustré dans la figure 1.15. Il établit une comparaison avec l'écoulement dans une section en forme de trapèze. En raison de sa susceptibilité aux oscillations transversales et longitudinales, l'auteur déconseille l'utilisation de ce type de ressaut hydraulique sans l'incorporation d'éléments de stabilisation supplémentaires, tels qu'un bassin de tranquillisation.

1.3.2.1.2 Les caractéristiques géométriques

Dans cette section, nous explorons les principales caractéristiques géométriques selon la méthodologie de l'auteur, qui met en lumière les paramètres A , U , R , et W . Ces paramètres sont

définis comme suit : A représente la surface mouillée, U est le périmètre mouillé, R est le rayon hydraulique (calculé comme $R = A/U$), et W correspond au volume de la force de pression 'P' sous la répartition de la pression hydrostatique, divisé par le poids spécifique (ρg). Les expressions pour les deux cas distincts, à savoir lorsque $y < 1/2$ et $y \geq 1/2$, sont formulées comme suit :

Pour $y < 1/2$:

$$A/D^2 = (\theta - \sin \theta \cos \theta)/4$$

$$U/D = \theta$$

$$R/D = ((1 - \sin \theta \cos \theta)/\theta)/4$$

$$W/D^2 = (\sin \theta - \sin 3\theta/3 - \theta \cos \theta)/8$$

Ici, θ est défini comme $\theta = \cos^{-1}(1 - 2y)$, représentant l'angle au centre,

Pour $y \geq 1/2$:

$$\frac{A}{D^2} = y + \frac{\pi}{8} - \frac{1}{2}$$

$$\frac{U}{D} = 2y + \frac{\pi}{2} - 1$$

$$\frac{R}{D} = \left(y + \frac{\pi}{8} - \frac{1}{2}\right) \left(2y + \frac{\pi}{2} - 1\right)$$

$$\frac{W}{D^3} = \left(\frac{1}{2}\right) \left(y - \frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{8}\right) \left(y - \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{12}$$

En utilisant les fonctions de substitution (A/D^2 , R/D et W/D^3), nous pouvons représenter graphiquement les caractéristiques géométriques de la section en forme de "U" en fonction de la hauteur $y = \frac{h}{D}$ dans la figure 1.16. Ainsi, ces fonctions simplifient la description des sections en forme de "U" pour une intervalle de valeurs de y allant de 0 à 1.

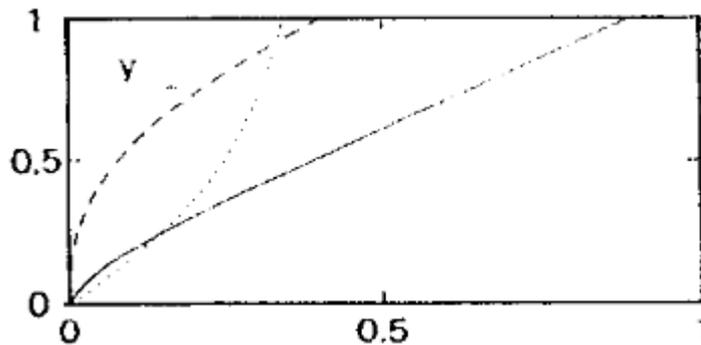


Figure 1.16 : Géométrie de la section en forme de "U" (---) A/D, (...) R/D et (----) W/D³

1.3.2.2 Etude de Achour et Debabeche, (2003)

Le contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince et épaisse dans un canal de profil 'U' a été soumis par Debabeche (2003) à une exploration théorique et expérimentale approfondie. L'analyse théorique, axée particulièrement sur l'écoulement franchissant le seuil à paroi épaisse, a permis d'établir les conditions minimales relatives au seuil. Trois paramètres clés, à savoir y_2 , q et y_1 , ont été identifiés comme des indicateurs pertinents, prenant en considération la vitesse d'approche de l'écoulement. Les développements théoriques ont explicitement défini les relations fonctionnelles $\frac{s}{D} = f(q, y_2)$ et $\frac{s}{h_1} = \Psi(q, Y)$ pour les deux types de seuils examinés. Ces relations mettent en évidence de manière évidente que la hauteur géométrique du seuil à paroi épaisse est considérablement inférieure à celle de son homologue à paroi mince. De plus, l'étude propose une relation explicite pour la hauteur relative du seuil à paroi épaisse dans un canal rectangulaire, offrant ainsi une alternative à l'équation fortement implicite de Forster et Skrinde.

L'expérimentation a été conduite en considérant sept hauteurs initiales distinctes (h) et treize seuils de hauteurs différentes (s). Cette approche a permis d'obtenir une large gamme de nombres de Froude incidents. Dans une première phase de l'étude expérimentale, l'attention s'est portée sur la variation de la hauteur relative aval $y_2 = \frac{h_2}{D}$ en fonction du débit relatif q , pour sept valeurs différentes de y_1 . Sept nuages de points dissemblables, correspondant quiconque à une valeur bien déterminée de la hauteur relative y ont été trouvés. Dans un deuxième temps l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer la variation de la longueur relative $\frac{L_j}{h_2}$ en fonction de F_1 .

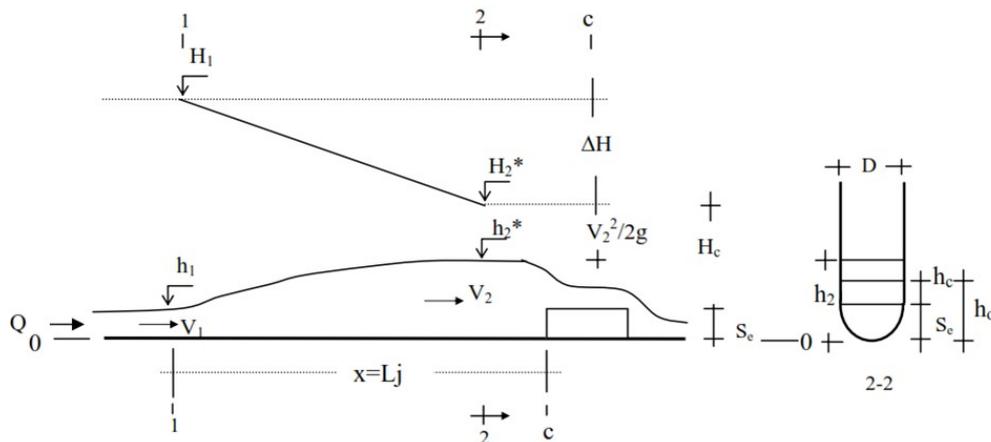


Figure 1.17 : Ressaut hydraulique à seuil épais dans un canal composé de forme en U

1.3.2.2.1 Caractérisation du ressaut hydraulique selon Achour et Debabeche, (2003)

Le phénomène du ressaut hydraulique dans un canal de forme en "U" se distingue par son comportement tridimensionnel ou spatial. Deux configurations distinctes du ressaut sont observables : l'une se situe dans la partie demi-circulaire du canal (où $\frac{h_2}{D} = 0,5$), et l'autre se forme dans la partie en forme de "U". Le ressaut dans la partie demi-circulaire, malgré son asymétrie du côté amont, se révèle plus stable que son homologue dans la partie en "U". Ce dernier présente une quasi-symétrie axiale, mais il oscille continuellement de droite à gauche et vice versa, démontrant une sensibilité particulière aux conditions de l'écoulement initial.

À la sortie de l'ouverture, l'écoulement adopte une caractéristique fortement torrentielle. La partie amont du ressaut en forme de "U" se distingue par une turbulence intense, avec un jet à grande vitesse projeté vers l'aval. Cette observation est spécifique aux ressauts développés dans la partie en "U" du canal (là où $y_2 > 0,5$). Ces caractéristiques suggèrent que le ressaut traverse un obstacle, identifié comme un rouleau de fond, atteignant une hauteur maximale de $\frac{h_2}{3}$, comme l'évoque Hager (1987) dans son étude.

La turbulence associée au ressaut commence à décroître en se déplaçant vers l'aval. Par la suite, l'écoulement fluvial est dévié sur un seuil mince. Lorsque ce seuil est dénoyé, l'écoulement immédiatement en aval ne produit plus d'impact significatif sur le ressaut.

1.3.2.2.2 Les conclusions déduites par Achour et Debabeche, (2003)

Hager (1987) montre que le rapport $\frac{L_j}{h_2}$ est environ égal à 6. Dans notre estimation de la variation de cette même longueur relative $\frac{L_j}{h_2}$ en fonction de F_1 , nous avons, également, trouvé sept nuages de points différents, présentant l'influence de la hauteur relative initiale $\frac{h_1}{D}$ sur la longueur relative $\frac{L_j}{h_2}$ du ressaut et celle-ci a été modérément définie comme étant $\frac{L_j}{h_2} = \frac{3,5}{\sqrt{q}}$. La valeur 6 du rapport $\frac{L_j}{h_2}$ a été atteinte pour une valeur de la hauteur relative $y_1 = 0,2449$.

La dernière partie de notre étude expérimentale a eu pour objet de décrire, le ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en "U". En effet, Deux configurations distinctes du ressaut sont visibles, l'une est dans la partie demi circulaire du canal et l'autre se forme dans sa partie "U". La partie amont du ressaut en "U" est caractérisée par une forte turbulence, présentant un jet à grande vitesse projeté en l'air vers l'aval. Ce jet n'est perceptible que pour les ressauts évoluant dans la partie "U" du canal ($y_2 > 0,5$).

Les observations montrent que le ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en “U”, présente un rouleau de surface et un rouleau de fond.

I.4 CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, une exploration approfondie des travaux majeurs sur les ressauts hydrauliques a été entreprise, se concentrant particulièrement sur le ressaut contrôlé par seuil mince et le ressaut forcé induit par deux seuils minces dans un canal de section composée trapézoïdale à base rectangulaire.

Dans un premier temps, nous avons présenté un aperçu des études significatives dans le domaine du ressaut classique, en mettant en lumière les contributions de Hager et al. (1990), mettant en inscription la dépendance des estimations des caractéristiques géométriques du ressaut, telles que la longueur du ressaut (L_j) et la longueur du rouleau (L_r), vis-à-vis des approches expérimentales.

Dans un second temps, Forster and Skrinde (1950) se sont fixé comme objectif d'analyser les caractéristiques d'un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil. Ils ont étudié la variation de la hauteur relative (s/h_1) du seuil en fonction du nombre de Froude (F_1) de l'écoulement incident, tout en maintenant constantes les valeurs de la position (x/h_2) du seuil pour chaque essai. Les conclusions tirées de cette investigation suggèrent que, dans une plage spécifique et bien déterminée des positions relatives du seuil, la variation de la hauteur du seuil s'est stabilisée, indiquant ainsi une certaine insensibilité de la hauteur relative du seuil par rapport au nombre de Froude (F_1).

Concernant le ressaut forcé de type "A" par seuil mince, nous avons réalisé une synthèse des différents types de ressauts forcé, alignée sur la classification de Rand (1957). Ce type de ressaut est essentiellement similaire au ressaut classique, alors que les autres variantes sont obtenues par la réduction de la hauteur d'eau aval. L'auteur a affiné la compréhension des différents configurations associés au ressaut hydraulique, et s'est engagé dans l'élaboration d'une classification détaillée applicable aux bassins équipés d'un seuil continu à leur extrémité. Ce faisant, il est devenu pionnier en définissant des cas typiques pour classer le ressaut induit par un seuil. Ces cas spécifiques englobent les variations tant en hauteur qu'en position du seuil, établissant ainsi le ressaut classique comme référence de base.

La section finale de ce chapitre vise à présenter une synthèse intégrale des caractéristiques de ressaut hydraulique en canal composé. Une observation prépondérante réside dans la génération de turbulence à l'intersection des lits dans le canal composé, engendrant une dissipation accrue de l'énergie. À cet égard, une analyse approfondie des travaux de Khattaoui and Achour (2012) sur les caractéristiques du ressaut hydraulique en lit composé a été entreprise. Une approche novatrice a été suggérée pour déterminer l'expression définitive de la force de résistance, étroitement liée au transfert de masse et à la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur.

Par ailleurs, l'étude menée par Riguet (2021) était consacrée à l'examen expérimental du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince, un seuil épais et une marche positive dans un canal de section composée rectangulaire. L'objectif initial de cette étude expérimentale était d'analyser la variation du rapport (Y) entre les hauteurs conjuguées et du rendement (η) en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. Subséquemment, une comparaison de ces caractéristiques du ressaut a été effectuée pour les trois configurations précédemment mentionnées.

Enfin, nous nous sommes orientés vers l'étude d'un ressaut hydraulique dans un canal composé de profil en "U". Cette section de notre chapitre débute par l'analyse de la recherche menée par Hager (1989). En accord avec les observations de cet auteur, le canal à profil en "U" présente un écoulement principalement tridimensionnel. Hager, a établi une comparaison avec l'écoulement dans une section en forme de trapèze, en raison de sa susceptibilité aux oscillations transversales et longitudinales, l'auteur déconseille l'utilisation de ce type de ressaut hydraulique sans l'incorporation d'éléments de stabilisation supplémentaires, tels qu'un bassin de tranquillisation.

En second lieu, nous avons examiné l'étude menée par Debabeche (2003), qui se concentre sur une analyse théorique approfondie de l'écoulement franchissant un seuil à paroi épaisse. Cette étude a permis de définir les conditions d'un seuil relatif minimal. Il est apparu que ce dernier pouvait être évalué au moyen de l'un des trois paramètres suivants : y_2 , q ou y_1 . En tenant compte de la vitesse d'approche de l'écoulement, le développement théorique a pu expliciter les relations fonctionnelles $s/D = f(q, y_2)$ et $s/h_1 = \psi(q, Y)$ pour les deux types de seuils considérés. Ces relations mettent en évidence que la hauteur géométrique du seuil à paroi épaisse est nettement inférieure à celle de son homologue à paroi mince.

Chapitre 2

Les vitesses dans le ressaut hydraulique

II.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre est une revue de la littérature sur la distribution des vitesses au sein du phénomène complexe qu'est le ressaut hydraulique, en explorant divers types de canaux. En raison des limitations et de la complexité inhérentes aux travaux menés dans ce domaine, cette revue de littérature revêt une importance cruciale pour enrichir notre compréhension de ce phénomène hydrodynamique.

Cette analyse bibliographique traite particulièrement la distribution des vitesses dans le contexte du ressaut hydraulique, mettant en évidence différentes typologies de canaux. Une exploration approfondie des travaux de mesure de la vitesse dans divers canaux, tels que les canaux rectangulaires, sera entreprise en se basant sur des références notables telles que (Rajaratnam and Subramanya, 1968), (Rajaratnam and Muralidhar, 1971), (Hager and Li, 1992), et (Chen et al., 2014). Cette première partie fournira une base solide pour comprendre les mécanismes de distribution des vitesses dans le ressaut hydraulique.

Dans un second temps, l'attention sera spécifiquement dirigée vers la distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique contrôlé, explorant les caractéristiques dans un canal de section droite triangulaire et dans un canal profilé en "U". Une analyse approfondie des travaux de recherche de Debabeche, (1996) et (Achour and Debabeche, 2003a) permettra de saisir les variations de vitesse dans ces contextes spécifiques. L'objectif principal de cette revue de littérature est de consolider notre compréhension des comportements hydrodynamiques complexes liés au ressaut hydraulique.

Les pionniers Bakhmeteff and Matzke, (1936) ont entrepris les premières démarches dans le domaine de la mesure de la vitesse appliquée au phénomène complexe du ressaut hydraulique. Leur travail initial a jeté les bases de l'exploration de ce phénomène intéressant. Rouse et al., (1959) ont considérablement enrichi la compréhension en présentant le champ des vitesses pour trois valeurs spécifiques de l'indice Froude F_1 . Cette contribution a apporté des éléments significatifs pour éclairer les nuances de l'écoulement dans le contexte du ressaut hydraulique.

II.2 LA DISTRIBUTION DES VITESSES DANS UN RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

II.2.1 Approche de Schröder (1963)

L'année 1963 a marqué une étape importante avec les travaux de Schröder, qui ont consisté en une description approfondie de la configuration de l'écoulement, en se penchant sur un cas particulier avec $F_1 = 5,1$. L'analyse de Schröder sur l'évolution longitudinale et transversale de la vitesse a révélé des connaissances cruciales, notamment, la distribution verticale près du fond, caractérisée par une zone non perturbée de hauteur z_1 et qui demeure pratiquement uniforme (figure 2.1).

Pour formaliser ces observations, Schröder (1963), a énoncé une expression adimensionnelle pour la coordonnée verticale, ajoutant ainsi une dimension théorique à la compréhension de la dynamique du ressaut hydraulique. Ses contributions successives ont élargi et approfondi la connaissance de ce phénomène complexe, ouvrant ainsi la voie à une compréhension plus fine de la distribution des vitesses dans de telles situations hydrodynamiques :

$$z = \left(\frac{h_2 - h}{h_2 - h_1} \right) \quad (2.1)$$

Alors $z_1 = z_1(h) = z_1[h(x)]$.

Les valeurs extrêmes correspondent à $z_1 = z_1(h = h_1) = h_1$ et à $z_1(h = h_2) = 0$.

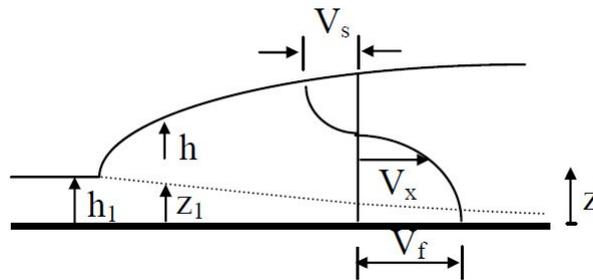


Figure 2.1 : Schéma de la coordonnée verticale du ressaut hydraulique Schröder (1963)

Ces informations relatives aux vitesses près du fond et en surface offrent la possibilité d'affiner le profil universel de la vitesse au sein du phénomène de ressaut hydraulique. En définissant $\tilde{v} = \frac{(V_x - V_s)}{(V_f - V_s)}$ comme la composante longitudinale de la vitesse en fonction de z , la figure 2.2 offre une évaluation directe de $V_x(z, x)$, une fois que $V_f(x)$, $V_s(x)$, et $h(x)$ sont connus. Cette approche permet ainsi de caractériser de manière détaillée la variation de la vitesse le long de

la coordonnée verticale (z) en fonction des paramètres déterminants V_f , V_s , et h . La figure 2.2 constitue une ressource visuelle cruciale pour arrêter et quantifier ces variations, ouvrant la voie à une compréhension plus approfondie du comportement des vitesses dans le contexte spécifique du ressaut hydraulique.

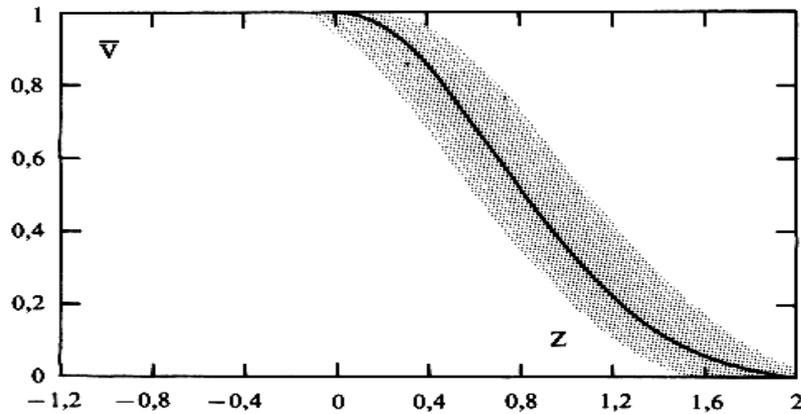


Figure 2.2 : La vitesse 'V' adimensionnelle en fonction de la composante verticale (z), Selon Schröder (1963).

II.2.2 Approche de Rajaratnam et Subramanya (1968)

Les recherches de Rajaratnam and Subramanya (1968), ont produit des conclusions concordantes, la figure 2.3 illustre la variation normalisée des vitesses u/u_m en fonction de la coordonnée verticale (Z), avec u_m représentant la vitesse maximale à la section transversale et δ_1 définissant la hauteur où $u = \frac{u_m}{2}$ avec $\partial u/\partial z < 0$. Cette représentation graphique offre un aperçu clair de l'évolution des vitesses verticales dans le ressaut hydraulique, mettant en évidence la position critique δ_1 . L'observation de cette figure fournit des indications cruciales sur la distribution des vitesses, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des caractéristiques hydrodynamiques du ressaut hydraulique.

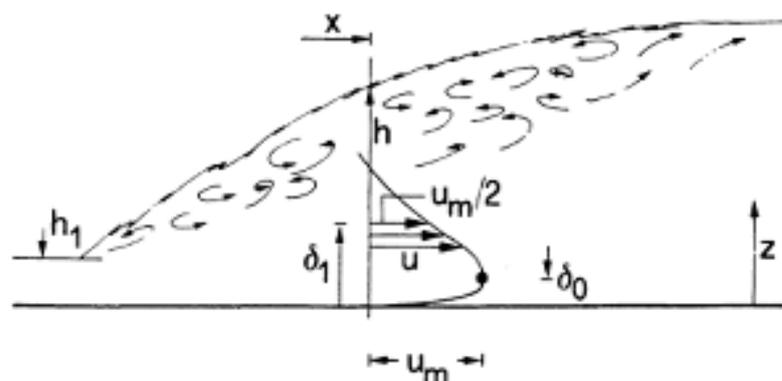


Figure 2.3 : Distribution des vitesses $U(z)$ dans la partie inférieure du ressaut

D'après Rajaratnam (1968, 1970), ses expériences donnent la relation suivante :

$$\frac{u}{u_m} = 2[Z_\delta \exp(1 - Z_\delta)]^{0.12} \quad (2.2)$$

Où $Z_\delta = \frac{5Z}{\delta_1}$ avec $\frac{u}{u_m} > 0$

D'après l'équation 2.2, la vitesse maximale a lieu à $\frac{Z}{\delta_1} = \frac{1}{5}$, par contre les auteurs ont trouvé environ $Z/\delta_1=0,18$. Par ailleurs la longueur relative x/h_1 et le nombre de Froude incident sont tels que ; $8,3 \leq x/h_1 \leq 41,7$ et $3,9 \leq F_1 \leq 9,05$.

Pour une série de valeur de la hauteur δ_1 , les résultats expérimentaux conduisent à la formulation suivante :

$$\frac{\delta_1}{h_1} = 1 + \frac{1}{15} \left(\frac{x}{h_1} \right) \quad \frac{x}{h_1} < 30 \quad (2.3)$$

D'après l'équation 2.3 l'augmentation de x/h_1 engendre celle de δ_1 .

En outre la variation de la vitesse maximale relative à la vitesse incidente u_m/v_1 en fonction de la longueur relative x/h_1 , est exprimée comme suit :

$$\frac{u_m}{V_1} = \frac{1}{42} \left[45 - \frac{x}{h_1} \right] \quad \frac{x}{h_1} < 30 \quad (2.4)$$

Pour les valeurs de $x/h_1 > 30$, la fonction u_m/V_1 tend asymptotiquement vers zéro.

L'analyse de Rajaratnam et Subramanya (1968, 1970) n'a été appliquée qu'à la partie inférieure de l'écoulement, les données concernant le rouleau de surface n'ont pas été relevées.

II.2.3 Approche de Hager (2013)

Une étude expérimentale sur la distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique classique a été menée par Hager (2013). Cinq séries de mesures ont alors été effectuées avec $4,3 < IF_1 < 8,9$. Soit les paramètres suivants

$$U = \frac{u - u_s}{u_m - u_s}, \quad Z = \frac{Z - \delta_o}{h_2^* - \delta_o} \quad (2.5)$$

La variation de la composante horizontale adimensionnelle de la vitesse moyenne U en fonction de la coordonnée verticale Z , est exprimée par la relation 2.6 pour tous les nombres de Froude IF_1 étudiés :

$$U = [\cos(100 Z)]^2 \quad 0 < Z < 1 \quad (2.6)$$

Les figure 2.4 et 2.5 montrent les points de mesures exprimant les vitesses relatives $U(Z)$ pour les nombres de Froude $F_1 = 5,5$ et $6,85$.

Dans l'équation 2.5, u_m et u_s représentent respectivement les vitesses maximales inférieures et supérieures (de l'aval vers l'amont), pour une même section transversale du ressaut. δ_0 est la distance verticale du point où $u = u_m$ (figures 2.4). Les paramètres u_m , u_{gs} et δ_0 dépendent de $X = \frac{x}{L_r}$ et de F_1 .

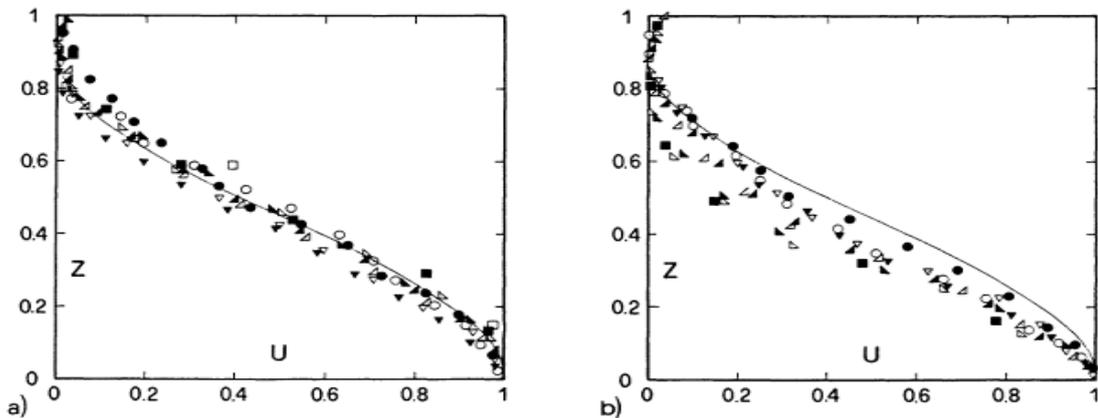


Figure 2.4 : Les vitesses $U(Z)$, pour différentes longueurs adimensionnelle ($X = x/L$). a) $F_1 = 5,50$. b) $F_1 = 6,85$. $X = (\blacksquare) 0,2 ; (\sphericalangle) 0,3 ; (\blacktriangle) 0,4 ; (\triangleleft) 0,5 ; (\blacktriangleleft) 0,6 ; (\nabla) 0,7 ; (\blacktriangledown) 0,8 ; (o) 0,9 ; (\bullet) 1$

La figure 2.5 montre la variation de la vitesse maximale inférieure relative en fonction de la longueur relative $U_m = \frac{(u_m - V_2^*)}{(V_1 - V_2^*)}$, $X = \frac{x}{L_r}$, telles que $V_1 = \frac{q}{h_1}$ et $V_2^* = \frac{q}{h_2^*}$ sont les vitesses nominales à l'amont et à l'aval du ressaut. La figure 2.5 montre que l'effet du nombre de Froude F_1 sur U_m est faible, et que $U_m(x)$ peut être exprimée approximativement en fonction de la longueur relative X comme suit :

$$U_m = \exp(-2 X^{1.8}) \quad 0 > X > 1.4 \tag{2.7}$$

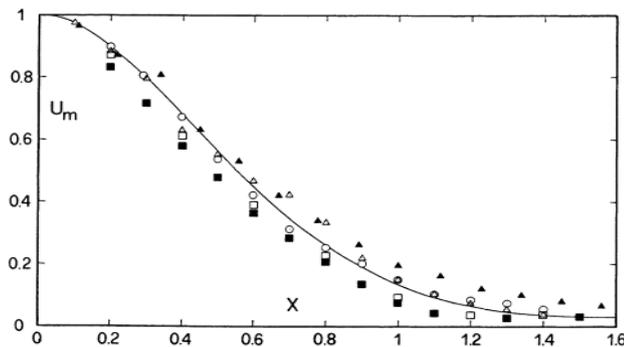


Figure 2.5 : Vitesse maximale inférieure relative (U_m) en fonction de la longueur relative X . (-) Eq (2.18). $F_1 = (o) 4.3, (\dots) 4.95, (\sim) 5.5, (\cdot) 6.85, (0) 8.9$

La vitesse maximale supérieure relative $U_s = \frac{u_s}{V_2^*}$ a été aussi représentée en fonction de la longueur relative X (figure 2.6) :

$$U_s = -\sin\left[\frac{X + 0.1}{1.1}\right] \quad 0.05 < X < 1,4 \quad (2.8)$$

$U_s(X > 1)$ correspond à la vitesse de surface.

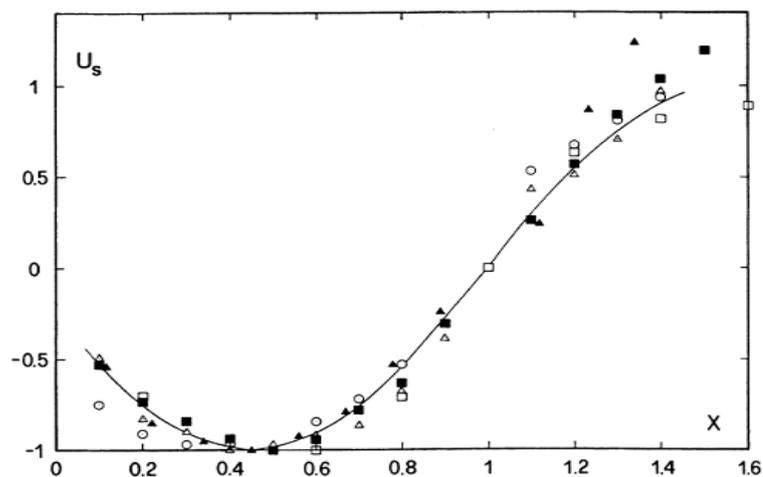


Figure 2.6 : Vitesse maximale supérieure relative U_s en fonction de la longueur relative X. Même notation que la figure 2.5, (---) Courbe tracée selon l'équation 2.8.

La variation de la hauteur (Z) est représentée dans la figure 2.7 et donne en fonction de X l'expression suivante :

$$\frac{\delta_o}{(h_2^* - h_1)} = 0,06 \left[1 + 5 \left(X - \frac{1}{4} \right)^2 \right] \quad 0,05 < X < 1,2 \quad (2.9)$$

La figure 2.7 montre que pour $X \leq 0,9$, la courbe suit parfaitement les points de mesures.

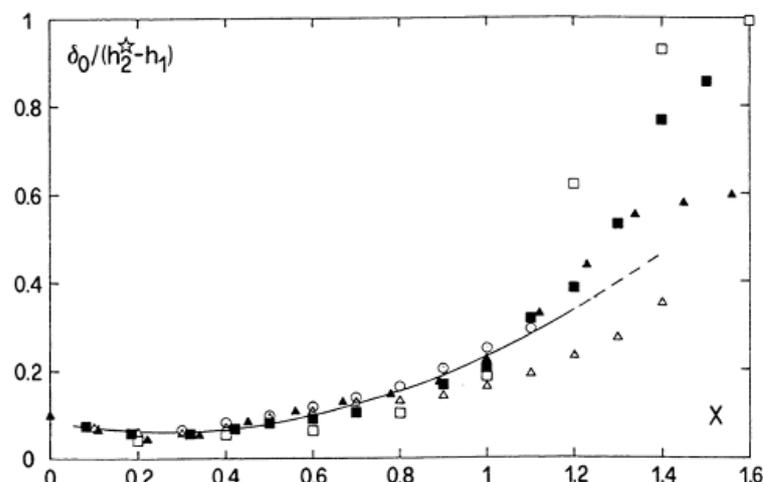


Figure 2.7 : Accroissement de la hauteur relative $\delta_o / (h_2 - h_1)$ en fonction de la longueur relative X. Même notation que la figure 2.6, (---) Courbe tracée selon l'équation 2.9.

La caractéristique longitudinale du ressaut qui est la plus facile à observer est la longueur du rouleau L_r . Pour $0 < x < L_r$, les vitesses de surface V_s sont opposées à la direction principale de l'écoulement. Il faut donc distinguer entre la zone du rouleau et la zone à l'aval du rouleau. Soit :

$$X = \frac{x}{L_r}, f = \frac{V_s}{V_t}$$

Où $V_t = -(3/8)(Y-1)^{1/2}V_2$ est une vitesse de référence ; elle dépend de la vitesse moyenne aval $V_2 = \frac{Q}{bh_2}$ et du rapport des hauteurs conjuguées $Y = \frac{h_2}{h_1}$.

La figure 2.8 permet de déterminer $V_s(x)$ d'après les essais de Schröder (1963). Dans cette figure, $X = 0$ correspond au pied amont du ressaut et $X = 1$ correspond à l'extrémité aval du rouleau ($x = L_r$).

Pour $x > L_r$, la coordonnée longitudinale est définie par Schröder (1963) :

$$X^* = 1 - \frac{3}{2}\sqrt{y-1}(X-1), F^* = \frac{V_s}{V_2} \tag{2.10}$$

On retrouve alors la même fonction $f(X) = f^*(X)$ pour $0 < X < 1$ et $X > 1$ (figure 2.9). Bien que le fuseau soit important, cette figure indique néanmoins les tendances prépondérantes pour les vitesses de surface.

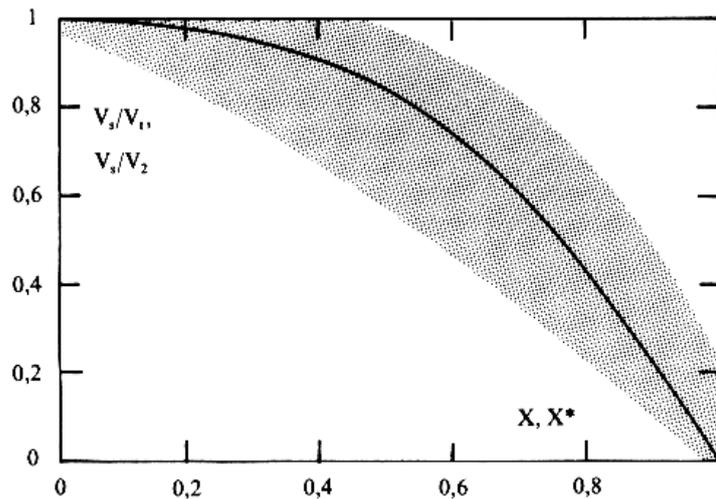


Figure 2.8 : Vitesse de surface adimensionnelle pour $0 < x < L_r$ et $x > L_r$ ($X = x/L_r$, $f = V_s / V_t$).

La vitesse de l'eau près du fond du canal V_f dans un ressaut hydraulique revêt un intérêt particulier dans un cours d'eau. Si ces vitesses sont trop élevées, un endommagement sérieux par érosion risque de se manifester.

Soit :

Où V_1 et V_2 sont les vitesses à l'amont et à l'aval du ressaut.

La figure 2.10 reflète les observations de Schröder (1963). On constate que $f(X=1) = 0,2$, d'où $V_f = 0,2V_1 + 0,8V_2$.

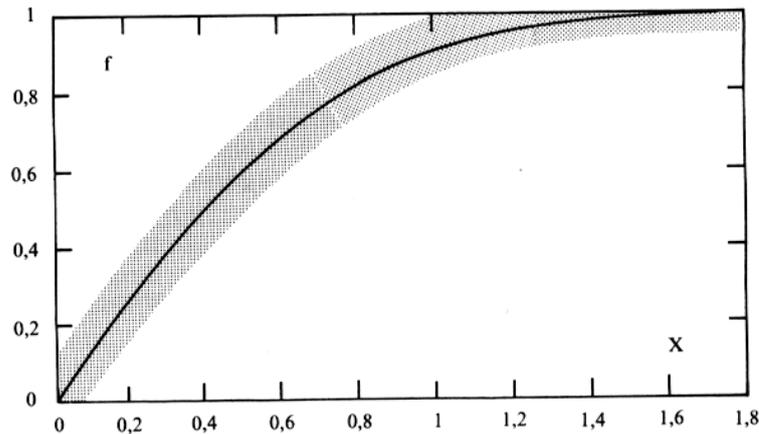


Figure 2.9 : Vitesse relative $f = (V_f - V_2) / (V_1 - V_2)$ le long du fond en fonction de la coordonnée longitudinale relative x / L_r .

Pour $X = 1,5$, la figure 2.10 donne $f \cong 0,96$, donc $V_f = 0,04V_1 + 0,96V_2$. $X = 1,5$ correspond à peu près à l'extrémité aval du ressaut (longueur L_j).

Avec $\frac{V_1}{V_2} = Y = 2.F_1 - 21$ (équation de Hager) et $V_2 = \frac{Q}{bh_2} = \frac{V_1 h_1}{h_2}$, on déduit :

$$\frac{V_f}{V_2} \cong 1 + 0,06.F_1 \quad \text{pour } X = 1,5.$$

II.2.4 Approche de Chen et al., (2014)

Chen et al, ont entrepris une série d'expérimentations dans un modèle de bassin de tranquillisation, utilisant un canal rectangulaire, avec plusieurs jets submergés horizontaux. Ce modèle spécifique a été conçu pour reproduire les caractéristiques du bassin de la centrale hydroélectrique du barrage Xiangjiaba, situé sur la rivière Jinsha en Chine.

Il convient de noter que le bassin de tranquillisation avec plusieurs jets horizontaux immergés demeure un domaine de recherche relativement sous-exploré sur le plan théorique. Bien que les essais expérimentaux aient été conduits dans le cadre du modèle proposé, la compréhension théorique de ces bassins, en particulier ceux avec plusieurs jets horizontaux immergés, demeure incomplète. Ces recherches visent à combler cette lacune en explorant les aspects théoriques et

pratiques de ce type spécifique de bassin de tranquillisation, en se basant sur le modèle proposé et en tirant des leçons des similitudes avec la centrale hydroélectrique de barrage Xiangjiaba.

II.2.4.1 Disposition expérimentale

Les expériences ont été conduites dans un canal d'eau ouvert d'une longueur de 5 mètres, doté d'une section transversale rectangulaire de $0,5 \times 0,8$ m (largeur \times hauteur). Pour une meilleure compréhension, la figure 2.12 présente un schéma de l'installation expérimentale. La section d'émission de jets comprend cinq jets décalés de manière parallèle, organisés en une configuration à deux couches. Cela se traduit par la présence de trois orifices dans la couche supérieure et deux orifices dans la couche inférieure, disposés de manière alternée. Chacun des jets a une largeur (b) de 0,05 m et une hauteur (h) de 0,05 m.

Concernant les mesures rapportées dans cette étude, le point d'intersection entre l'axe de la dalle et la goutte est considéré comme l'origine du système de coordonnées cartésiennes. Dans ce système, la direction transversale est définie comme positive en aval (X), la direction latérale comme Y, et la direction verticale comme positive vers la surface libre (Z). Les variables x, y et z représentent respectivement la distance de la goutte au point de mesure, la distance du centre de l'orifice au point de mesure, et la distance du centre de l'orifice au point de mesure dans le plan vertical.

L'utilisation d'un système de coordonnées local est privilégiée, avec les coordonnées locales O', O'' représentant les centres d'orifices des couches supérieure et inférieure respectivement. Cette approche facilite la compréhension précise des positions relatives des ouvertures et des points de mesure dans le cadre de l'expérience.

On concèdera les paramètres de ces expériences menées par les conditions du ressaut hydraulique dans le tableau suivant :

Tableau 2.1 : Paramètres hydrauliques de l'expérience de Chen et al. (2014)

IF ₁	h = h _t [cm]	h ₁ [cm]	S ₁ [cm]	S ₂ [cm]	Nombre des modèles
$2.15 < F < 8.71$	$26 < h_t < 63$	5	50 à 30 (4 sections)	15 à 62,8 (4 sections)	4 (a, b, c et d)

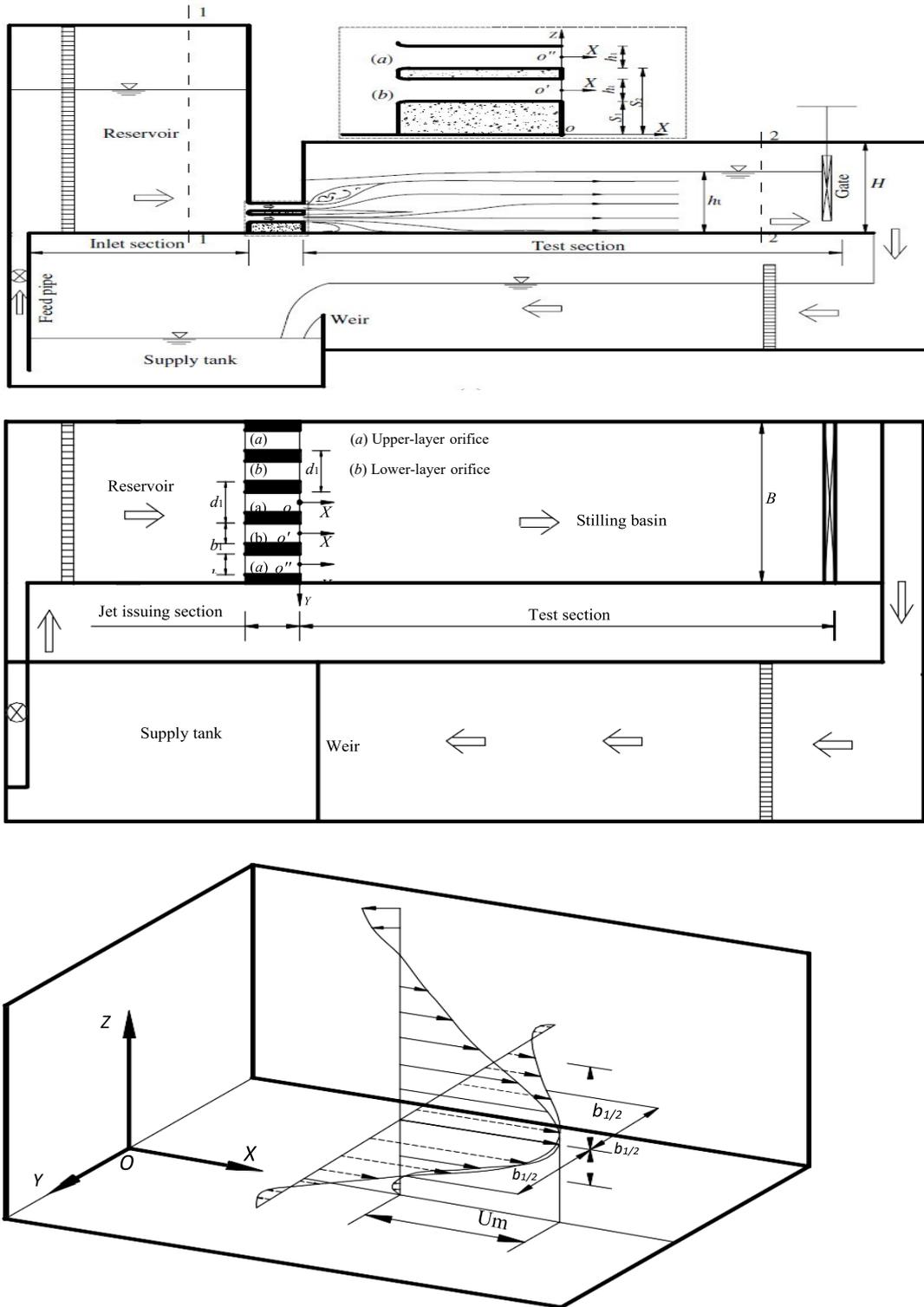


Figure 2.10 : Schéma de principe de l'installation d'essai

Des constatations importantes ont été émises par Chen et al. :

- Les chercheurs ont noté que les jets dans les orifices de la couche inférieure peuvent facilement être immergés, délimitant ainsi la hauteur de chute et formant un rouleau inférieur sous ces jets.
- À mesure que le nombre de Froude augmente progressivement, tout en maintenant la hauteur de chute constante, la profondeur d'eau en aval correspondant à la formation des cinq modèles d'écoulement augmente également.
- Une observation significative est que, avec l'augmentation du nombre de Froude (IF), la région du jet submergé, la région de l'impact et la région du jet de paroi apparaissent successivement autour des jets principaux.
- La dissipation de la majeure partie de l'énergie se produit à l'avant du bassin de tranquillisation, couvrant environ un tiers de sa longueur totale, tandis que le flux reste régulier à l'extrémité du bassin de tranquillisation.

II.2.4.2 Les vitesses des couches horizontales

Dans cette partie, une analyse approfondie a été entreprise pour confronter les résultats obtenus dans cette étude à ceux d'autres chercheurs opérant dans le même domaine et dans des conditions similaires, spécifiquement sur le type de canal examiné. Afin de mieux appréhender la configuration de l'écoulement, des plans de vitesse dans le sens de l'échelle (X-Y) ont été déployés le long de la ligne centrale du jet, couvrant une distance allant jusqu'à $\frac{x}{h} = 20$ pour différentes décharges. Les figures 2.11 et 2.12 illustrent la distribution de la vitesse sur ces plans horizontaux, regroupant toutes les configurations en une figure pour des exécutions variées. Les variables clés utilisées pour cette analyse comprennent U_m comme échelle de vitesse, U comme la vitesse en différents points de mesure, $\frac{b_1}{2}$ comme échelle de longueur (représentant la vitesse à mi-hauteur), et y comme distance du point de mesure au centre de l'orifice.

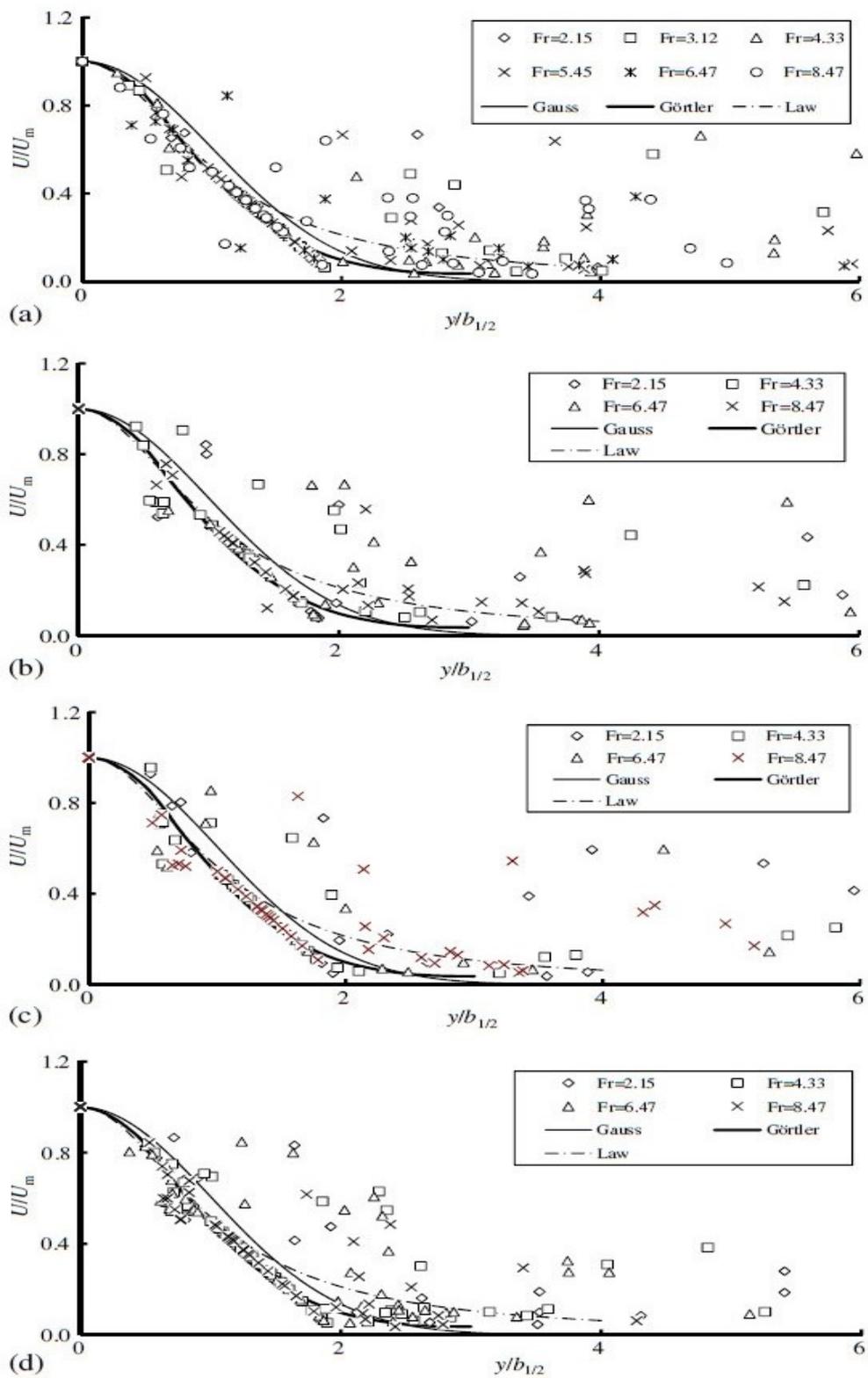


Figure 2.11 : Les vitesses horizontales des orifices de la couche supérieure

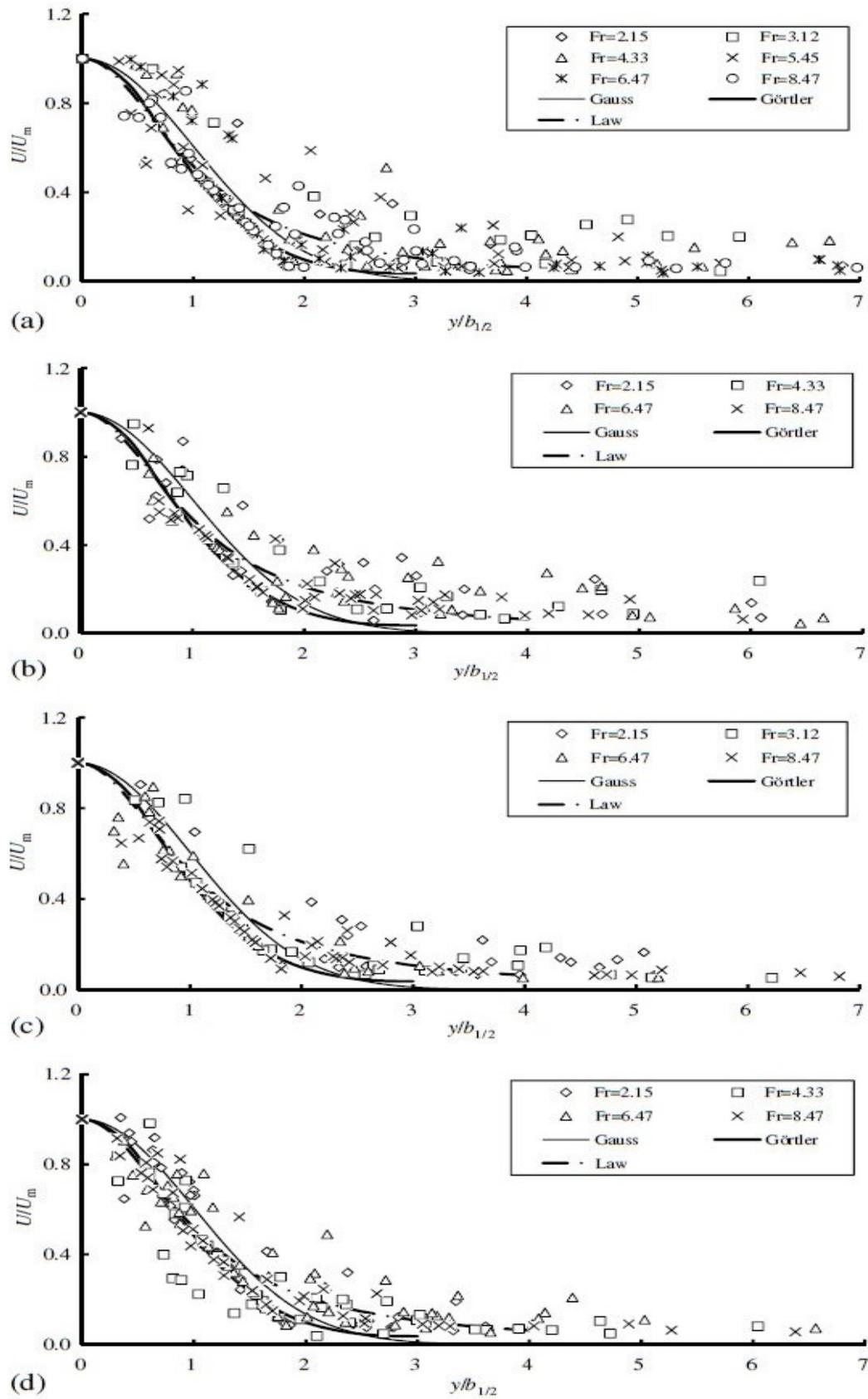


Figure 2.12 : Les vitesses horizontales des orifices de la couche inférieure

II.2.4.3 Discussion des résultats

Selon les conclusions tirées par Chen et al. (2014) des figures 2.11 et 2.12, plusieurs observations significatives ont été formulées pour les couches supérieure et inférieure :

- La vitesse atteint son maximum au début de la formation du ressaut hydraulique, ce phénomène se manifeste dans le premier tiers de la distance totale du bassin de dissipation.
- La vitesse diminue de manière substantielle en direction du seuil, avec une baisse significative sur une distance x donnée.
- Lors de l'approche du seuil et particulièrement à la sortie de la zone de ressaut hydraulique, la vitesse atteint son minimum.

Par ailleurs, Chen et al. (2014) ont effectué des analyses approfondies des profils des vitesses relatives (U/U_m) horizontales pour les couches supérieure et inférieure. Des tendances similaires ont été observées dans la région $\frac{y}{b_{1/2}} < 1,5$, tandis que des différences notables sont apparues dans la région $\frac{y}{b_{1/2}} > 2,0$.

II.2.4.4 Analyse comparative

Cette section met en lumière les analyses de Chen et al. (2014) en les comparant aux résultats des travaux antérieurs.

Pour les ouvertures de la couche supérieure, les valeurs de U/U_m dans la région $\frac{y}{b_{1/2}} < 1,5$ sont similaires à Görtler, (1954) et Law and Herlina, (2002). Elles se rapprochent également de Görtler, (1954) dans la plage $1,5 < \frac{y}{b_{1/2}} < 2,0$, mais sont considérablement différentes dans la région $\frac{y}{b_{1/2}} > 2,0$ en raison de conditions turbulentes et de l'interaction intense entre les jets des deux couches.

Pour les ouvertures de la couche inférieure, nos valeurs de U/U_m dans la région $\frac{y}{b_{1/2}} < 1,5$ sont proches de Görtler, (1954) et Law and Herlina, (2002), et se rapprochent de Law and Herlina, (2002) dans la plage $\frac{y}{b_{1/2}} > 2,0$. La distribution de vitesse des ouvertures de la couche inférieure

est similaire à Law and Herlina, (2002), avec une légère divergence, satisfaisant approximativement la distribution de vitesse d'un jet typique.

La disparité entre les distributions de vitesse des orifices de la couche supérieure et de la couche inférieure s'explique par le degré d'immersion des jets. Les orifices de la couche supérieure, avec un faible degré d'immersion, sont influencés par le rouleau de surface du ressaut hydraulique. En revanche, les orifices de la couche inférieure, avec un degré d'immersion plus important, sont moins affectés. L'interaction substantielle entre les jets des deux couches contribue à cette divergence complexe.

II.3 LA DISTRIBUTION DES VITESSES DANS UN RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL PROFILE EN 'U' SELON L'APPROCHE DE DEBABECHE, (2003)

En 2003, Achour et Debabeche ont mené une étude expérimentale sur la distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique classique dans un canal de forme 'U'. Cette recherche a été réalisée avec différentes hauteurs initiales du ressaut, représentées par la variable h_1 , couvrant une plage étendue de valeurs du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident. Les hauteurs initiales étaient comprises entre 23 mm et 61 mm, avec une plage de $3,75 \leq F_1 \leq 12$. L'appareil utilisé pour cette étude était le Micro-moulinet.

Selon les conclusions de (Debabeche, 2003a), l'analyse de la variation de la vitesse moyenne horizontale V en fonction de la profondeur h pour quatre ouvertures différentes indique que les vitesses sont généralement maximales au fond et diminuent en remontant vers la surface (figure 2.13). À proximité de la position L_j , où le régime d'écoulement n'est plus torrentiel, le profil des vitesses devient quasi-uniforme. Il est également noté que d'une section à l'autre, les vitesses diminuent progressivement et augmentent avec l'augmentation du nombre de Froude.

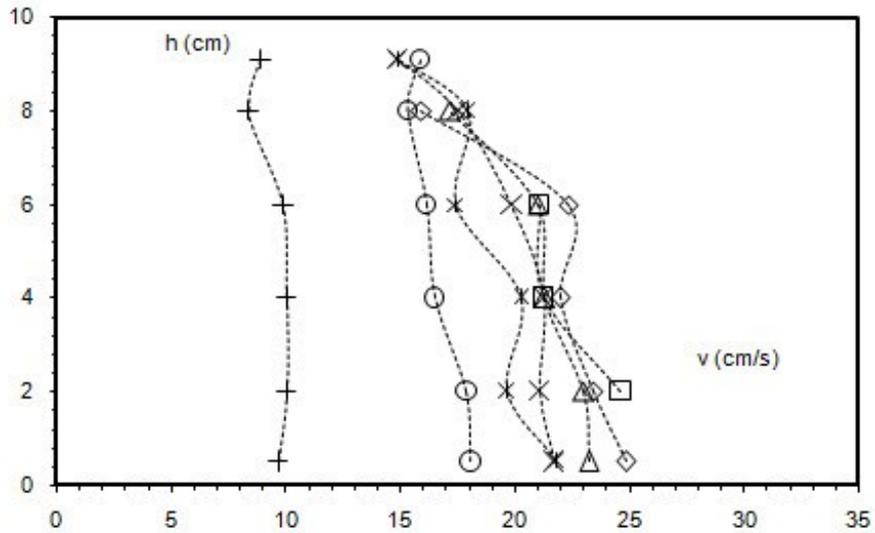


Figure 2.13 : Profil des vitesses moyennes horizontales du ressaut classique dans l’axe de symétrie du canal, pour différentes positions $x(\text{cm})$: (\square)30, (\diamond)40, (\triangle)50, (x)60, ($*$)70, (o)90, ($+$)110. $h_1=2,3$ cm. $IF_1 = 5,35$. $L_j = 100$ cm, $h_2=9,6$ cm.

De plus, les mesures expérimentales mettent en évidence la présence d'un rouleau de fond, clairement perceptible seulement pour des nombres de Froude relativement élevés. Par exemple, pour une hauteur amont h_1 de 5,2 cm, le rouleau de fond apparaît à partir de $F_1 = 3,67$, évoluant dans un intervalle de position relative : $\frac{1}{3} \leq \frac{x}{L_j} \leq \frac{3}{5}$ (figure 2.14)

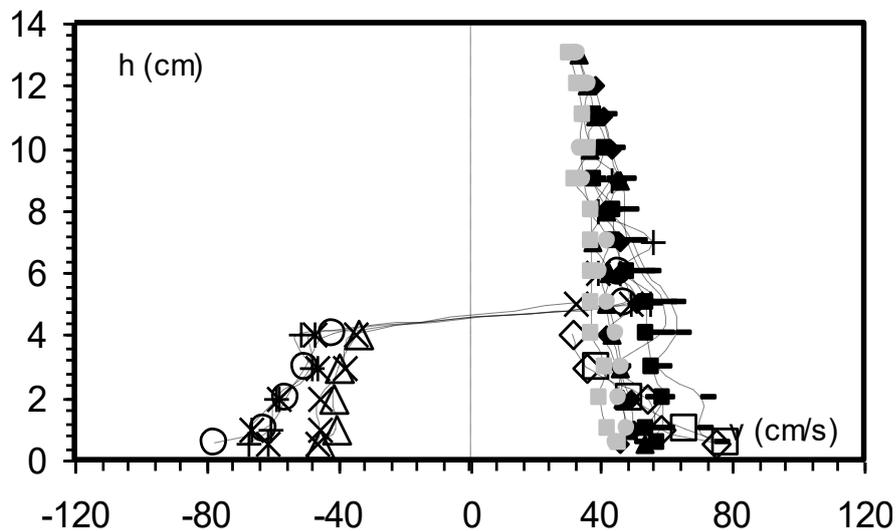


Figure 2.14 : Ressaut classique. Profil des vitesses moyennes horizontales dans l’axe de symétrie du canal, pour différentes positions $x(\text{cm})$: (\square)30, (\diamond)40, (\triangle)50, (x)60, ($*$)70, (o)80, ($+$)90, ($-$)100, ($-$)110, (\blacksquare)120, (\blacklozenge)130, (\blacktriangle)140, (\bullet)160. $h_1=5,2$ cm. $IF_1=3,69$. $L_j=150$ cm, $h_2=13,5$ cm.

Achour and Debabeche, (2003) proposent une analyse des relations pouvant exister entre la vitesse au fond V_f et d'autres caractéristiques du ressaut. L'étude expérimentale révèle initialement qu'il existe une relation entre la vitesse moyenne horizontale relative au fond $\frac{V_f}{V_1}$ et le nombre de Froude F_1 , pour différentes positions x . Cette vitesse relative $\frac{V_f}{V_1}$ diminue progressivement avec l'augmentation de F_1 (figure 2.15).

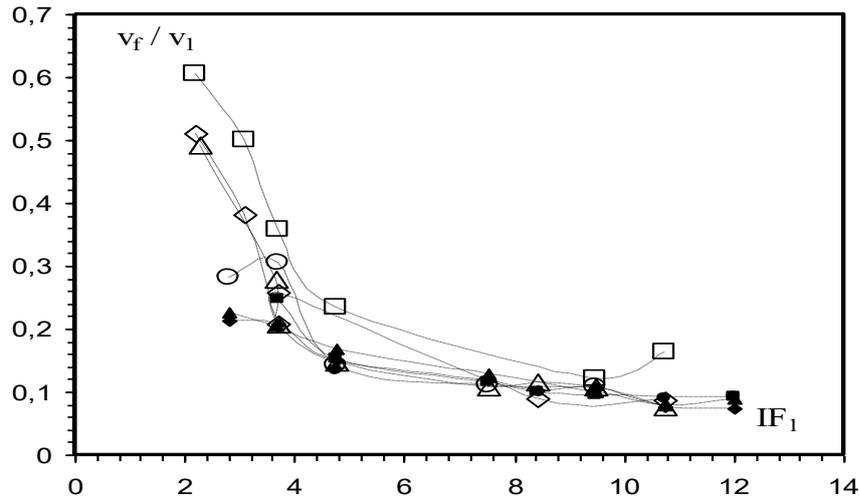


Figure 2.15 : Ressaut classique en canal profilé en “U”. Variation de la vitesse moyenne horizontale relative V_f/V_1 en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, pour huit positions x : $x(\text{cm}) = :(\square)30, (\diamond)50, (\triangle)70, (\circ)90, (\blacksquare)110, (\blacklozenge)130, (\blacktriangle)160, (\bullet)180$.

II.4 LA DISTRIBUTION DES VITESSES DANS UN RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL DE SECTION TRIANGULAIRE SELON L'APPROCHE DE DEBABECHE, (1996)

La recherche de Debabeche (1996), est dédiée à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil dénoyé, à paroi mince et épaisse, à un angle d'ouverture de 90° . L'objectif de l'expérimentation était d'obtenir une perspective qualitative sur la distribution des vitesses le long de l'axe longitudinal du canal, tant à l'intérieur du ressaut qu'à l'aval de celui-ci. Les mesures des vitesses horizontales ont été effectuées à l'aide d'un micro-moulinet.

Tableau 2.2 : Paramètres hydrauliques de l'expérience de Debabeche (1996)

IF_1	Q [l/s]	Δx [cm]	h_1 [cm]	L_r [cm]	L_j [cm]
7,68	9,508	5	5	170	200

Pour illustrer ces expériences, considérons le tableau ci-dessus, où h_1 représente la hauteur de la section initiale et Δx la tranche de l'écoulement précédant le ressaut. L'auteur ont observé que, à la section de l'écoulement de profondeur $h = 9$ cm, située à $x = 20$ cm en aval de la section initiale du ressaut, les vitesses sont élevées partout à une distance inférieure ou égale à $h = h_1 = 5$ cm à partir du fond du canal. La vitesse moyenne de l'écoulement, notée V_1 , est de 380 cm/s, et chaque particule liquide constituant l'écoulement initial du ressaut est animée d'une vitesse moyenne dépassant les 300 cm/s.

Selon Debabeche (1996), cette influence diminue progressivement à mesure que l'on se déplace vers l'aval, jusqu'à la section située à environ $x = 2L_r/3$ du pied du ressaut. Les figures 2.16 à 2.19 présentent des profils de vitesses horizontales dans quelques sections verticales à l'intérieur du domaine occupé par le ressaut. La position de ces sections est définie par la distance relative $\frac{x}{L_r}$, où L_r représente la longueur du rouleau. Les lignes horizontales en trait discontinu indiquent la hauteur initiale h_1 du ressaut, et la zone située en dessous de ces lignes correspond à la zone d'influence du jet sortant, pour laquelle les vitesses n'ont pu être évaluées en raison de leurs valeurs élevées.

La figure 2.19 révèle que la vitesse de cette particule est passée d'une valeur initiale dépassant les 300 cm/s à une valeur finale d'environ 60 cm/s sur une distance $x = 2.L_r$.

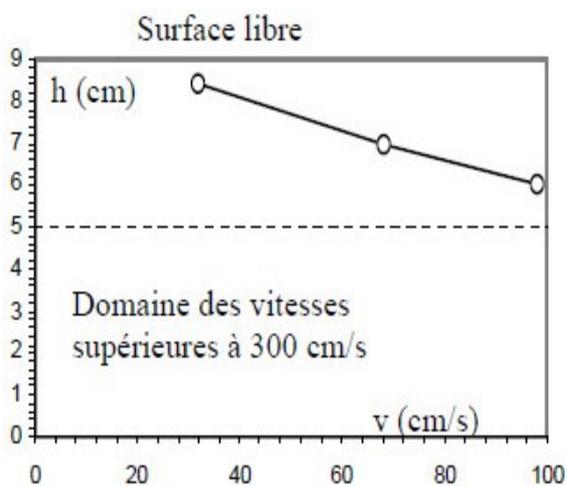


Figure 2.16 : Les vitesses moyennes horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $x/L_r=0,12$.

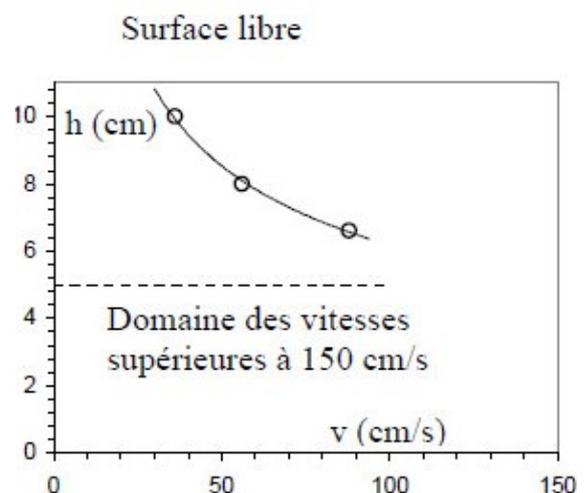


Figure 2.17 : Les vitesses moyennes horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $x/L_r=0,2$.

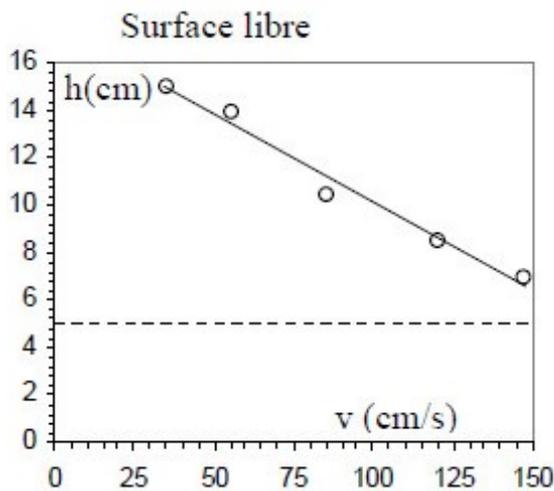


Figure 2.18 : Les vitesses moyennes horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $x/L_r = 0,41$.

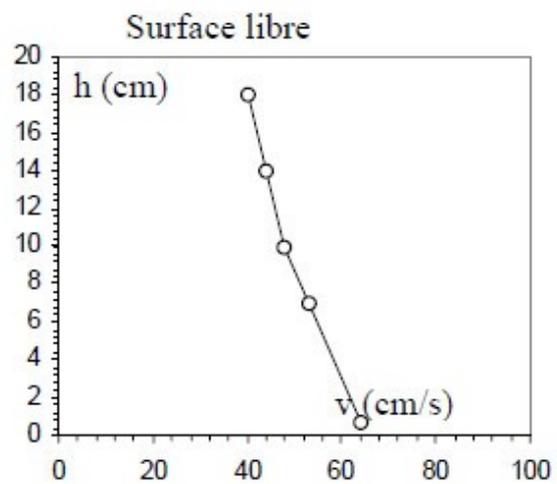


Figure 2.19 : Les vitesses moyennes horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $x/L_r = 0,65$.

La diminution significative de la vitesse peut être expliquée par la distribution spatiale du jet caractérisant l'écoulement initial le long de la distance x . Initialement peu immergé, le jet diverge sous une hauteur d'eau de plus en plus importante. À une certaine distance du pied du ressaut, le jet se détache progressivement du fond du canal, créant ainsi une zone d'eau claire d'épaisseur croissante.

Debabeche (1996) propose l'idée que, dans le cas du ressaut en canal de section droite triangulaire, le rouleau caractéristique n'est pas une structure de surface observable, du moins comme dans un canal rectangulaire. Les profils de vitesse illustrés dans les figures 2.16 à 2.19, qui concernent le domaine du ressaut, ne montrent aucune vitesse "négative" dans l'axe longitudinal du canal, indiquant l'absence d'un véritable rouleau de surface. Cependant, l'auteur note des zones de retour d'écoulement, situées latéralement de part et d'autre de l'axe longitudinal du canal, comme observé dans les figures 2.20 et 2.22.

Ces figures représentent des profils définis pour des sections localisées respectivement à $x/L_r = 1,1$; $1,2$; $1,3$ et $1,5$. Ces sections sont positionnées à des distances x spécifiques du début du ressaut, telles que $L_r < x < L_j$, $x = 1,05$. $L_j = 210$ cm, et enfin $x = 1,29$. $L_j = 258$ cm. Ces observations suggèrent une complexité dans la structure du ressaut, avec des variations de vitesse qui ne correspondent pas simplement à un rouleau de surface conventionnel, mais plutôt à des zones de retour d'écoulement latérales.

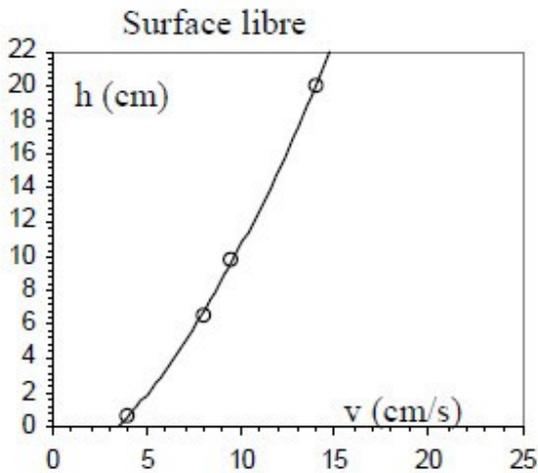


Figure 2.20 : Les vitesses moyennes horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $x/L_r=1,10$.

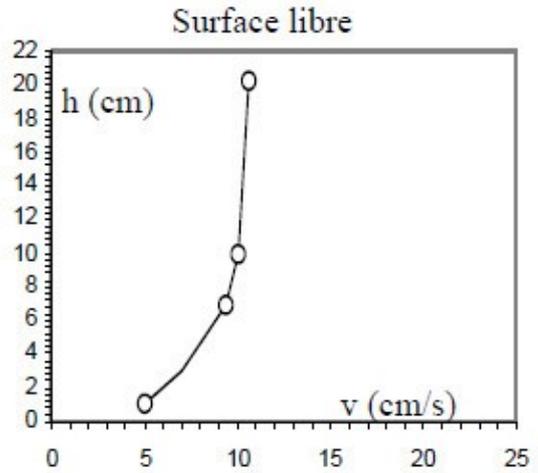


Figure 2.21 : Les vitesses moyennes horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $x/L_r=1,23$.

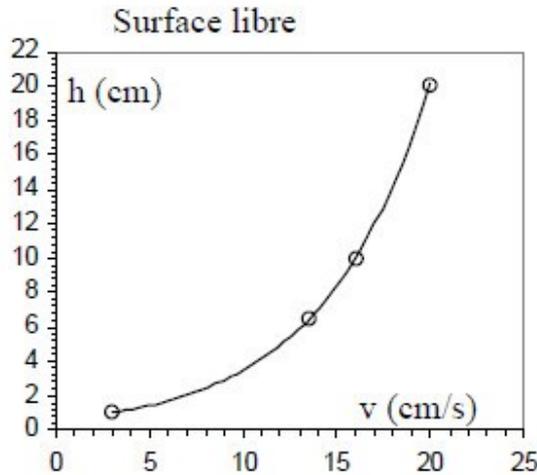


Figure 2.22 : Les vitesses moyenne horizontales dans une section du ressaut triangulaire à $\frac{x}{L_r} = 1,50$.

Le profil intermédiaire illustré dans la figure 2.22 dévoile une distribution quasi uniforme de la vitesse sur 70% de la profondeur de l'écoulement. Ces profils mettent en évidence une tendance à la diminution des vitesses vers le fond du canal. Une réduction de la vitesse à la surface libre de l'écoulement est également observée, à l'exception du cas représenté par la figure 2.24. Cette observation particulière peut être attribuée à la proximité du seuil à paroi mince, qui contrôle le ressaut et est situé à proximité de la section de mesure.

Ces résultats soulignent la complexité de la dynamique du ressaut contrôlé par un seuil dénoyé, avec des profils de vitesse non uniformes, des variations significatives le long de la profondeur de l'écoulement et l'influence directe du seuil sur la distribution des vitesses.

II.5 CONCLUSION

Cette phase conclusive de notre revue bibliographique a été consacrée à des investigations fondamentales sur la distribution des vitesses au sein de ce phénomène complexe, qu'est le ressaut hydraulique. Ce chapitre a exploré divers travaux menés dans des canaux de section rectangulaire et profilé en "U" pour un ressaut classique, les études approfondies de Rajaratnam et Subramanya (1968, 1970), ainsi que celles de Hager (1992), ont permis d'établir des relations fonctionnelles cruciales reliant les caractéristiques du ressaut aux variations des vitesses.

Schröder, (1963) et Rajaratnam, (1965a) ont décrit complètement le modèle d'écoulement, au moins en ce qui concerne la vitesse et la pression moyennes dans le temps. Rajaratnam a limité ses expériences à la zone d'écoulement vers l'avant. Il a pu démontrer la similitude des profils de vitesse qui pourraient être représentés par une distribution légèrement modifiée du jet mural classique. Nous avons également examiné une partie des résultats relatifs aux vitesses horizontales dans un canal rectangulaire, provenant de l'étude de Chen et al. (2014).

Dans la seconde partie du chapitre, nous avons consacré notre attention à l'approche de Debabeche, (2003), explorant la distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique classique, au sein d'un canal de section droite profilé en 'U'. L'analyse des points de mesure expérimentale a révélé la possibilité d'établir une relation entre les vitesses moyennes horizontales relatives $\frac{V_f - V_1}{V_2 - V_1}$ et les positions relatives $\frac{x}{L_j}$.

Par la suite, une analyse approfondie a été présentée pour un canal de section triangulaire, en se basant sur l'étude de Debabeche, (1996). Cette recherche a mis en lumière la distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique, en fournissant des profils détaillés des vitesses horizontales, offrant ainsi un aperçu approfondi de cette configuration distinctive.

Ces travaux conjoints enrichissent notre compréhension des divers aspects de la distribution des vitesses dans le contexte complexe du ressaut hydraulique, posant ainsi les fondements pour des recherches futures dans ce domaine.

Chapitre 3

Matériels et méthodes expérimentales

III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre de notre étude expérimentale, nous commencerons par fournir une description détaillée de l'équipement utilisé dans nos expérimentations, ainsi que des protocoles associés aux divers essais. Il à noter que tous les travaux ont été exécutés au sein du laboratoire d'hydraulique de l'université de Biskra.

En premier lieu, nous décrivons l'équipement utilisé dans notre expérimentation, tel que le modèle expérimental constituant le canal de section en forme composée avec une base rectangulaire et une partie supérieure trapézoïdale, fabriqué en plexiglas (PMMA) et lié à un système d'eau en circuit fermé. En présentant aussi, les éléments essentiels pour déclencher notre phénomène hydraulique (le ressaut) incluent le convergent, qui nous fournit la hauteur initiale H_1 , les seuils à parois minces et le déversoir rectangulaire pour calculer le débit. Enfin, l'instrument principal de mesure de la vitesse est le micro-moulinet.

En deuxième lieu, nous décrivons le protocole de développement des deux types de ressauts, contrôlés et forcés de type 'A', ainsi que le processus des essais de mesure des vitesses ponctuelles dans nos configurations de ressaut.

L'objectif est de caractériser finement ces deux phénomènes et leurs similitudes/différences afin de mieux appréhender les mécanismes hydrauliques mis en jeu lors du franchissement d'un seuil dans un canal composé.

III.2 MODEL EXPERIMENTAL

III.2.1 Description du canal

Le canal expérimental, illustré dans la figure 3.1 ainsi que dans les figures 3.2.a et 3.2.b, se compose d'un bassin d'alimentation connecté à un canal de mesure présentant une section composé trapézoïdale symétrique avec une base rectangulaire. Les talus du trapèze ont un angle d'inclinaison de 45° et sont reliés par une conduite circulaire en PVC de 115 mm de diamètre. Ce système fonctionne en circuit fermé, intégrant une pompe (figure 3.1) qui alimente un convergent en charge débouchant dans le canal de mesure. La longueur totale du canal est de 5 mètres, offrant une distance adéquate pour favoriser la formation du ressaut. En aval, le canal est connecté à une autre section de canal de forme rectangulaire (0.6 m x 0.6 m), où un déversoir rectangulaire, dépourvu de hauteur de pelle avec contraction latérale (figure 3.6), permet la

mesure directe du débit. Pour la mesure des vitesses, le canal est équipé d'un chariot fixé qui porte un Micro-moulinet.



Figure 3.1 : Photographie du modèle expérimental du canal

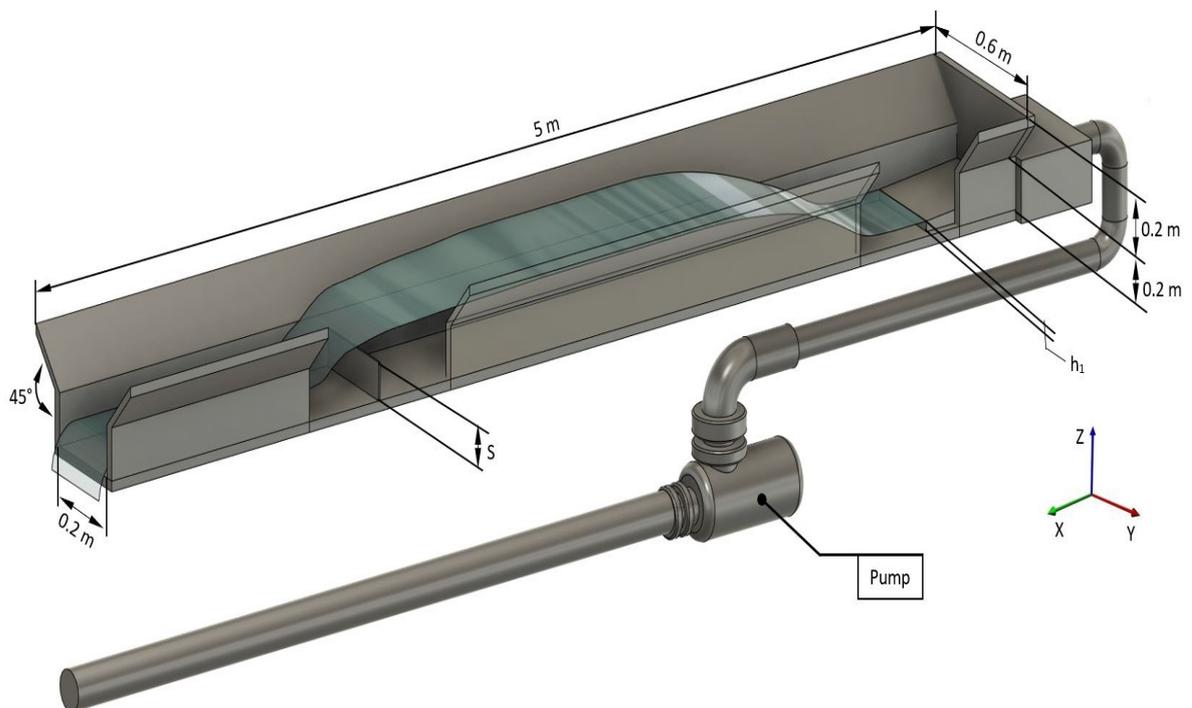


Figure 3.2 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal à base rectangulaire, ayant servi à l'expérimentation.



Figure 3.3 : Photographie de la forme du canal

III.2.2 Les seuils à parois minces

Les seuils à parois minces, constitués de fer et adoptant une forme rectangulaire avec une largeur constante de 20 cm, sont intégrés à notre dispositif expérimental. Ces seuils présentent des hauteurs variables, notées H_S ($H_S = 9$ cm, 14 cm, 15 cm), et sont fixés sur des supports métalliques stables (fig. 3.4 et 3.5). En utilisant ces seuils, nous avons mis en place deux configurations de ressauts distinctes : le ressaut contrôlé, impliquant l'utilisation de deux seuils de hauteurs différentes (14 cm et 15 cm), et le ressaut forcé, avec l'utilisation de deux seuils de hauteurs distinctes (9 cm et 15 cm).

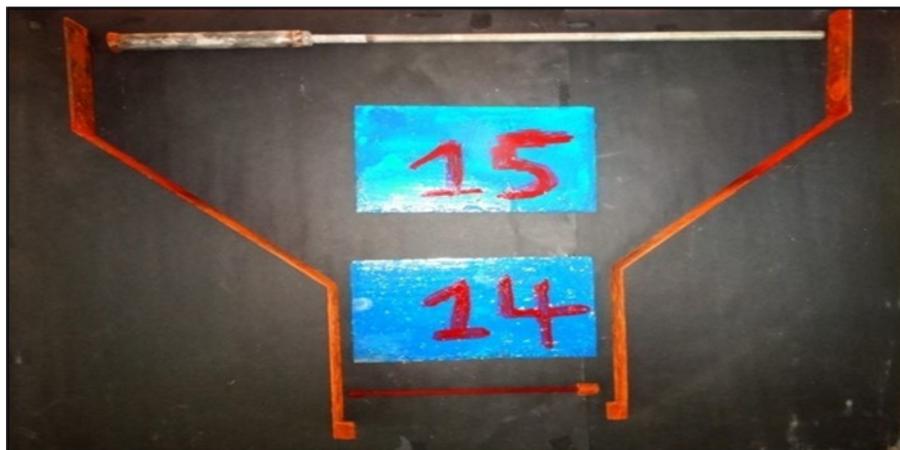


Figure 3.4 : Photo des seuils minces avec leurs supports pour le ressaut contrôlé.



Figure 3.5 : Photo des seuils minces avec leurs supports pour le ressaut forcé de type "A".

III.3 APPAREILLAGES DE MESURE

III.3.1 Déversoirs de mesure de débit de l'écoulement

Le débit volume Q ainsi que la hauteur de l'écoulement pour le déversoir (H_d) sont des grandeurs qui nécessitent un appareillage spécifique. La hauteur initiale H_1 du ressaut est assimilée à l'ouverture du convergent en charge générant l'écoulement incident ($H_1 = 2$ cm et 3 cm) (fig. 3.6). On mesure la profondeur H_d à l'aide d'un Limnimètre à vernier à double précision. Les valeurs de H_d obtenues seront injectées plus tard dans la formule du débitmètre à déversoir rectangulaire de HACHEMI Rachedi, (2006) (fig. 3.5).

$$Q = 0,3794 B \sqrt{2g} \beta (1 + 0,16496 \beta + 2,0712 \beta^2) H_d^{3/2} \quad (3.1)$$

Avec :

$$\beta = b/B$$

Q : Le débit en (m³/s).

B : La largeur du canal en (m) ; et $B=0.6$.

g : L'accélération de la pesanteur (m/s²).

β : Rapport de forme ; ($\beta = 0.40$) La condition d'application de cette relation est: $\beta < 0.45$.

b : Largeur de l'échancrure en (m) ; ($b=0.24$ m).

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



Figure 3.6 : Photo du déversoir rectangulaire



Figure 3.7 : Photo des convergents

III.3.2 Mesure de la profondeur de l'écoulement "Limnimètre"

Sauf pour la hauteur initiale du ressaut, qui est assimilée à l'ouverture due à la section de sortie du convergent en charge, nous avons utilisé un Limnimètre pour évaluer les profondeurs d'eau dans le canal de mesure. Cet instrument se compose d'une règle métallique graduée sur une seule face et est pourvu, à sa partie inférieure, d'une pointe verticale appelée pointe limnométrique, dont le rôle est d'effleurer la surface de l'eau (fig. 3.8).

Correction et reformulation : La lecture du Limnimètre se déroule en deux étapes ; tout d'abord, on lit la graduation sur la règle située juste au-dessus de zéro du vernier, puis on relève le nombre de cinquantièmes en face de la division qui coïncide ou qui est la plus proche d'une division de la règle.

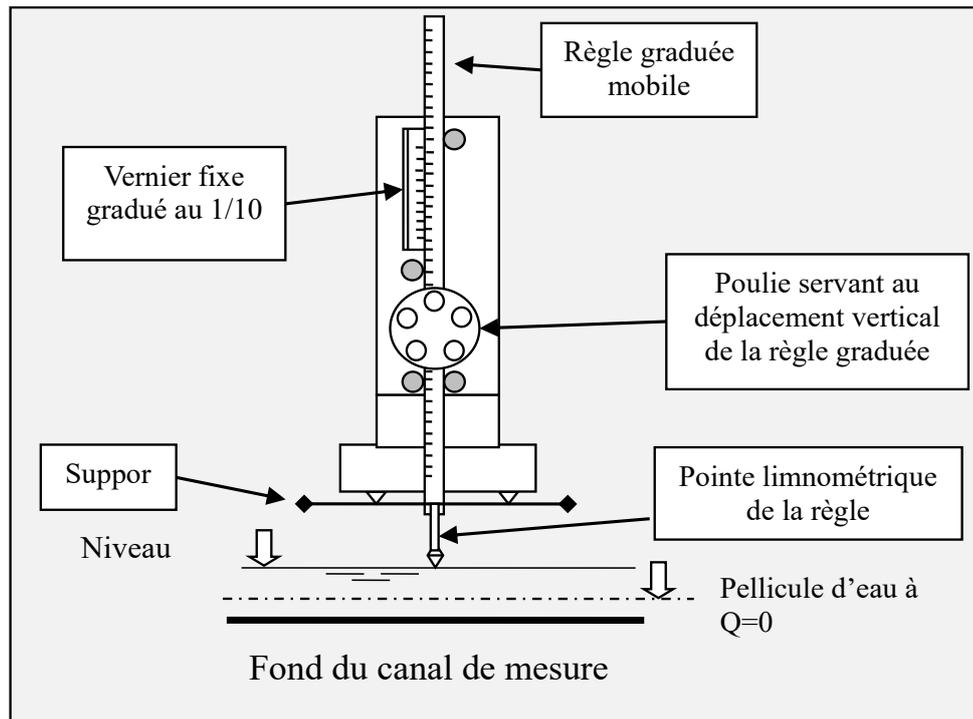


Figure 3.8 : Schéma illustratif du limnimètre

III.3.3 Instruments de mesure des vitesses moyennes de l'écoulement

La vitesse moyenne initiale, désignée par U_1 , est définie comme le rapport du débit mesuré (Q) à partir de l'équation précédente (3.1) et de la section transversale de l'ouverture du convergent (A_1). Par ailleurs, la mesure des vitesses locales moyennes horizontales sur notre grille maillage est effectuée au moyen d'un Micro-moulinet (fig. 3.9), qui est connecté à un dispositif appelé "Indicateur digital". Ce dernier permet la lecture de la fréquence du signal émis par la rotation de l'hélice du Micro-moulinet.

L'indicateur analyse le signal capté, affichant les résultats de vitesse à la fois sur son écran intégré et sur un ordinateur (fig 3.9). Les résultats sont présentés sous forme d'une valeur numérique et d'une courbe graphique exprimant la vitesse. Cette représentation visuelle est rendue possible grâce à une application spécifique à l'appareil de transfert.

L'indicateur, en tant qu'appareil portable, fonctionne à une fréquence de 50-60 Hz et est alimenté par quatre piles rechargeables de 4,8V/500mA. Il est capable de lire la fréquence en une seconde ou sur une période de 10 secondes. Le Micro-moulinet peut fournir des valeurs de vitesses locales allant jusqu'à 150 cm/s.



Figure 3.9 : Photo de la Micro moulinet et ses instruments annexes

Le micro-moulinet est déplacé de manière verticale, longitudinale et transversale le long du canal à l'aide de notre chariot, installé sur notre canal modèle. Ce dispositif permet une évaluation précise des vitesses, se limitant toutefois à la plage de 0 à 150 cm/s. Cette limitation est particulièrement notable pour les sections immédiatement adjacentes à la section initiale du ressaut. Ces sections se caractérisent par un écoulement turbulent intense, similaire à un jet, avec des vitesses moyennes pouvant atteindre voire dépasser les 300 cm/s.

Deux configurations de ressaut ont été expérimentées, à savoir le ressaut forcé de type A et le ressaut contrôlé. Pour ces deux configurations, la distribution des vitesses moyennes horizontales est présentée sur 28 sections longitudinales. Chaque section comprend quatre profils, et de même, une dizaine de sections transversales est également pourvue de quatre profils.

III.4 PROTOCOLE DES ESSAIS

III.4.1 Ressaut hydraulique contrôlé par seuil a paroi mince

Pendant le déroulement des essais, en ajustant le débit et donc le nombre de Froude F_1 , l'introduction d'un seuil à paroi mince, positionné à une distance LS du point d'origine du ressaut (comme illustré dans les figures 3.8 et 3.9), a donné lieu à la formation d'un ressaut contrôlé.

L'augmentation du nombre de Froude F_1 a simultanément entraîné le déplacement du ressaut vers l'aval ainsi que l'extension de la longueur de son rouleau, notée L_R . La portée spatiale ΔX sur laquelle le ressaut s'étend a également été élargie. Afin de le rétablir à sa position initiale, environ 5 cm de la sortie du convergent, il a été nécessaire de surélever le seuil de hauteur (S) et de le déplacer vers l'aval.

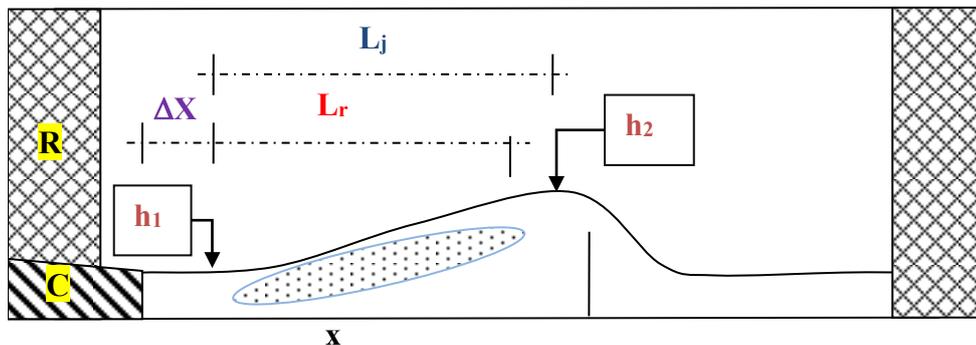


Figure 3.10 : Ressaut contrôlé par seuil mince

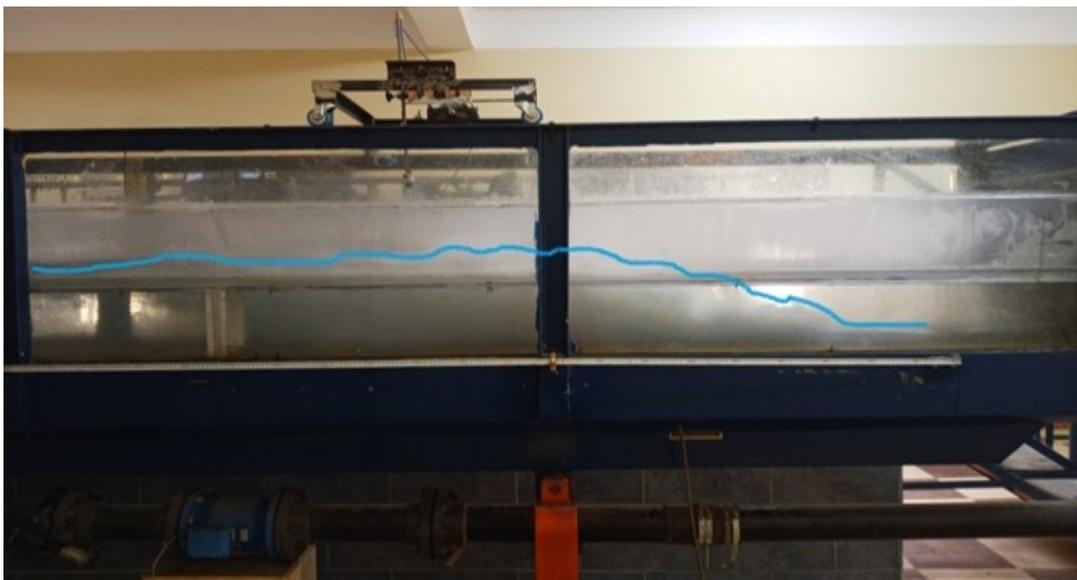


Figure 3.11 : Photo d'un ressaut hydraulique contrôlé dans un canal trapézoïdal à base rectangulaire.

Après l'acquisition de la forme complète du ressaut (comme illustré dans les figures 3.10 et 3.11), nous entreprenons les étapes suivantes pour chaque hauteur H_s et position X du seuil :

- Mesure de la hauteur de l'écoulement en amont du déversoir (H_d).
- Calcul du débit 'Q' correspondant à ' H_d ', en appliquant la relation (3.1).
- Calcul du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident en utilisant la relation suivante :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} \quad (3.2)$$

- Nous procédons également à la mesure des caractéristiques géométriques du ressaut, comprenant :
 - La longueur du rouleau (L_R),
 - La longueur du ressaut (L_J),
 - La hauteur conjuguée aval du ressaut (H_2).
- De plus, nous calculons la section initiale du convergent A_1 , où $A_1 = a_2 * H_1$.

III.4.2 Ressaut hydraulique Forcé de type "A" par seuil à paroi mince

Un premier seuil à paroi mince, positionné à une distance L_S du début du ressaut, induit l'apparition de ce dernier (fig. 3.12). L'emplacement d'un second seuil à paroi mince, situé à l'extrémité aval du canal, conditionne la variation du niveau de la hauteur d'eau en aval.

Si le rapport L_R/L_S est égal à l'unité, le ressaut forcé est de type "A" où $L_B = L_S + L_{RF}$, L_B est la longueur du bassin, L_S est la longueur de la position du seuil, L_{RF} est la longueur du rouleau à l'aval du seuil, et L_{H_2} est la distance entre le pied du ressaut et la position où H_2 devient constante.

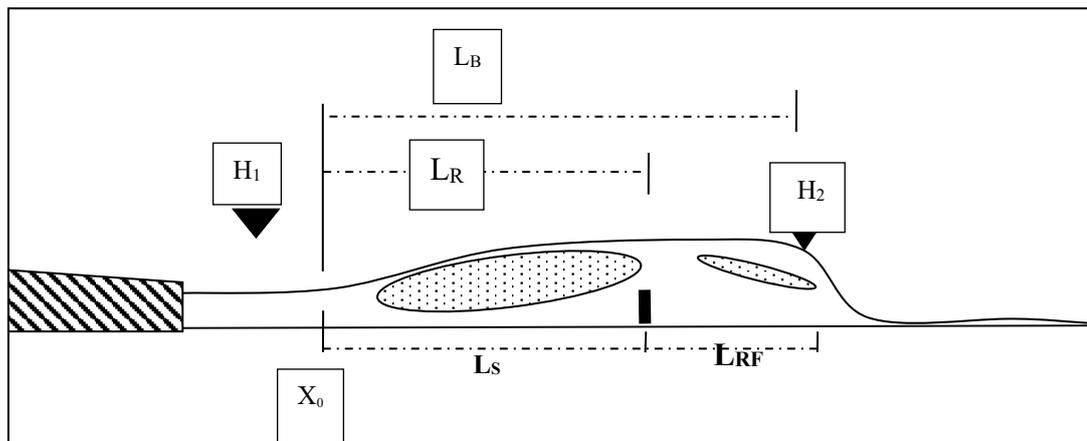


Figure 3.12 : Ressaut forcé type A par seuil mince.

III.4.3 Opérations de mesure de la vitesse

Pour chaque coordonnée (X, Y, Z) de la position de la sonde de l'hélice du micro-moulinet, correspond une mesure de vitesse moyenne horizontale $U(X, Y, Z)$. Cette mesure est effectuée sur une durée d'environ une minute, représentant la moyenne d'une dizaine de valeurs de vitesses horizontales en un point.

Ainsi, un ensemble de plus de 600 points de mesures expérimentales, pour chaque type des deux ressauts réalisés dans notre canal, compose ces points de mesure qui sont répartis sur 28 sections longitudinales et plusieurs sections transversales dans des régions cruciales.

Chaque point de mesure est caractérisé par ses coordonnées X, Y et Z. Les axes de coordonnées sont définis dans la figure 3.11 comme suit :

- L'axe X, la coordonnée longitudinale, correspond à l'axe du canal ; le zéro est placé au pied du ressaut ; l'écoulement se fait dans la direction de l'axe X ; le déplacement longitudinal se fait généralement avec un pas de 10 cm.
- L'axe Y, la coordonnée transversale, parcourt la largeur du canal ; le zéro est placé dans l'axe du canal ; à chaque déplacement transversal correspond un pas de 4 cm.
- L'axe Z, les coordonnées verticales, possède son zéro sur le fond horizontal du canal et est dirigé du bas vers le haut ; le déplacement vertical se fait avec un pas de 2 cm.

Pour chaque type de ressaut et pour un débit (Q) et un nombre de Froude incident IF_1 donné, les opérations suivantes sont effectuées :

- **Opération n° 1** : On fixe d'abord la hauteur Z et la position transversale Y, puis on fait varier la position longitudinale X à un pas de 10 cm jusqu'à atteindre le seuil.
- **Opération n° 2** : Une fois l'axe des X terminé, on fait alors varier la position sur l'axe Y d'un pas de 4 cm et on varie une seconde fois la position X, tout en maintenant la hauteur Z fixe.
- **Opération n° 3** : Lorsque l'axe des Y est terminé, on fait varier la hauteur Z d'un pas, on refait ensuite les opérations 1 et 2, et ainsi de suite jusqu'au balayage complet de la hauteur Z.

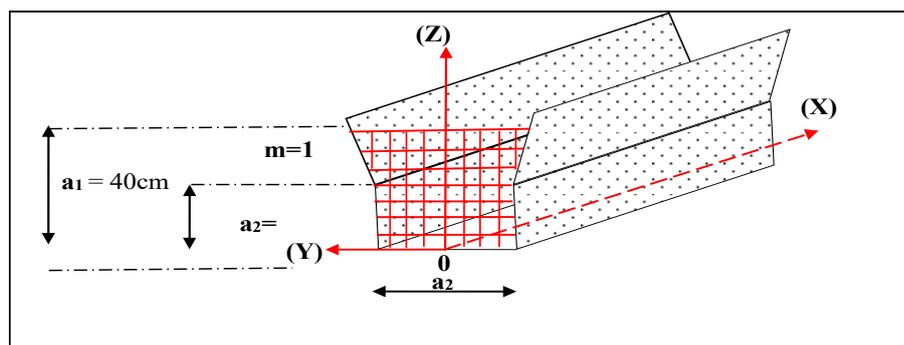


Figure 3.13 : Système d'axes adoptés pour la mesure des vitesses

III.5 CONCLUSION

Ce chapitre est dédié à l'examen approfondi du modèle expérimental, qui a constitué la pierre angulaire de notre investigation sur le ressaut hydraulique dans un canal à section droite trapézoïdale, pourvu d'une marche positive. Nous avons minutieusement étudié les instruments de mesure employés dans le cadre de notre travail en laboratoire, les illustrant par des photographies et des schémas dans le but d'acquérir toutes les données nécessaires concernant les caractéristiques du ressaut hydraulique.

Pour la mesure des débits, nous avons opté pour le débitmètre à déversoir rectangulaire, conforme au modèle proposé par Hachemi Rachedi, (2006), en raison de son efficacité. Malgré les incertitudes découlant des lectures de H_2 , influencées par l'instabilité du plan d'eau, nous avons pu obtenir des résultats acceptables. La hauteur H_d a été quantifiée au moyen d'un limnimètre.

Par la suite, nous avons exposé l'appareil de mesure des vitesses, le Micro-moulinet, ainsi que ses instruments connexes. Le protocole des essais et les opérations de mesure de la vitesse ont également été présentés de manière détaillée.

Chapitre 4

Résultats et Analyses

IV.1 INTRODUCTION

Cette partie de notre travail est scindée en deux parties distinctes ; la première se penche sur la distribution des vitesses moyennes horizontales dans un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince, tandis que la seconde se concentre sur un ressaut forcé de type 'A' à travers deux seuils minces. Ces deux configurations de ressauts hydrauliques sont analysées dans un canal à section composée, caractérisé par un trapèze avec une base rectangulaire et de pente nulle.

Pour chaque type de ressaut, nous conduisons deux séries d'essais distinctes, chacune intégrant des paramètres géométriques hydrauliques variés. Plus précisément, pour les ressauts contrôlés et ceux de type 'A', nous manipulons divers paramètres tels que les hauteurs des convergents ($H_1 = 2$ ou 3 cm) et des seuils ($H_S = 15, 14$ et 9 cm), ainsi que d'autres variables comme le débit (Q) et la position du seuil (L_s). Ceci vise à réguler de manière précise la configuration expérimentale des ressauts hydrauliques distincts.

Les résultats expérimentaux se composent de deux grandes séries pour chaque type de ressaut. La première comprend une étude approfondie de 648 points de mesure de vitesse. Pour confirmer ces résultats, une seconde série d'expériences avec 286 points mesurés est entreprise pour clarifier la distribution générale des vitesses dans le ressaut de notre canal composé. Cette approche est également répliquée pour le ressaut forcé de type "A" avec 408 points de mesures de vitesse pour le premier essai et 360 points de mesure pour le deuxième essai.

Nous analysons la distribution de ces mesures des vitesses moyennes horizontales sur environ 24 sections longitudinales (Y) réparties sur le même plan (Z_1). Cette procédure est reproduite sur d'autres plans (Z_2, Z_3, Z_4), ainsi que sur plusieurs sections transversales à différentes positions (X) pour chaque essai des deux types de ressaut mentionnés précédemment.

L'objectif fondamental de ces expérimentations est de mesurer et d'analyser les variations de vitesse à travers les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé et forcé de type "A" dans un canal composé. Nous mettons particulièrement l'accent sur l'analyse descriptive des changements de vitesse et de direction à l'intérieur du ressaut, dans le but d'explorer et de mieux comprendre le comportement des vitesses, notamment dans la zone de turbulence de nos différentes configurations des ressauts hydrauliques.

IV.2 RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLÉ PAR SEUIL A PAROI MINCE

IV.2.1 Présentation et analyse de la première série d'essais

A la partie amont de l'écoulement, s'étendant sur environ 110 centimètres à partir du point de convergence, se forme un jet intense, initiant un rouleau excessivement turbulent. Cette turbulence intense met à l'épreuve la capacité des instruments à enregistrer les fréquences caractéristiques de cette région. Plus spécifiquement, la vitesse de l'écoulement au fond du ressaut hydraulique atteint parfois 400 cm/s, alors que la vitesse moyenne initiale à la sortie du point de convergence est estimée à environ $U_1 \approx 446,26$ cm/s.

Il est important de noter que seule la composante horizontale des vitesses dans la direction de l'écoulement (coordonnées X) a été enregistrée par la sonde, la composante verticale n'ayant pas été mesurée (Wang et al., 2023).

La vitesse maximale génère une turbulence significative de l'écoulement, laquelle joue un rôle indispensable dans la formation du rouleau et la formation de bulles d'air de diverses tailles. Il est à noter que certaines de ces bulles se propagent à contre-courant par rapport à l'écoulement principal du canal. Le cycle du rouleau arrive à son terme avec la dissipation de ces bulles d'air, à partir de quoi on constate une transition progressive de l'écoulement vers un régime plus calme. Les sinuosités de la surface de l'écoulement se diminuent graduellement, ce qui permet une observation en continu de la hauteur finale (H_2) de notre écoulement. À partir de cette mesure, une estimation approximative de la longueur du ressaut (L_J) peut être déduite.

Les caractéristiques hydraulique et géométrique de la première série d'essais, du ressaut contrôlé par seuil mince, sont enregistrées dans le tableau 4.1 ci-dessous.

Tableau 4.1 : Caractéristiques hydrauliques de la première série d'essais du ressaut contrôlé.

F_1	Q [l/s]	U_1 [cm/s]	A_1 [cm ²]	Hs [cm]	H_1 [cm]	H_2 [cm]	L_S [cm]	L_R [cm]	L_J [cm]
8,22	26,78	446,26	60	15	3	28,4	400	189	232

IV.2.1.1 Distribution des vitesses dans des sections longitudinales

La présentation des vitesses moyennes horizontales dans les sections longitudinales est obtenue à partir des données recueillies sur plusieurs points répartis le long de la largeur du canal, désignés par les coordonnées Y (cm) de 0, -4, +4, -8, +8, -10, +10, où Y= 0 correspond à la section médiane de l'écoulement. Ces mesures de vitesse sont effectuées à un même niveau (Z).

Les résultats expérimentaux des vitesses en fonction de leur position sont représentés graphiquement sous forme de courbes. La figure 4.1 présente de manière synthétique la distribution générale des vitesses dans la section médiane de l'écoulement ($Y = 0$). Au début du ressaut sont observées des vitesses maximales ainsi que des courants inverses par rapport à la direction principale de l'écoulement. Les valeurs moyennes des vitesses horizontales, à chaque emplacement (X), révèlent une diminution progressive des vitesses à mesure que l'on se rapproche du seuil.

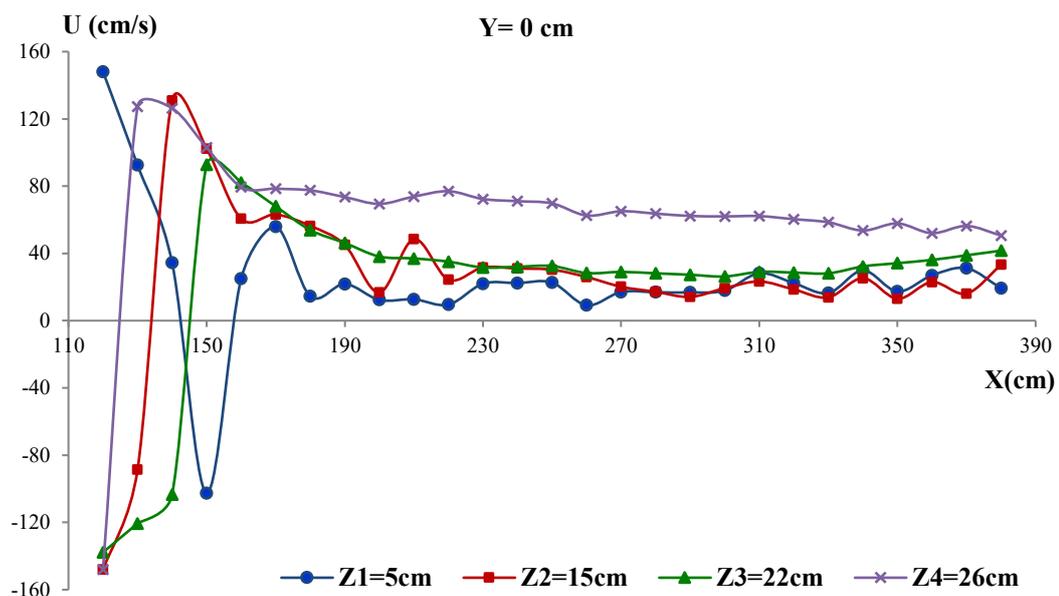


Figure 4.1 : La variation des vitesses “ $U=f(X)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section longitudinale médiane $Y = - 0$ cm.

À une position inférieure à 125 cm, un jet non perturbé, excédant la vitesse de 148 cm/s, est perceptible, prenant son origine à la sortie du convergent et décroissant graduellement jusqu'à la section où $x < 135$ cm. Les valeurs maximales de vitesse au fond de l'écoulement se situent en amont de cette dernière section, influencées par l'impact du jet issu du convergent. Les recherches antérieures menés par, Debabeche, (1996), Chen et al., (2014) et Hager and Li, (1992) ont souligné que dans la région profonde de l'écoulement, juste au-dessus du fond du canal et en amont de la zone initiale du ressaut, les vitesses augmentent considérablement à mesure que l'on se rapproche du convergent.

À la position $X = 125$ cm, les vitesses au fond de l'écoulement atteignent des valeurs significativement élevées ($U > 148$ cm/s), tandis qu'à partir de la position $X = 135$ cm, elles décroissent pour atteindre environ 90 cm/s. Au-delà de cette position, jusqu'à $X = 150$ cm, les vitesses diminuent progressivement pour atteindre un minimum d'environ 25 cm/s à une hauteur

$Z = 5$ à 15 cm au-dessus du fond du canal. Sur les 150 cm précédant le seuil, la vitesse moyenne au fond de l'écoulement est faible, certains points descendant même en dessous de 12 cm/s, contribuant à un écoulement relativement stable, voire presque uniforme.

Concernant la vitesse moyenne en surface de l'écoulement, elle suit une tendance similaire à celle du fond, variant d'environ 148 à 75 cm/s, parfois chutant en dessous de 55 cm/s. Les valeurs négatives et positives indiquent la direction du courant. (Hager, 1992) a remarqué la présence de vitesses opposées à la direction principale de l'écoulement en surface. À proximité du seuil, à environ 55 cm de distance, une couche d'écoulement semi-uniforme se forme en surface, s'alignant au fond de l'écoulement sur cette distance (Wang et al., 2023).

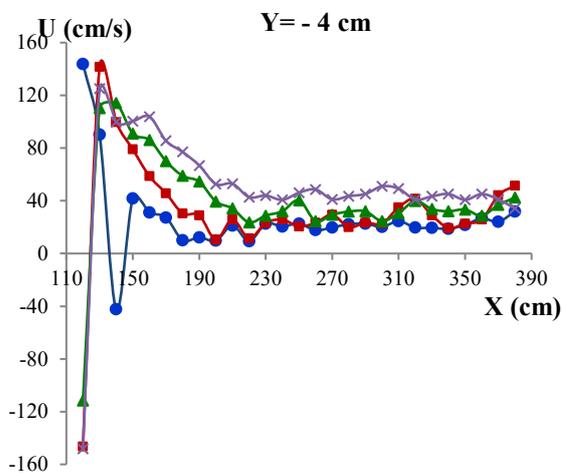


Figure 4.2 : La variation des vitesses $U=f(X)$ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = -4$ cm.

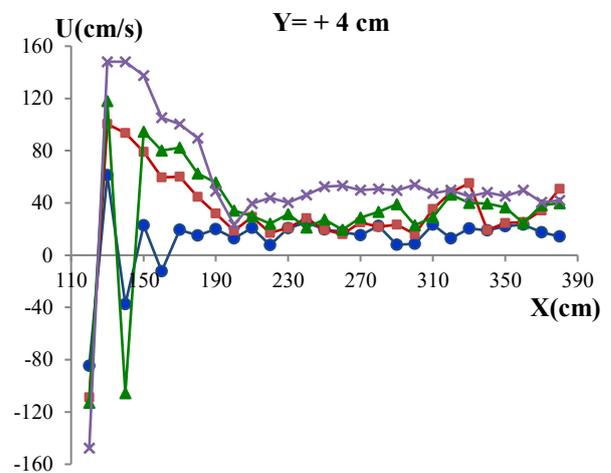


Figure 4.3 : La variation des vitesses $U=f(X)$ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = +4$ cm.

Les figures 4.2 et 4.3 mettent en évidence une symétrie relative dans la distribution générale des vitesses à travers différentes sections de l'écoulement, pour les sections longitudinales $Y = -4$ cm et $Y = +4$ cm.

À la coordonnées $X = 125$ cm, la surface de l'écoulement présente des vitesses atteignant des valeurs significativement élevées environ 135 cm/s. Cette observation peut être expliquée par la proximité des deux sections longitudinales par rapport à la section médiane de l'écoulement ($Y = 0$), avec une séparation de seulement 4 cm, engendrant ainsi des vitesses élevées qui influent sur les zones proches de cet axe. Il est également notable que les vitesses en surface s'opposent à la direction de l'écoulement.

L'analyse à la coordonnée $X = 145$ cm démontre une diminution graduelle des vitesses au fond de l'écoulement en direction de l'aval, avec des variations sur deux intervalles successifs,

passant de 40 cm/s à 15 cm/s. Cette constatation concernant la réduction des vitesses au fond est également observée au niveau de la surface d'écoulement, où les vitesses continuent de diminuer significativement d'une section à l'autre, suivant une tendance presque proportionnelle sur l'ensemble des sections du canal. Dans la dernière section avant le seuil, la vitesse atteint son minimum, chutant en dessous de 55 cm/s.

Les données présentées dans la figure 4.2 montrent des similitudes marquantes avec celles observées dans la figure 4.3.

Les figures 4.4 et 4.5 décrivent la distribution longitudinale des vitesses le long des côtés du canal, à des positions situées aux axes $Y = -8$ cm et $+8$ cm. Ces graphiques mettent en lumière que les vitesses aux extrémités de l'écoulement sont légèrement inférieures à celles constatées au centre. Pour les coordonnées $X < 135$ cm, les vitesses au niveau du rouleau demeurent généralement élevées, avec une hauteur $Z > 5$ cm.

Des vitesses en sens opposé à l'écoulement sont identifiées à plusieurs emplacements, particulièrement à la région X (cm) = 120 jusqu'à 160. À partir de la coordonnée $X = 180$ cm, les vitesses connaissent une diminution progressive, avec la valeur maximale de la vitesse au fond de l'écoulement passant de 40 cm/s à 10 cm/s. Dans les vingt derniers centimètres avant d'atteindre le seuil, les vitesses au fond atteignent leur niveau minimum, pouvant descendre en dessous de 10 cm/s.

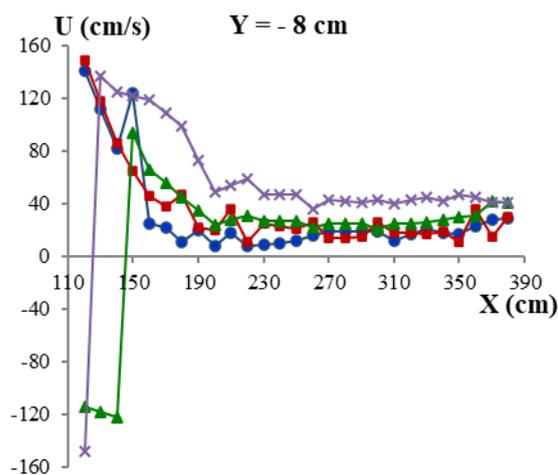


Figure 4.4 : La variation des vitesses "U=f(X)" dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = -8$ cm

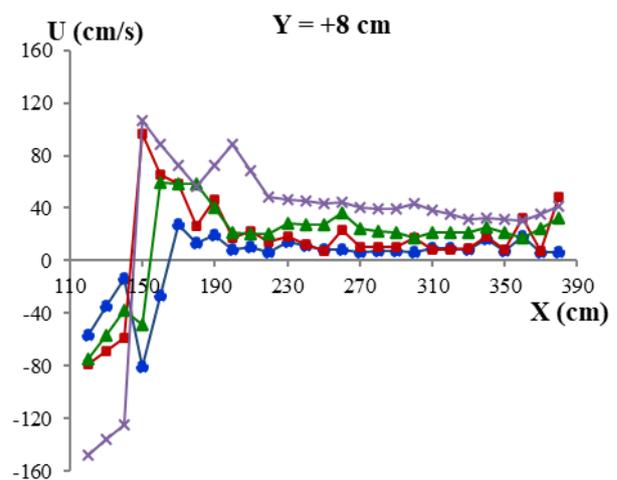


Figure 4.5 : La variation des vitesses "U=f(X)" dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = +8$ cm

Par ailleurs, les vitesses en surface varient en raison du contact entre les particules liquides et les parois du canal, mais demeurent constamment supérieures à celles observées au fond de l'écoulement.

Les figures 4.6 et 4.7, qui représentent les sections longitudinales $Y = -10$ et $Y = +10$ cm, révèlent une similitude marquée dans la distribution des vitesses le long de l'écoulement. On observe que la vitesse maximale se manifeste au pied du ressaut, puis décroît progressivement le long de l'écoulement en suivant la direction vers le seuil.

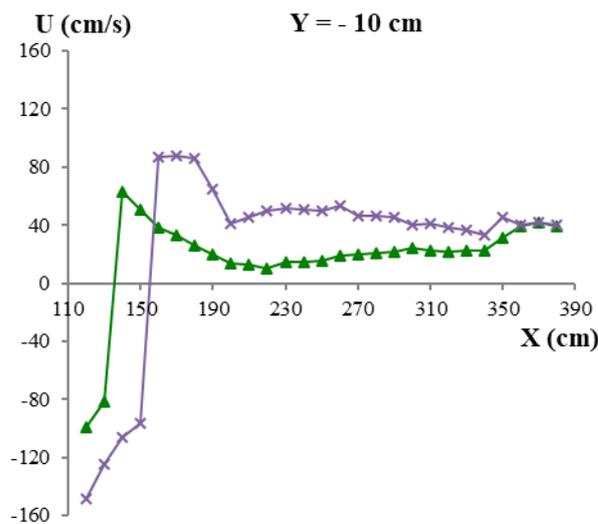


Figure 4.6 : La variation des vitesses “ $U=f(X)$ ” dans les niveaux Z_3, Z_4 cm pour les sections longitudinales $Y = -10$ cm

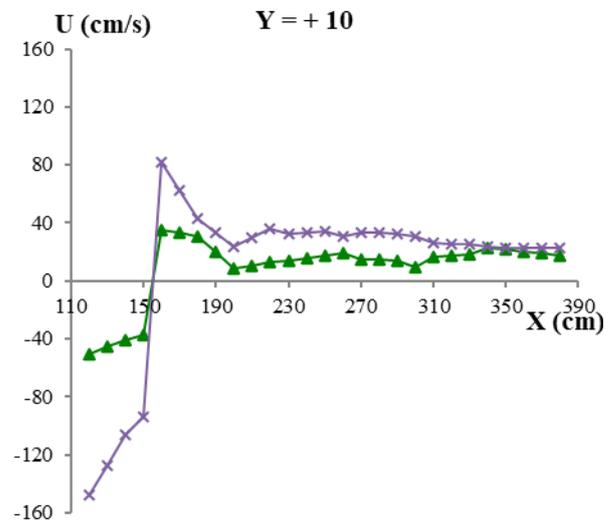


Figure 4.7 : La variation des vitesses “ $U=f(X)$ ” dans les niveaux Z_3, Z_4 cm pour les sections longitudinales $Y = +10$ cm

Les deux sections représentées dans les graphes ci-dessus, délimitent la partie supérieure de l'écoulement étudié. Les quatre premiers points mesurés à deux profondeurs différentes, $Z_4=26$ cm et $Z_3=22$ cm, révèlent des valeurs négatives, en accord avec les observations précédentes sur l'ensemble des sections longitudinales étudiés au cours de l'expérimentation.

Des études antérieures, notamment celles de Hager, (1992), ont également noté la présence des vitesses opposées à la direction de l'écoulement dans des configurations similaires.

L'influence des parois du canal sur la distribution des vitesses se manifeste par les valeurs réduites observées à proximité du seuil. L'écart entre les parois et ces deux sections est d'environ un centimètre. Il est remarquable que la vitesse enregistrée à la profondeur $Z_3 = 22$ cm demeurent inférieurs à celle mesurée à la profondeur $Z = 26$ cm, en raison d'une plus grande liberté de mouvement de la couche superficielle de l'écoulement. Une observation importante

est que la section latéral $Y = -10$ cm affiche une vitesse plus élevée que la section $Y = +10$ cm, en correspondance avec le centre de l'écoulement.

IV.2.1.2 Distribution des vitesses dans des sections transversales

Nous disposons de vingt-six sections transversales le long de notre écoulement, espacées de 10cm. Parmi celles-ci, nous avons sélectionné quelques sections clés permettant d'offrir une vue d'ensemble de la répartition des vitesses dans les sections transversales, dans le but d'analyser la distribution globale des vitesses dans notre configuration de ressaut.

Considérons, par exemple, la section transversale localisée à $x = 120$ cm, à proximité du pied du ressaut représentée sur la figure 4.8.

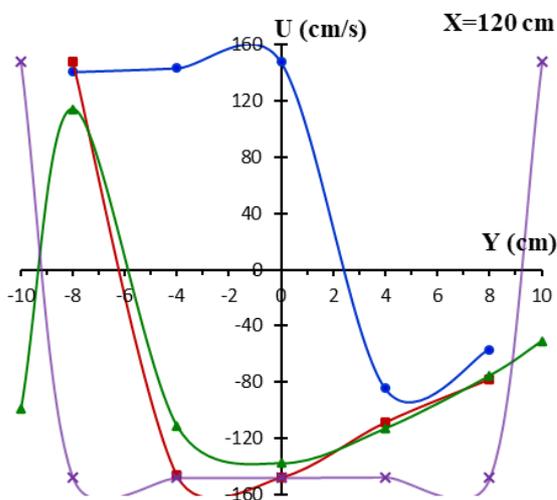


Figure 4.8 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections transversales $X = 120$ cm

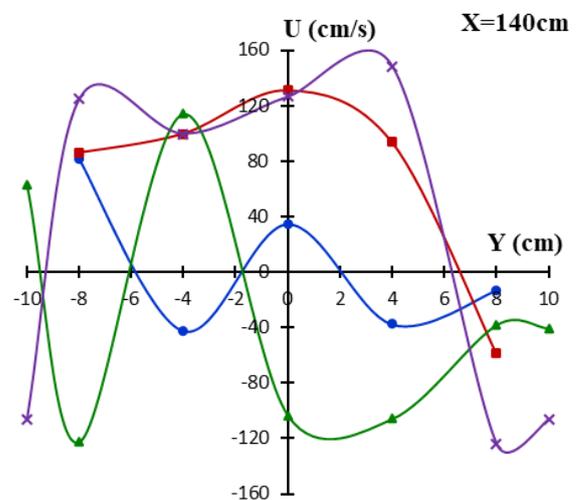


Figure 4.9 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections transversales $X = 140$ cm

À diverses profondeurs (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4) mesurées à partir du fond du canal, des fluctuations de vitesse, caractérisées par des variations positives et négatives, sont observées à différents moments. Ces fluctuations se propagent sur les côtés du canal, notamment aux profondeurs $Z_4=26$ cm, $Z_3 = 22$ cm et $Z_2 = 15$ cm, à l'exception du fond du canal. Il est essentiel de noter que ces fluctuations ne sont pas permanentes en raison de l'instabilité du jet lors de la formation du ressaut, près de $X = 195$ cm.

À des positions correspondant aux coordonnées $Y = 0$ et -4 cm, la vitesse au fond du canal est positive et élevée. Cependant, à mesure que l'on s'approche de la surface de l'écoulement, la vitesse devient négative, ce phénomène peut expliquer la génération du rouleau.

En revanche, aux positions $Y = +4$ cm et $+8$ cm, la vitesse au fond de l'écoulement est négative, s'étendant jusqu'à la surface de l'écoulement. Il est à noter que, à $Y = +10$ cm et -10 cm, des vitesses relativement élevées, à la fois positives et négatives, sont enregistrées de chaque côté de la surface de l'écoulement.

La figure 4.9 démontre une diminution relative des vitesses à toutes les coordonnées Y sur cette section transversale, avec des perturbations observables des deux côtés du canal, de la base à la surface ($Y = -8, +8$). Ces perturbations se traduisent par des valeurs de vitesse élevées, illustrant que la section transversale actuelle se situe au début de l'extrémité du rouleau, à $X = 180$ cm.

Certaines vitesses opposées (valeurs négatives) enregistrées à des positions spécifiques dans la section transversale ($X = 120$ cm) deviennent positives aux mêmes positions dans la section suivante ($X = 140$ cm). Ce phénomène indique un changement de direction des particules, témoignant de l'existence du rouleau.

Les Figures 4.10 et 4.11 montre une diminution relative des vitesses à mesure que l'on rapproche de l'extrémité du rouleau, avec des vitesses au fond toujours inférieures à celles observées à la surface du canal. L'aspect d'avoir des vitesses élevées au centre et des vitesses plus faibles vers les côtés du canal demeure constante.

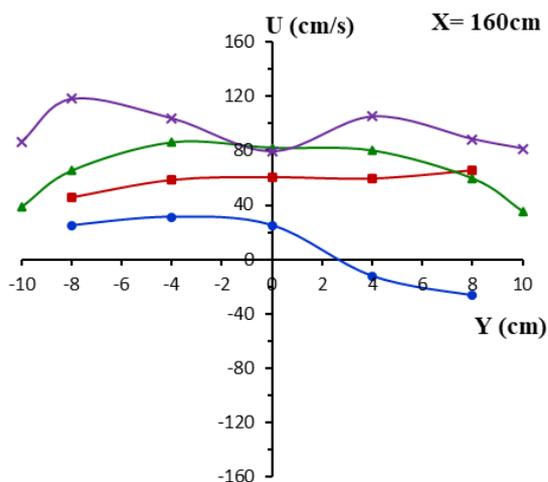


Figure 4.10 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 160$ cm

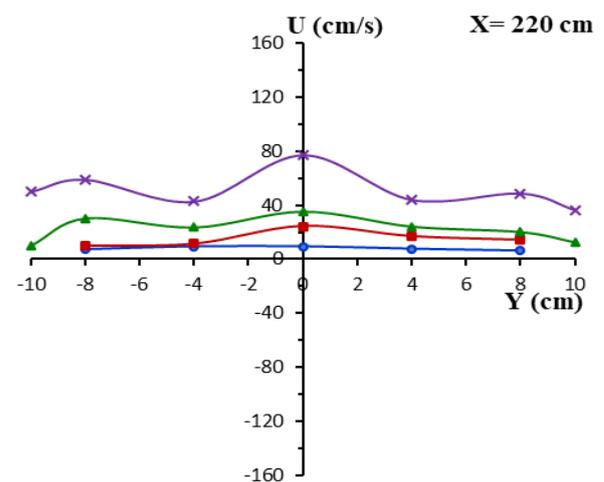


Figure 4.11 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 220$ cm

Dans la Figure 4.10, près de l'extrémité du rouleau où $X = 0,84$, une diminution négative des valeurs de vitesse est observée, suggérant une tendance à leur disparition. Une observation particulière a été notée lors des expériences ; la vitesse en surface d'un côté du canal ($Y = -8\text{cm}$) est supérieure à celle au centre ($Y = 0\text{ cm}$). Cette disparité peut être attribuée à l'influence de certaines vagues successives générées pendant la formation du rouleau.

Les Figures 4.12 à 4.13 mettent en lumière une similitude générale dans la distribution des vitesses d'un point Y à un autre, mais des variations apparaissent en termes d'intensité. Ces figures confirment que, à toutes les profondeurs (Z) mesurées à partir du fond du canal, les valeurs de vitesse sont plus élevées au centre du canal et plus faibles le long des autres axes en raison de l'interaction directe de l'écoulement avec les parois du canal.

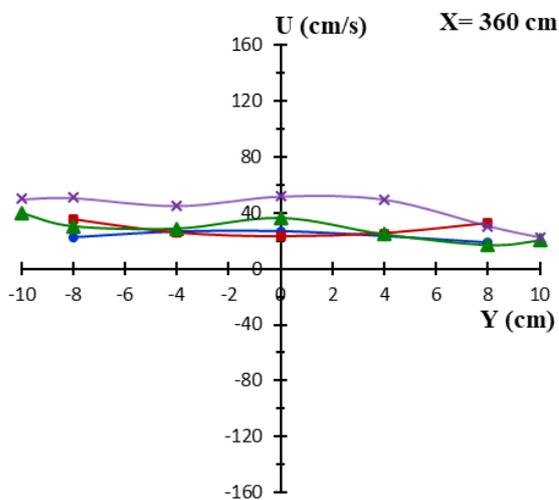


Figure 4.12 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections transversales $X = 360\text{ cm}$

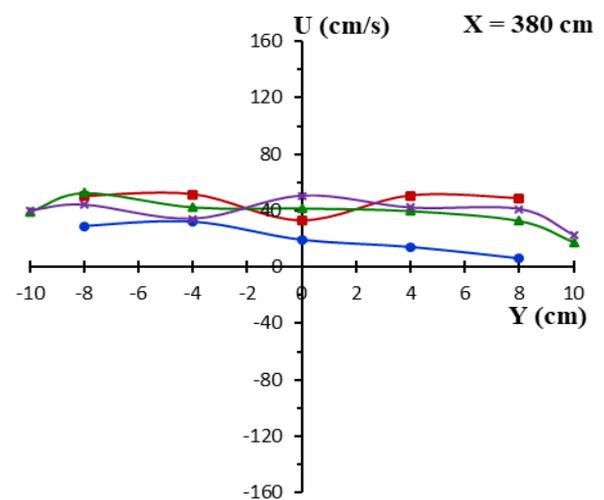


Figure 4.13 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections transversales $X = 380\text{ cm}$

Dans la figure 4.12, des résultats presque analogues sont observés à ceux des sections précédentes. En parcourant toutes les hauteurs de l'écoulement, on remarque une légère augmentation des valeurs des vitesses de manière générale, de la plus petite à la plus grande hauteur. En se déplaçant de la hauteur inférieure vers la hauteur supérieure, la vitesse augmente proportionnellement à chaque point (Y). À titre d'exemple, les vitesses à $Z_4 = 26\text{ cm}$ dépassent celles à chaque point (Y) par rapport à $Z_3 = 22\text{ cm}$.

La vitesse au fond du canal reste constamment basse, sans aucune valeur négative enregistrée à partir de cette section transversale. Dans la figure 4.13, les vitesses observées à la surface libre sont généralement plus élevées, alors que les vitesses demeurent faibles au fond du canal,

environ à la position relative $X = 220$ cm. Ces vitesses en surface forment une couche semi-uniforme, variant entre 30 et 55 cm/s.

Il est possible d'affirmer qu'à l'approche du seuil, les particules liquides cherchent à atteindre la surface en raison de la résistance imposée par le seuil à l'écoulement, entraînant une légère augmentation des valeurs de vitesse (Debabeche, 2003). Par conséquent, chaque particule liquide se déplace du fond vers la surface libre, et le sens de l'écoulement reste dirigé vers l'aval, comme illustré dans les diverses sections transversales.

À la suite de l'analyse graphique des figures, l'observation la plus significative réside dans la formation initiale du ressaut hydraulique, où le rouleau se forme initialement au fond du canal. Ce rouleau se développe principalement dans la moitié supérieure de la partie rectangulaire du canal, s'étendant jusqu'à la section la plus élevée, correspondant à la partie trapézoïdale du canal.

IV.2.2 Présentation et analyse de la deuxième série d'essais

Au cours de cette série d'expériences visant à évaluer la vitesse, nous avons modifié la hauteur du convergent à $H_1 = 2$ cm. Cette adaptation avait pour but d'analyser les résultats obtenus lors de la première expérience, marquée par une vitesse initiale exceptionnellement élevée, $U_1=445$ cm/s, correspondant à un débit de 17,80 l/s.

Il est important de souligner que la mesure de la vitesse avant d'atteindre une distance de 135cm du convergent s'est révélée difficile en raison des valeurs de vitesse très élevées au fond du canal, dépassant la capacité de mesure de l'appareil. Toutes les conditions de l'étude étaient en conformité avec les paramètres détaillés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Caractéristiques hydrauliques de la deuxième série d'essais du ressaut contrôlé.

F_1	Q [l/s]	U_1 [cm/s]	A_1 [cm ²]	H_s [cm]	H_1 [cm]	H_2 [cm]	L_s [cm]	L_R [cm]	L_J [cm]
10.04	17,80	445	40	14	2	26,5	253	153	231

IV.2.2.1 Distribution des vitesses dans des sections longitudinales

Les Figures 4.14 à 4.18 confirment les conclusions de l'expérience antérieure concernant la répartition générale des vitesses le long de toutes les sections longitudinales. On observe une vitesse maximale, en particulier au début du ressaut, localisée dans le fond du canal.

Cependant, un aspect notable est la présence de vitesses négatives, observées également à quelques distances après le jet du convergent. Cette constatation explique la présence de contre-courants le long du canal, opposés à la direction principale de l'écoulement.

La vitesse diminue le long de toutes les sections longitudinales à mesure que l'écoulement se rapproche du seuil. Cette réduction est plus prononcée dans les sections les plus profondes. Ces observations confirment les explications données précédemment concernant l'expérience antérieure.

Les Figures 4.14 et 4.18 révèlent une fluctuation notable des valeurs de vitesse près des parois du canal. Cette fluctuation est plus remarquable en surface et moins prononcée au fond du canal.

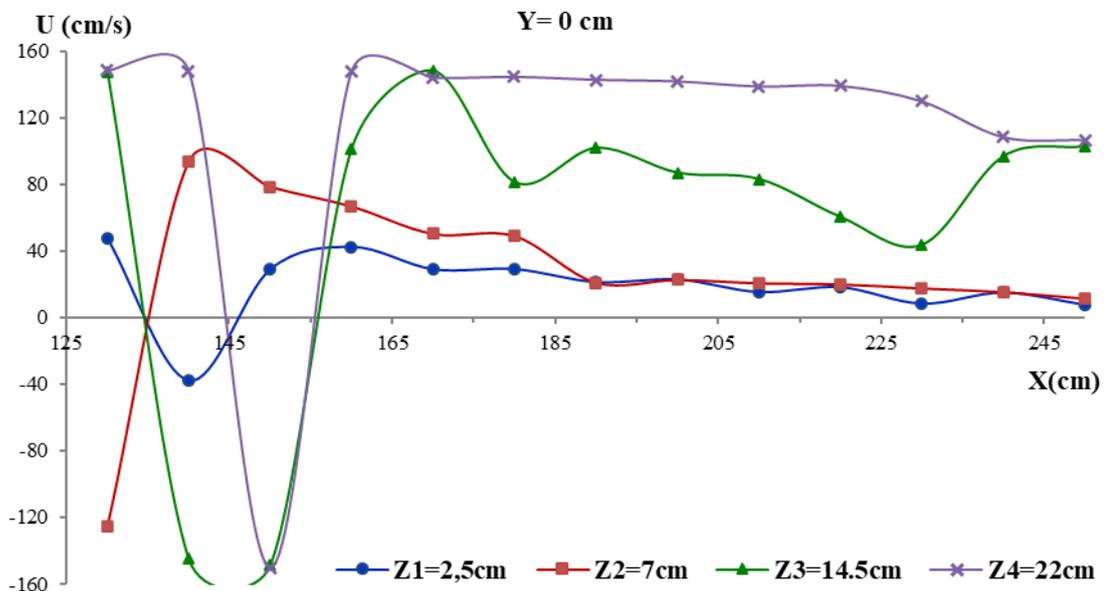


Figure 4.14 : La variation des vitesses $U=f(X)$ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section longitudinale médiane $Y = 0$ cm.

Les variations des valeurs de vitesse en surface sont souvent engendrées par les ondes d'écoulement générées en raison du flux abondant d'eau provenant du convergent à une vitesse élevée.

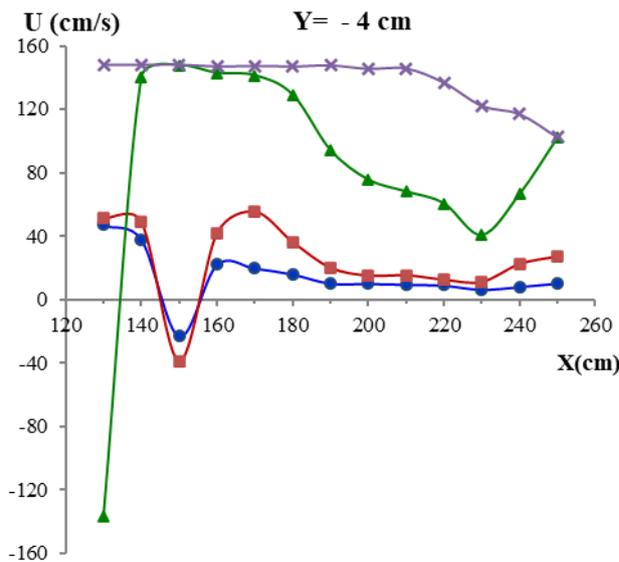


Figure 4.15 : La variation des vitesses ‘ $U=f(X)$ ’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = -4$.

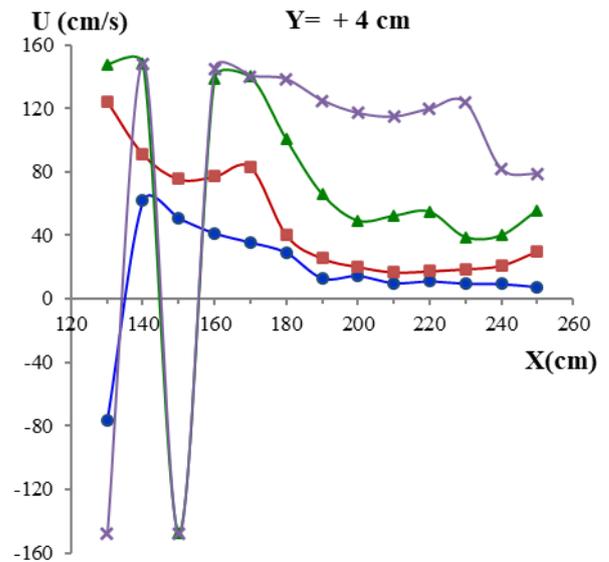


Figure 4.16 : La variation des vitesses ‘ $U=f(X)$ ’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = +4$

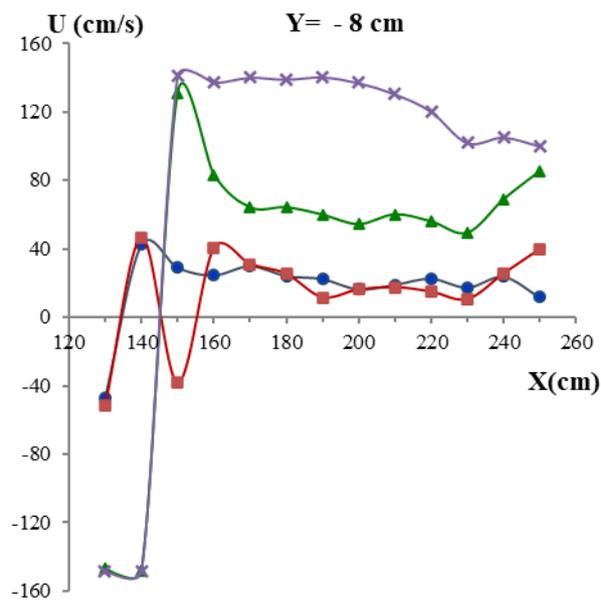


Figure 4.17 : La variation des vitesses ‘ $U=f(X)$ ’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = -8$

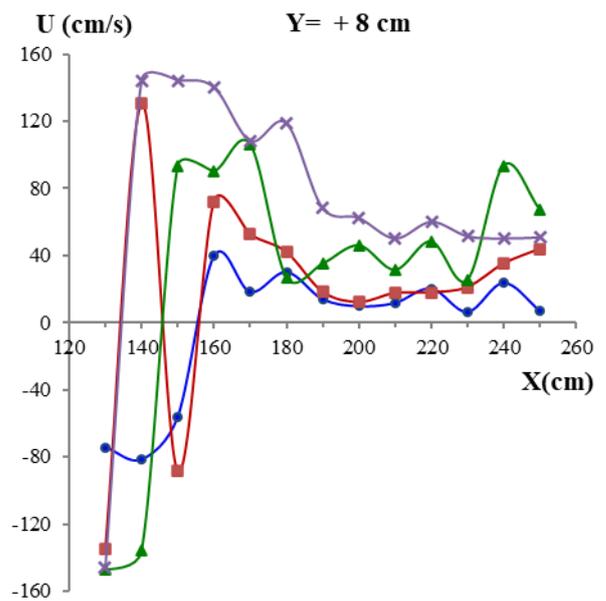


Figure 4.18 : La variation des vitesses ‘ $U=f(X)$ ’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = +8$

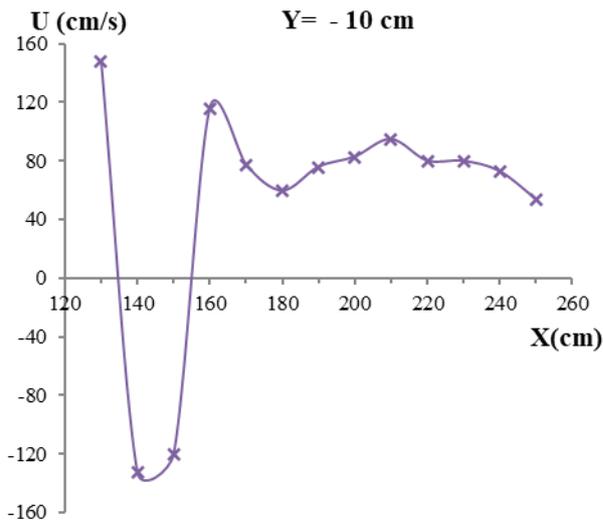


Figure 4.19 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans le niveau Z₄ pour les sections longitudinales Y= -10 cm.

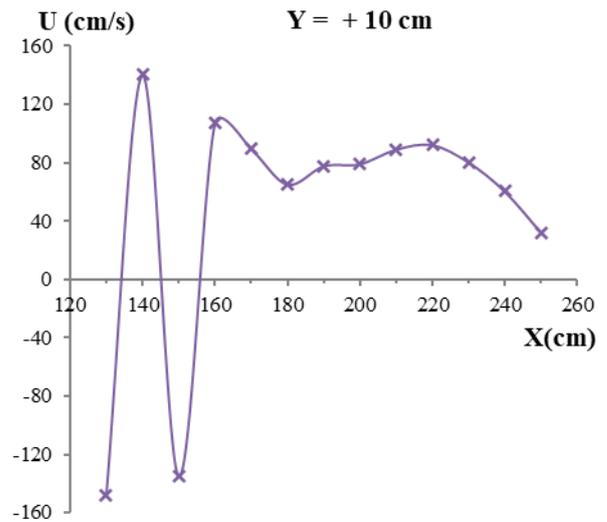


Figure 4.20 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans le niveau Z₄ pour les sections longitudinales Y= +10 cm.

IV.2.2.2 Distribution des vitesses dans des sections transversales

Prenons en considération la section transversale localisée à x = 130 cm, approchant le pied du ressaut, tel que représenté dans la Figure 4.21. Cette Figure, souligne la similarité observée entre les sections transversales le long de l’écoulement, confirmant les constatations antérieures des analyses effectuées lors de la première série d’expériences.

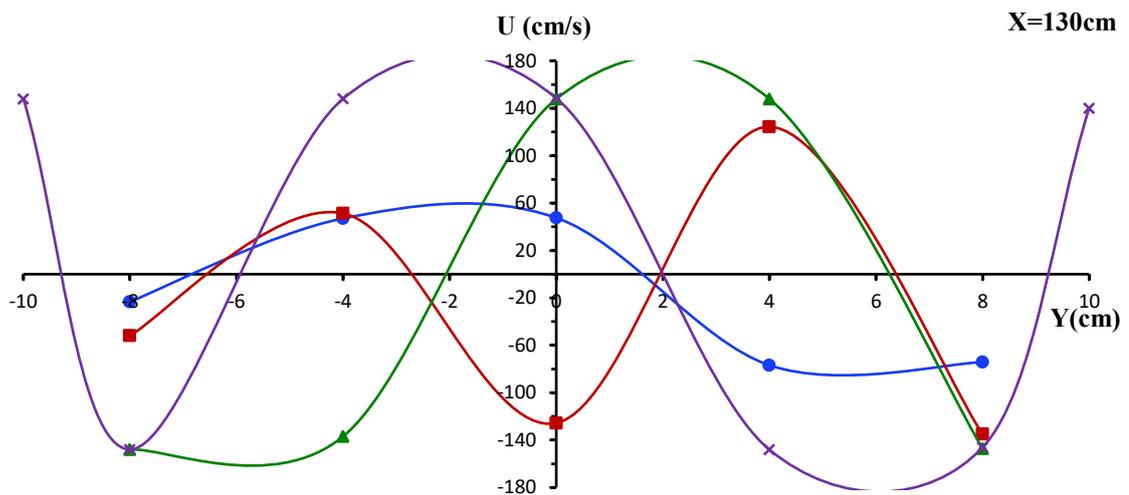


Figure 4.21 : La variation des vitesses ‘‘U=f(Y)’’ dans les niveaux Z₁, Z₂, Z₃, Z₄ pour la section transversale x = 130 cm.

Au commencement de la genèse du rouleau, des contre-courants opposés à la direction principale de l'écoulement sont observés, caractérisés par des valeurs négatives dans la Figure 4.22. Les côtés du canal présentent une diminution de la vitesse en raison du frottement avec les parois. En surface, les vitesses sont supérieures par rapport au fond de l'écoulement et diminuent progressivement en direction de l'aval pour tous les coordonnées (Y).

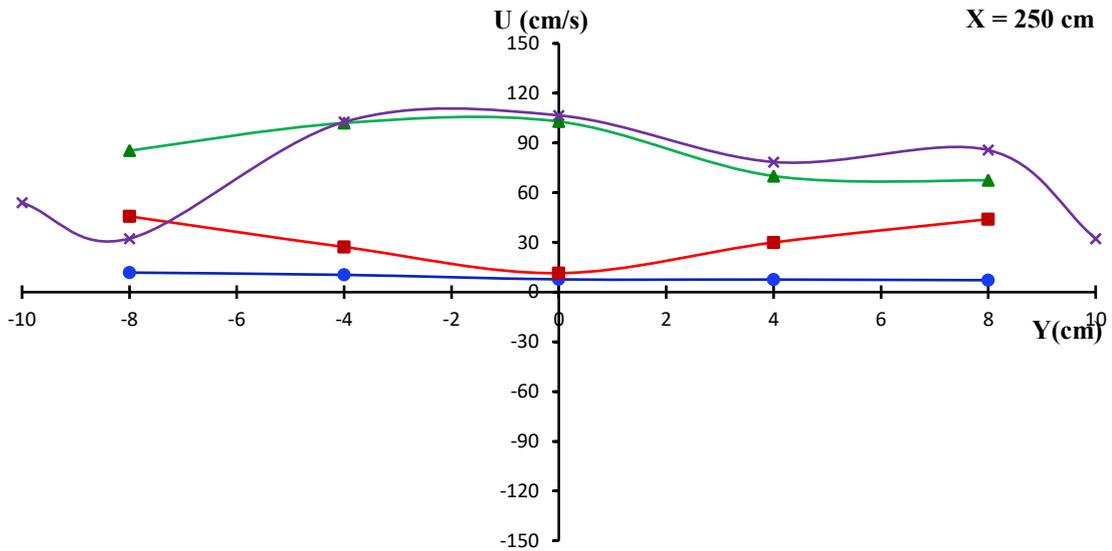


Figure 4.22 : La variation des vitesses ‘ $U=f(Y)$ ’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $x = 250\text{cm}$.

Dans la Figure 4.22, à proximité du seuil, une légère augmentation de la vitesse en surface est constatée. Cette variation résulte du déplacement des particules liquides vers la surface, où la hauteur est supérieure à celle du seuil, tel qu'exprimé précédemment dans la Figure 4.15.

IV.3 RESSAUT HYDRAULIQUE FORCE DE TYPE ‘A’ PAR SEUIL A PAROI MINCE

IV.3.1 Présentation et analyse de la première série d’essais

Dans le tableau (4.3) présenté ci-dessous, sont dévoilées les caractéristiques hydrauliques de notre configuration renouvelée du ressaut (forcé de type A) provenant de la première expérimentation. Aucune mesure n'a pu être effectuée en amont de la section $X < 120$ cm en raison des vitesses très élevées, caractérisées par une vitesse moyenne initiale d'écoulement (U_1) d'environ 536 cm/s.

Tableau 4.3 : Caractéristiques hydrauliques de la première série d’essais du ressaut forcé de type ‘A’.

F_1	Q [l/s]	U [cm/s]	H_{S1} [cm]	H_{S2} [cm]	H_1 [cm]	H_2 [cm]	L_{S1} [cm]	L_{S2} [cm]	L_B [cm]	L_{RF} [cm]
6,91	27,26	454.33	9	15	3	28,8	185	427	237	52

IV.3.1.1 Distribution des vitesses dans des sections longitudinales

Cette section fournit une distribution des vitesses moyennes horizontales dans les sections longitudinales dans notre nouvelle configuration du ressaut forcé de type ‘A’ tel que $Y = 0$ cm et 4, -4, 8, -8, 11, -11. En utilisant des données collectées à différentes positions le long de la longueur du canal (représentés par des coordonnées Y), centrées autour de la section médiane ($Y=0$).

Au début du ressaut, des vitesses maximales et des flux opposés à la direction principale de l'écoulement sont observés. De plus, les valeurs moyennes des vitesses horizontales à chaque positions (X) qui sont représentés dans les figures ci-dessous, démontrant une diminution progressive des vitesses à mesure que l'on se rapproche du seuil. Cette analyse fournit ainsi un aperçu de la dynamique des vitesses dans notre configuration du ressaut et de leur variation près du seuil.

Les figures 4.23, 4.24 et 4.25, illustrant les profils longitudinaux pour $Y = 0$, $Y = +4$, $Y = -4$, reflètent des similitudes avec les résultats de la première expérience. Comme précédemment mentionné dans le contexte de la répartition générale des vitesses, on constate une vitesse maximale initiale près du fond du canal, au début du ressaut, ainsi que des vitesses consistantes en surface. À mesure que l'écoulement progresse vers l'aval, toutes les vitesses diminuent le

long de chaque section longitudinale, à l'exception de celles observées à la surface libre. Il est indispensable de souligner la présence de valeurs de vitesses négatives et positives à travers l'écoulement sur toutes les courbes (tous les plans Z_1, Z_2, Z_3, Z_4), dû à la turbulence significative induite par le jet frappant le premier seuil. Une différence d'intensité de turbulence est également notable, avec une moindre intensité du côté gauche de l'écoulement ($Y = -4$) par rapport au côté opposé ($Y = +4$).

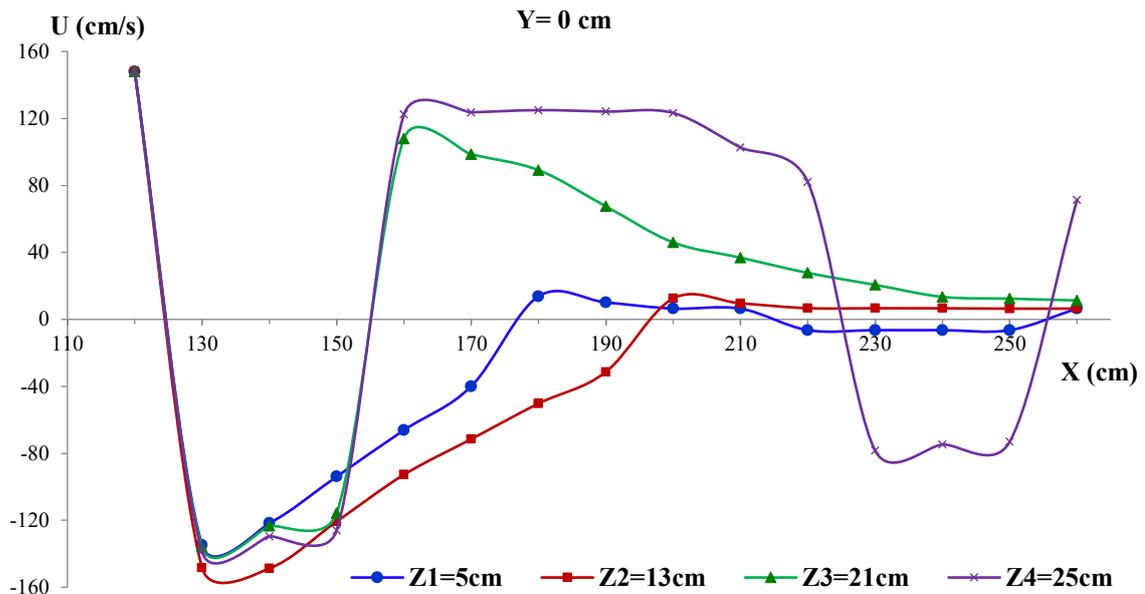


Figure 4.23 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section longitudinale médiane $Y = 0$ cm.

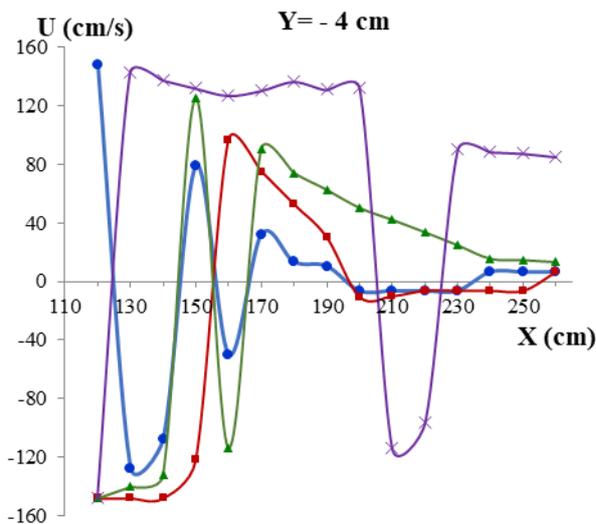


Figure 4.24 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section longitudinale $Y = -4$ cm

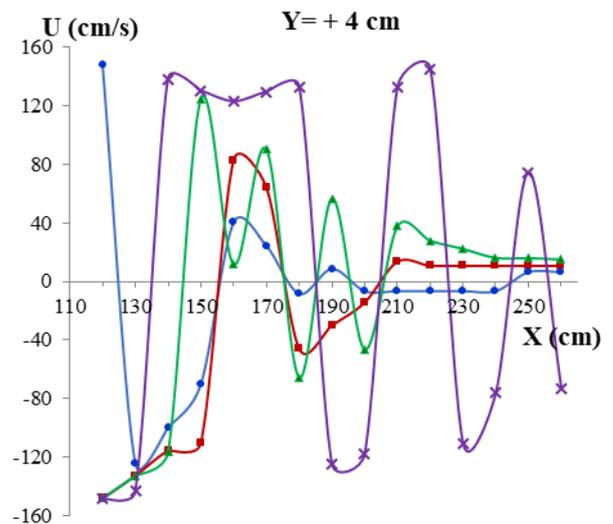


Figure 4.25 : La variation des vitesses ‘‘U=f(X)’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section longitudinale $Y = +4$ cm

Les figures 4.26 et 4.27 indiquent une diminution de la turbulence des vitesses par rapport à la section précédente, en raison du frottement indirect causé par la proximité des parois du canal et l'éloignement de l'axe central de l'écoulement ($Y = 0$). Après le passage du premier seuil (à $x = 185$ cm), les vitesses montrent une légère diminution pour ensuite maintenir un écoulement presque uniforme. Certaines valeurs de vitesse négatives persistent dans nos profils.

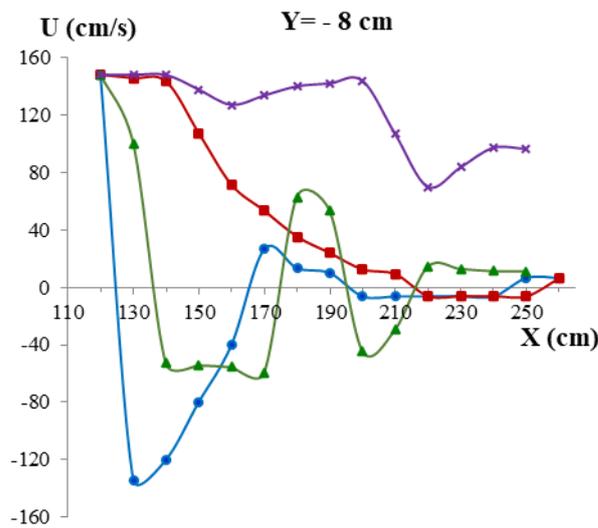


Figure 4.26 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(X)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section longitudinale $Y = -8$ cm

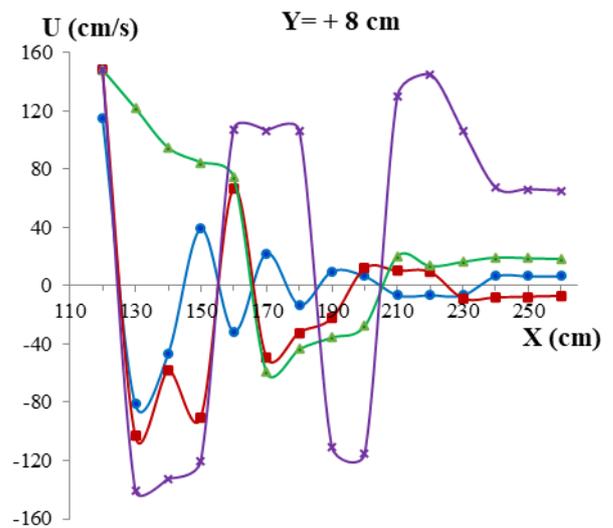


Figure 4.27 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(X)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section longitudinale $Y = +8$ cm

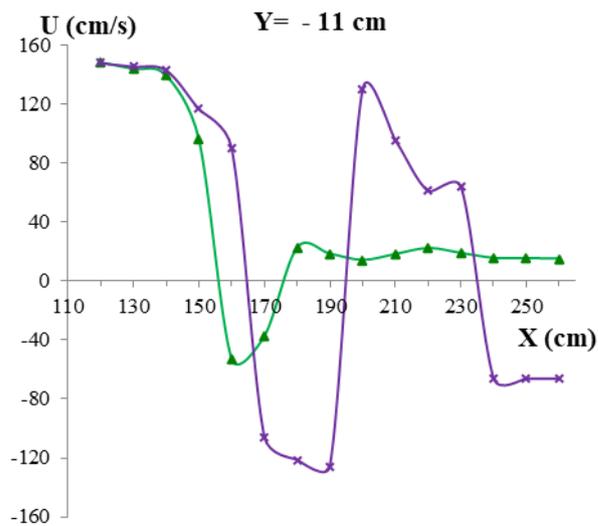


Figure 4.28 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(X)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section longitudinale $Y = -11$ cm

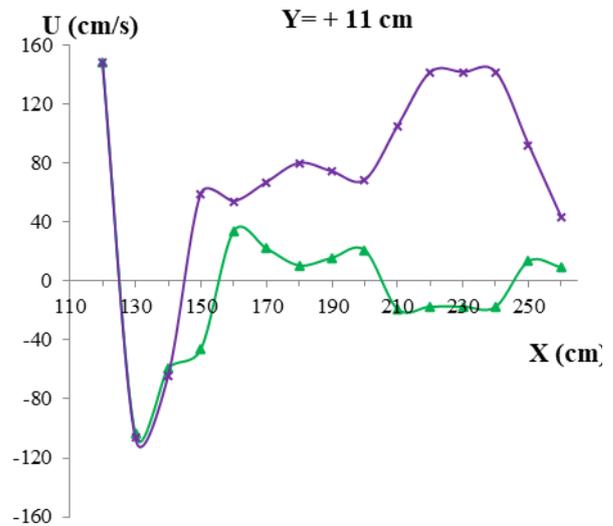


Figure 4.29 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(X)$ ’’ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section longitudinale $Y = +11$ cm

Les résultats représentés dans les figures 4.28 et 4.29 démontrent une faible turbulence au sein de la couche superficielle de l'écoulement (Z_4 et Z_3), accompagnée de vitesses moindres par rapport aux sections antérieures. Cette constatation résulte de l'éloignement du centre de l'écoulement et du contact direct avec les parois du canal, et ces observations sont toutes réalisées avant le premier seuil (à $X = 185$ cm). Après le passage du premier seuil, les vitesses diminuent légèrement tout en conservant une agitation modérée, aboutissant finalement à un écoulement presque stable.

IV.3.1.2 Distribution des vitesses dans des sections transversales

Dans cette dernière segment, nous exposerons des sections transversales de l'écoulement dans notre configuration de ressaut, à différentes positions de X , comprises entre 140 cm et 260 cm. Ces coupes sont représentées dans les graphiques ci-dessous.

La figure 4.30 présente des valeurs maximales de vitesse à la fois au fond et en surface de l'écoulement, correspondant au jet turbulent généré par le convergent, comme précédemment démontré. Ce jet turbulent décroît en intensité à mesure qu'il progresse vers l'aval, atteignant son niveau le plus bas près du premier seuil.

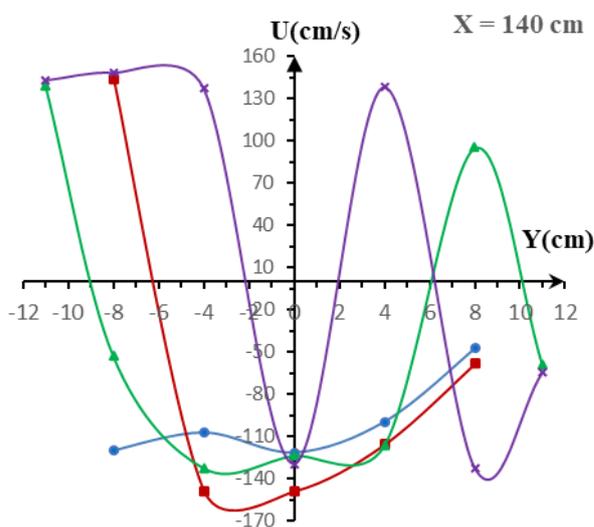


Figure 4.30 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 140$ cm

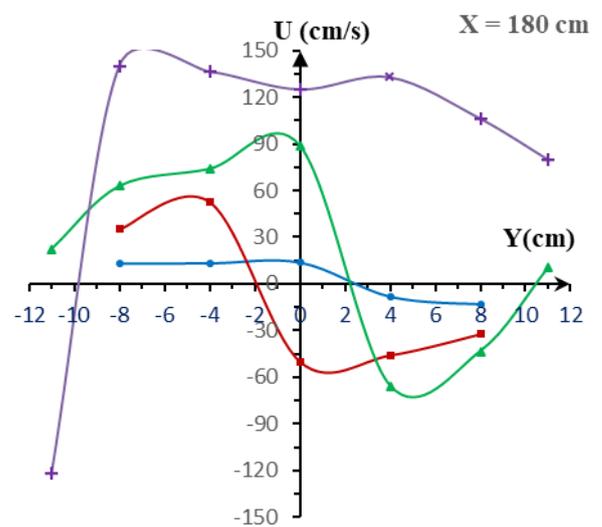


Figure 4.31 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 180$ cm

Dans la figure 4.31, à mesure que l'on s'approche du premier seuil, on remarque une réduction des oscillations des courbes, indiquant une diminution de la turbulence du ressaut et une

stabilisation des vitesses. Il est également observé une diminution des valeurs de vitesse à proximité des parois du canal.

La Figure 4.32 met en évidence une stabilité notable de l'écoulement à mesure que l'on s'éloigne du premier seuil et au-delà du rouleau de fond, dans la plupart des plans. Cependant, une légère perturbation est remarquée dans la couche superficielle (Z_4). Les vitesses enregistrées demeurent généralement basses, exclu la couche superficielle (Z_4) de notre configuration de ressaut.

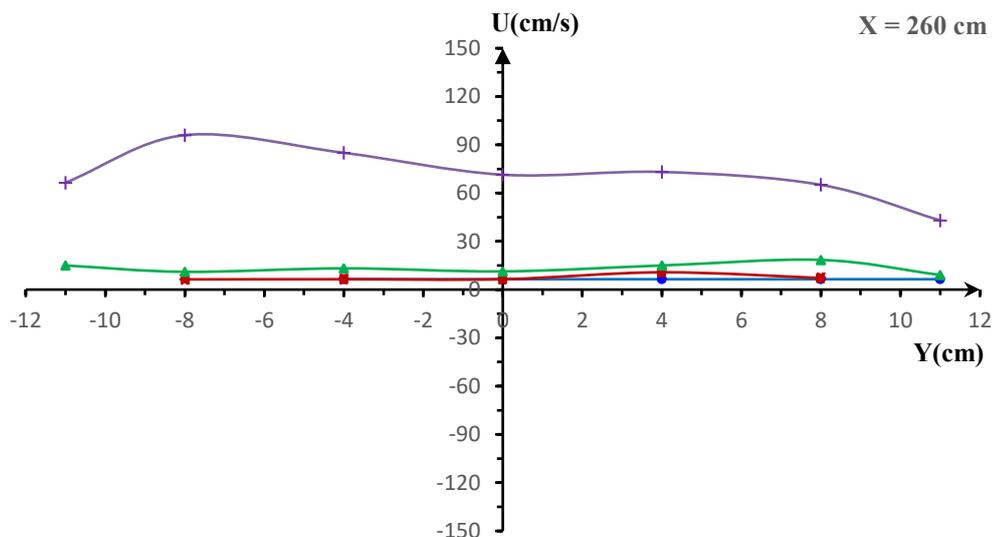


Figure 4.32 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 260$ cm.

IV.3.2 Présentation et analyse de la deuxième série d’essais

Pour la deuxième série d'expériences, nous avons opté un convergent de hauteur $H_1=2$ cm afin de mieux analyser la distribution des vitesses dans l'écoulement. Les caractéristiques hydrauliques de cette configuration, résultant du changement de hauteur du convergent, sont spécifiées dans le tableau 4.1 ci-dessous.

Tableau 4.4 : Caractéristiques hydrauliques de la deuxième série d’essais du ressaut forcé de type “A”.

F_1	Q [l/s]	U_1 [cm/s]	A_1 [cm ²]	H_{S1} [cm]	H_{S2} [cm]	H_1 [cm]	H_2 [cm]	L_{S1} [cm]	L_{S2} [cm]	L_B [cm]	L_{RF} [cm]
10.08	21,44	536	20	9	15	2	26,7	185	427	254	69

IV.3.2.1 Distribution des vitesses dans des sections longitudinales

Durant cette étude, nous avons positionné les points de mesure des vitesses horizontales moyennes le long de sept (07) sections longitudinales, couvrant la largeur du canal. Ces sections étaient placées à des positions Y (en cm) de 0, -4, +4, -8, +8, -10, +10, où $Y = 0$ représente l'axe central du canal. Cette répartition des mesures a également été réalisée à quatre (04) profondeurs différentes ($Z_1 = 5$, $Z_2 = 13$, $Z_3 = 21$, $Z_4 = 25$ cm) occupant la profondeur de l'écoulement. Les données relatives aux vitesses horizontales moyennes pour ces sept axes seront présentées graphiquement ci-dessous.

Cette section décrit le profil des vitesses de la section longitudinale centrale (axe de symétrie du canal, $Y = 0$ cm) selon la figure 4.33. Les mesures ont été prises à des intervalles de 10 cm le long de l'écoulement sur différents plans (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4). À partir de $X = 140$ cm jusqu'à $X = 160$ cm, une élévation claire des vitesses, dépassant les 150 cm/s, est observée, dû au jet d'eau émergeant du convergent. Ces vitesses maximales sont maintenues sur tous les plans.

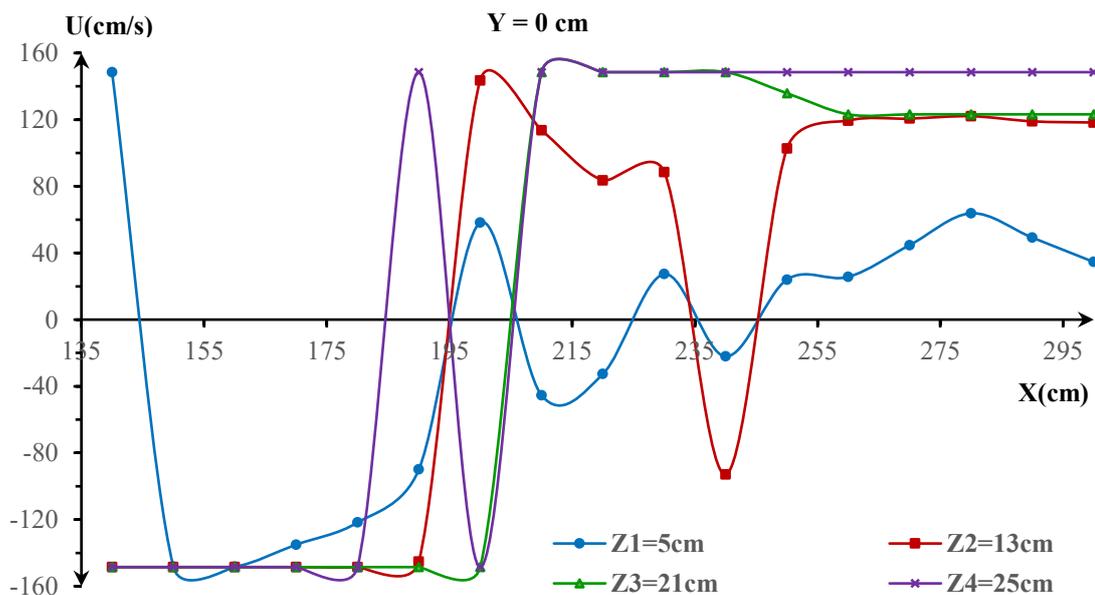


Figure 4.33 : La variation des vitesses ' $U=f(X)$ ' dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section longitudinale centrale $Y=0$ cm.

Au-delà de cette portion (de $X = 160$ cm à $X = 200$ cm), les vitesses restent élevées (≥ 150 cm/s), sauf à la profondeur Z_1 où elles commencent à diminuer avec des fluctuations. À la profondeur Z_1 et la position $X = 140$ cm, la vitesse maximale (dépassant 150 cm/s) montre alternativement des signes positifs et négatifs. Entre $X = 140$ cm et $X = 185$ cm pour Z_2 , et Z_3 , les vitesses maximales présentent des signes négatifs.

Les variations des valeurs de vitesse montrent une alternance des signes négatifs et positifs dans l'intervalle ($x = 185$ cm à $x = 250$ cm). Au-delà de cette étendue, les vitesses deviennent positives et restent stables. Ces signes alternés traduisent le mouvement des courants de l'écoulement par rapport au sens de l'écoulement, confirmant les observations de Hager, (2013).

Une décroissance de la vitesse (34 cm/s) est constatée au niveau Z_1 à partir de $X = 250$ cm. Par ailleurs, des vitesses élevées jusqu'à 125 cm/s sont enregistrées à la surface aux hauteurs de Z_2 , Z_3 , Z_4 , concordant avec les constatations de Debabeche, (1996).

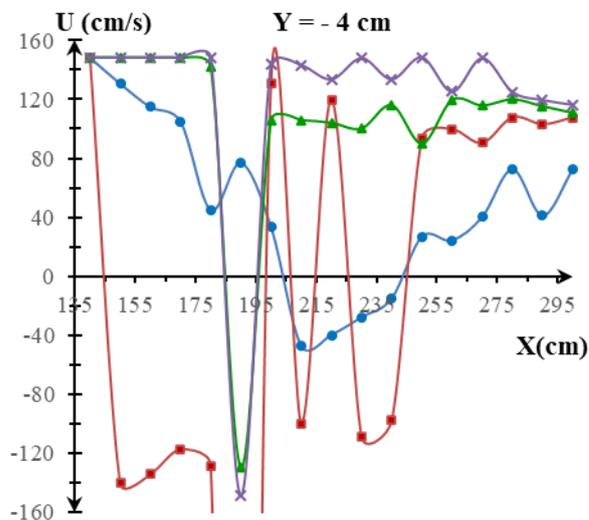


Figure 4.34 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(X)$ ’’ dans les niveaux Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 pour les sections longitudinales $Y = -4$ cm

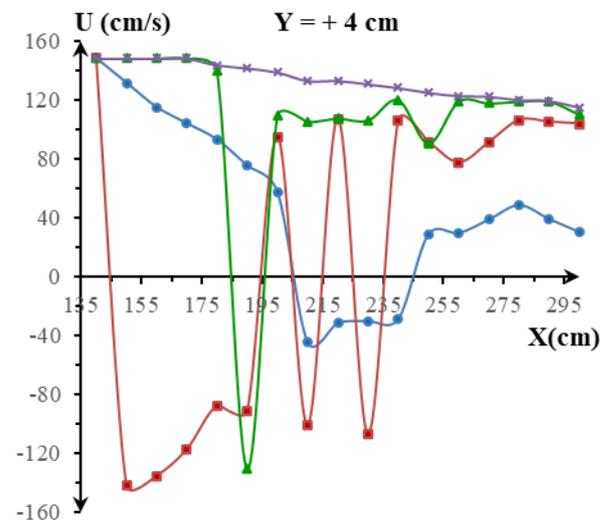


Figure 4.35 : La variation des vitesses ‘‘ $U=f(X)$ ’’ dans les niveaux Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 pour les sections longitudinales $Y = +4$ cm

Dans la figure 4.34, À la position $X = 135$ cm, des vitesses élevées sont notées jusqu'au premier seuil à $X = 185$ cm, affichant des valeurs majoritairement positives sur tous les plans, à l'exception de la courbe à Z_2 qui montre des courants opposés à l'écoulement (vitesses avec des signes négatifs).

Entre l'intervalle ($X = 185$ cm, $X = 250$ cm), les valeurs des vitesses varient sur tous les plans, exposant alternativement des signes négatifs et positifs. Au-delà de cette plage, les vitesses adoptent une tendance positive plus stable en s'approchant du deuxième seuil.

De $X = 260$ cm à 300 cm, une diminution de la vitesse à 41 cm/s est observée dans la courbe Z_1 , toutes ces valeurs de vitesses demeurent positives. De plus, une valeur maximale de vitesse atteignant 119,6 cm/s est enregistrée sur la courbe Z_4 , des observations concordantes avec celles de Debabeche, (1996).

En ce qui concerne la Figure 4.35, la distribution des vitesses sur tous les plans (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4) se conforme globalement à celle de la figure 4.5 précédente, sauf pour un point juste après le premier seuil à $X = 190$ cm, qui contredit le profil $Y = -4$.

Dans la représentation graphique de la figure 4.36, la zone pré-seuil illustre une persistance de vitesses soutenues, oscillant entre des valeurs positives et négatives, suggérant son emplacement au sein du rouleau. Au-delà du premier seuil, la majorité des valeurs de vitesse affichent des valeurs positives et maintiennent une stabilité constante sur tous les plans, progressant vers le second seuil.

En ce qui concerne la figure 4.37, des fluctuations semblables des vitesses sont constatées dans la plupart des plans en comparaison avec les courbes de la figure 4.36, spécifiquement après le premier seuil. Une distinction notable dans la forme des courbes est observée avant d'atteindre le premier seuil.

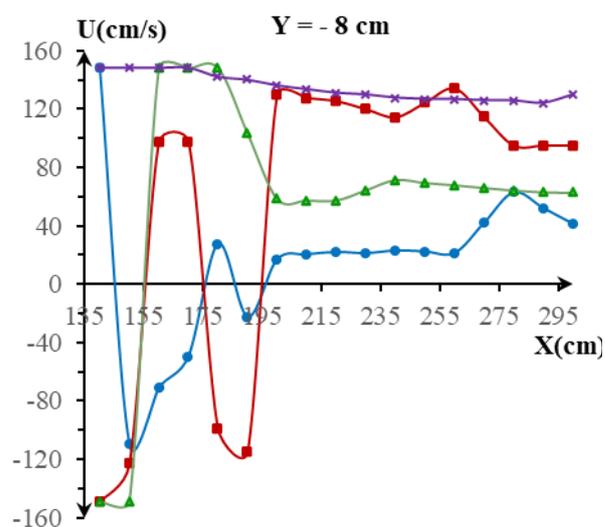


Figure 4.36 : La variation des vitesses $U=f(X)$ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = -8$ cm

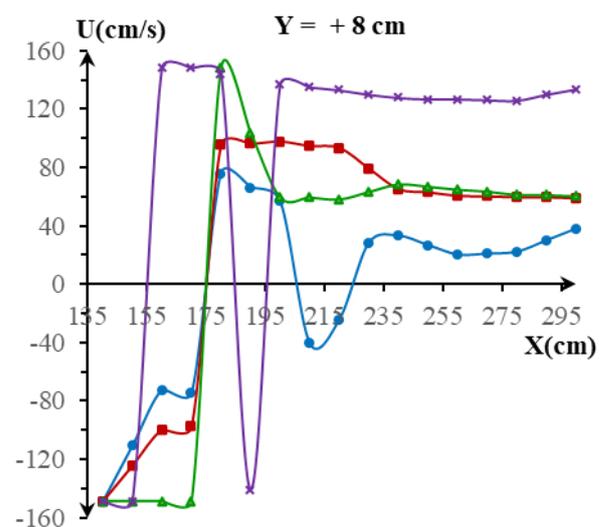


Figure 4.37 : La variation des vitesses $U=f(X)$ dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = +8$ cm

Sur les figures 4.38 et 4.39, il est observé que les vitesses horizontales moyennes atteignent des valeurs importantes à la position $X = 160$ cm, s'élevant jusqu'à 148 cm/s. Cependant, elles connaissent une diminution significative à 113 cm/s juste avant d'atteindre le seuil, précisément à la position $X = 180$ cm, dans la couche superficielle (Z_4). La gamme des valeurs maximales des vitesses du rouleau de surface varie entre -148 et $+148$ cm/s.

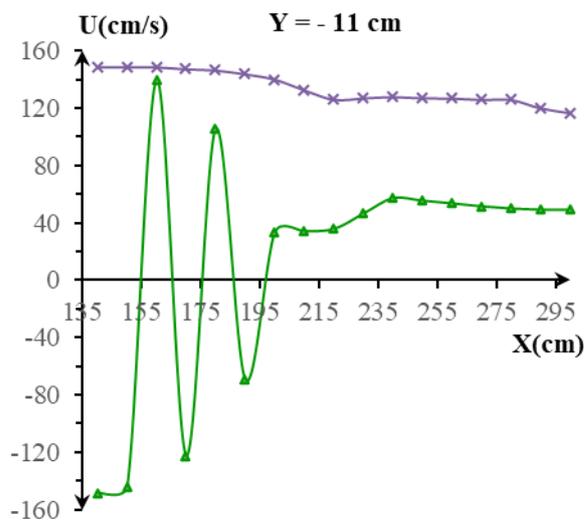


Figure 4.38 : La variation des vitesses “ $U=f(X)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = -11$ cm

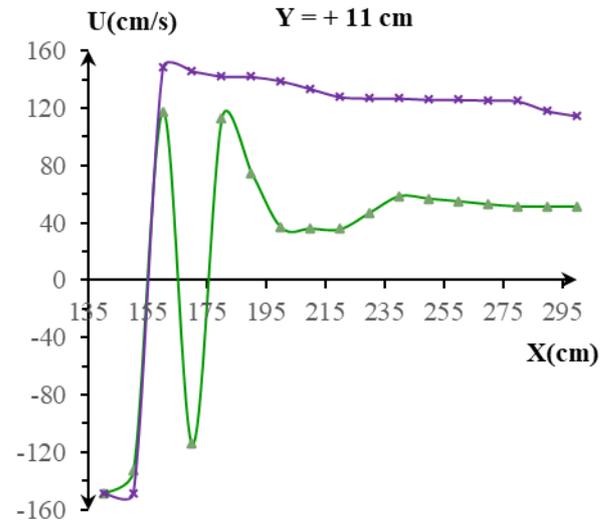


Figure 4.39 : La variation des vitesses “ $U=f(X)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour les sections longitudinales $Y = +11$ cm

IV.3.2.2 Distribution des vitesses dans des sections transversales

Nous présenterons les représentations graphiques des sections transversales de l'écoulement dans notre configuration de ressaut forcé de type « A », localisées à différentes positions X , situées entre 160 cm et 300 cm. Ces sections sont illustrées dans les graphiques ci-dessous.

Dans la figure 4.40, à la position $x = 160$ cm, une observation remarquable est notée : dans toutes les profondeurs (tous les plans Z), des valeurs de vitesse négatives maximales sont enregistrées au centre du canal ($Y = 0$). Cette tendance est également observée le long du plan Z_2 . Pour tous les autres points (Y). L'écoulement est perturbé en raison du jet formant le rouleau, présentant des vitesses considérablement élevées et presque toutes positives. Une similarité est repérée entre les figures 4.40 et 4.41, malgré des variations mineures dans certains points. Cette similarité des courbes s'explique par la proximité des sections transversales du premier seuil.

Dans les figures 4.42 et 4.43, on observe la distribution des vitesses au-delà du seuil. Les valeurs de vitesse enregistrées à la section médiane de l'écoulement ($Y = 0$ cm) montre le signe négative (sens opposé) plus que celles observées dans les autres points (Y). De plus, les vitesses augmentent en se rapprochant du centre. Les vitesses les plus élevées sont localisées près de la surface de l'écoulement.

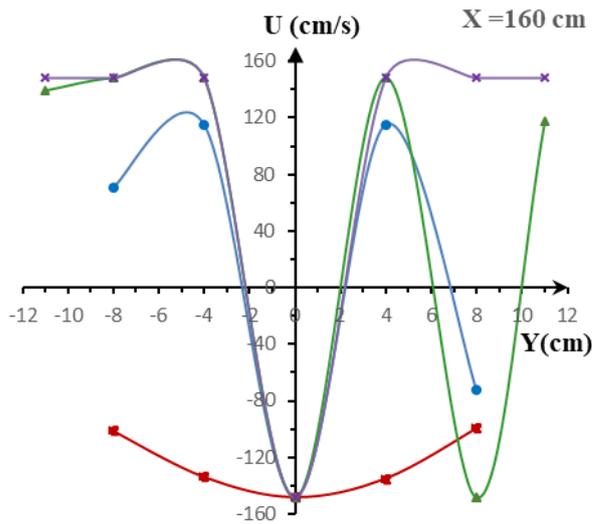


Figure 4.40 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 160$ cm

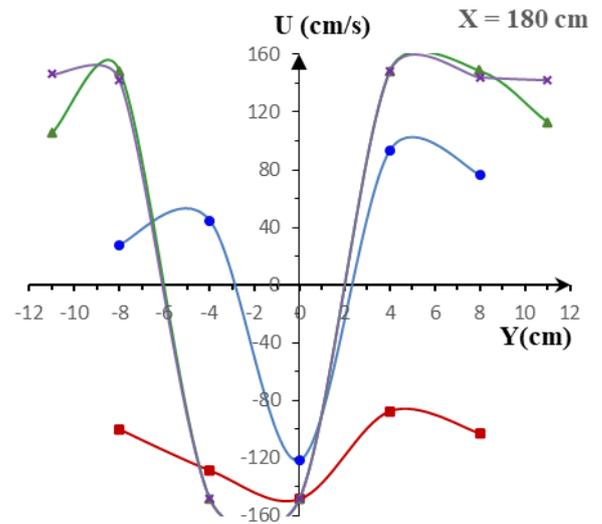


Figure 4.41 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 180$ cm

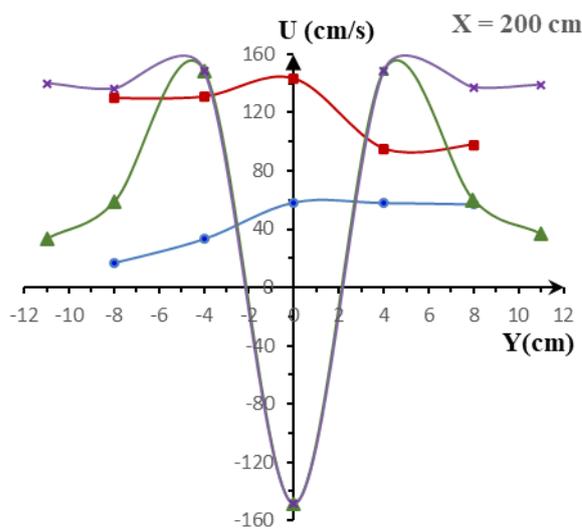


Figure 4.42 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 200$ cm

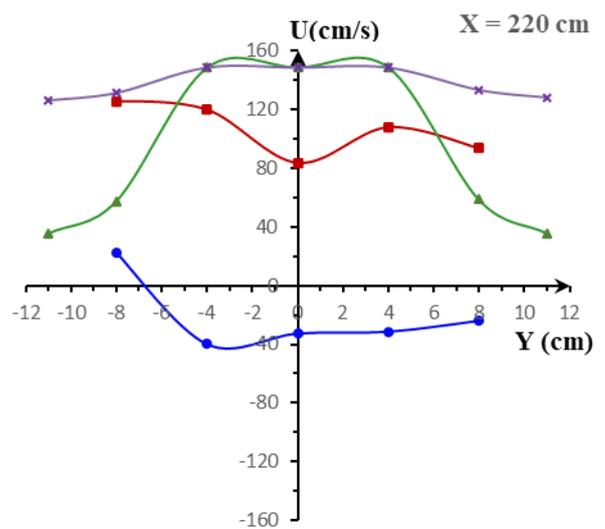


Figure 4.43 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 220$ cm

La figure 4.44 montre des variations brusques marquées par une augmentation significative de la vitesse le long des différentes ordonnées (Y) à la surface ($Z_4 = 25$), donnant l'impression d'une accélération pour surmonter le seuil. Ce dernier entraîne des vitesses plus faibles au fond du canal par rapport à la surface.

Quant à la figure 4.45, toutes les vitesses observées à la surface libre de l'écoulement sont relativement plus élevées, tandis que les vitesses demeurent faibles au fond du canal. Ces vitesses en surface forment une couche semi-uniforme qui franchit le seuil.

Les figures 4.46 et 4.47 mettent en évidence une diminution des vitesses dans les plans profonds par rapport à la surface. Cette variation suggère que, en s'éloignant du premier seuil, l'écoulement tend à se stabiliser.

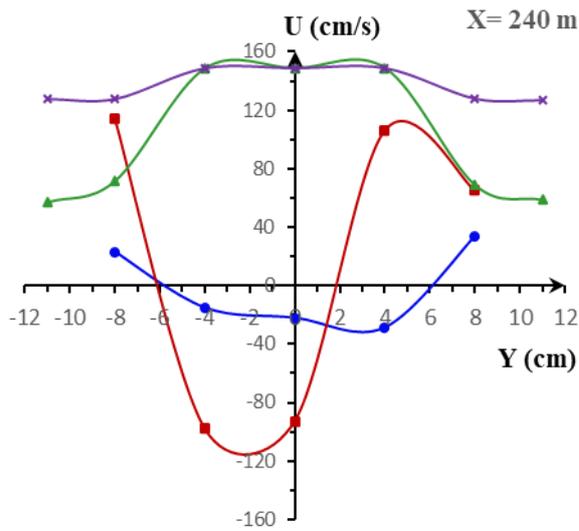


Figure 4.44 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 240$ cm

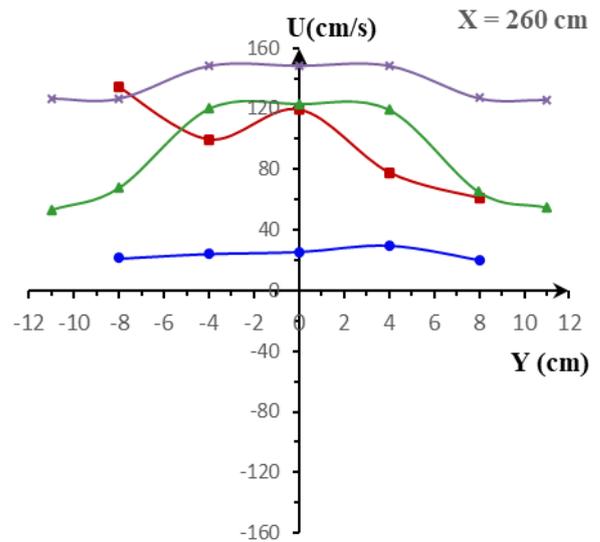


Figure 4.45 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 260$ cm

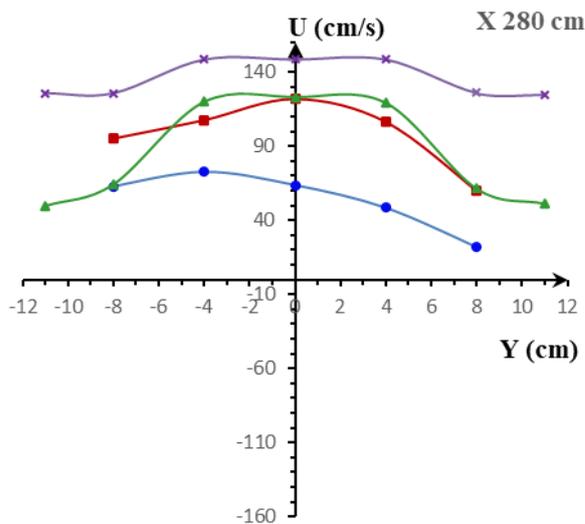


Figure 4.46 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 280$ cm

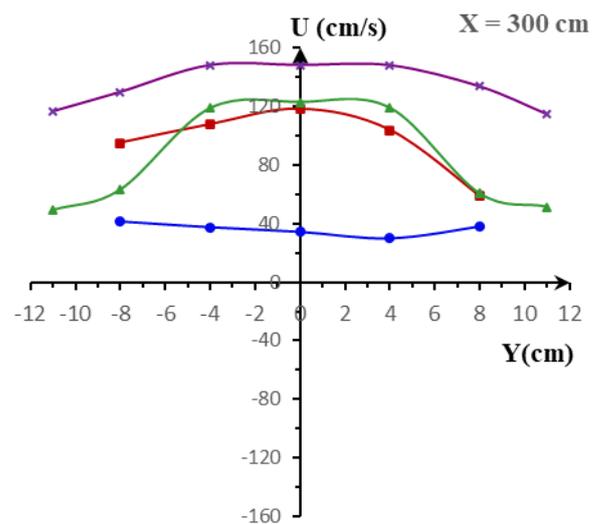


Figure 4.47 : La variation des vitesses “ $U=f(Y)$ ” dans les niveaux Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 pour la section transversale $X = 300$ cm

IV.4 CONCLUSION

Notre étude expérimentale cherche à enrichir la compréhension de la distribution des vitesses au sein du ressaut hydraulique en explorant deux configurations distinctes dans un canal composé de section trapézoïdale à base rectangulaire : le ressaut contrôlé par un seuil mince et le ressaut forcé de type "A" également régis par deux seuils minces.

Dans la première partie, se focalisant sur le ressaut contrôlé à paroi mince, les résultats présentées sur des sections longitudinales des vitesses moyennes horizontales (U) en fonction de la position (X) révèlent deux régions distinctes. La première région montre des vitesses au fond du canal près du convergent plus élevées que celles en surface en raison de l'effet du jet sortant du convergent ($U \gg 150$ cm/s). Cette région s'étend jusqu'à $X=120$ cm. La deuxième région, débutant à cette position, démontre que les vitesses en surface dépassent celles du fond. Toutes les vitesses (fond et surface) décroissent en direction de l'aval. La perspective transversale confirme que la vitesse au centre atteint sa valeur maximale et diminue en s'éloignant de l'axe médian de l'écoulement.

Les observations clés incluent : la présence d'un jet à haute vitesse dans la zone amont du ressaut, des fluctuations significatives de la vitesse dans la première région du ressaut, une diminution proportionnelle des vitesses au-delà de $x = 130$ cm, une vitesse maximale au centre du canal diminuant vers les parois, des valeurs négatives de vitesse à la surface entre $x = 120$ et 150 cm, une couche semi-uniforme près du seuil, des disparités de vitesse entre les côtés du canal proches du seuil et une vitesse plus élevée dans la partie rectangulaire du canal, représentant la base du canal composé, par rapport à la partie supérieure représentant la partie trapézoïdale du canal.

Dans la deuxième partie de l'étude, portant sur le ressaut forcé de type "A" régis par deux seuils minces, l'analyse des résultats révèle un jet à grande vitesse ($U \gg 150$ cm/s) dans la zone amont, décroissant substantiellement en direction de l'aval. L'analyse transversale confirme que la vitesse atteint sa valeur maximale au centre de l'écoulement ($Y = 0$ cm) et diminue progressivement en s'éloignant de l'axe central en allant vers les parois du canal.

Des vitesses opposées (signes négatifs) sont enregistrées tant en amont qu'en aval du premier seuil, surtout dans la zone de $X = 160$ à 255 cm. Près du premier seuil ($X = 180$ cm). Cette perturbation de la direction de l'écoulement est attribuable à la grande turbulence générée par le jet d'eau sortant du convergent. Les deux ensembles d'expériences présentent des similitudes

notables dans la distribution des vitesses le long de l'écoulement du ressaut contrôlé, mais la deuxième expérience, avec son débit plus élevé, affiche une turbulence encore plus prononcée.

Ces observations soulignent la complexité et la dynamique spécifiques du ressaut forcé de type "A" dans notre configuration expérimentale. En outre, le ressaut forcé de type "A", défini par la présence de deux seuils minces, dévoile une turbulence plus accentuée dans l'ensemble des sections longitudinales et transversales, comparativement au ressaut contrôlé.

Chapitre 5

Étude de la relation entre les vitesses relatives et les positions relatives

V.1 INTRODUCTION

Dans ce dernier chapitre de notre étude expérimentale, notre objectif est d'analyser la distribution des vitesses relatives ($U^* = U_i/U_1$) en corrélation avec les positions relatives ($X^* = \frac{X}{L_j}$), afin d'établir une relation fonctionnelle entre ces deux paramètres ($U^* = f(X^*)$). La variable U_i représente la valeur de la vitesse moyenne horizontale mesurée expérimentalement, considérée comme une valeur absolue (valeurs positives). Tandis que U_1 représente la vitesse de l'écoulement à la sortie du convergent. La position (X) est l'abscisse de mesure de la vitesse, et L_j désigne la longueur du ressaut hydraulique.

Ce travail se divise en deux parties distinctes. La première partie examine la distribution des vitesses relatives dans un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince. La seconde partie se concentre sur un ressaut forcé de type 'A' généré par deux seuils minces. Ces deux types de ressauts hydrauliques sont étudiés dans un canal de section composée d'un trapèze avec une base rectangulaire.

Pour chacun de ces deux types de ressauts, nous réaliserons deux séries d'essais distinctes, chacune présentant des caractéristiques géométriques hydrauliques variées. Plus précisément, pour les ressauts contrôlés et ceux de type 'A', nous analyserons la distribution des vitesses relatives sur environ 24 sections longitudinales (Y). Chacune de ces sections comporte quatre profils de vitesses relatives sur quatre plans différents (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4) pour chaque essai des deux types de ressaut mentionnés précédemment.

V.2 ÉVALUATION DE LA RELATION ENTRE LES VITESSES RELATIVES ET LES POSITIONS RELATIVES DANS UN RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLÉ

Nous entreprendrons l'analyse approfondie de la relation entre les vitesses relatives ($U^* = \frac{U_i}{U_1}$) et les positions relatives ($X^* = \frac{X}{L_j}$) à travers différentes sections longitudinales (Y). Il est essentiel de souligner que toutes les vitesses relatives seront calculées à partir des vitesses moyennes horizontales, considérées comme des valeurs absolues dans le cadre de cette étude.

Nous présenterons les valeurs relatives (U^* , X^*) dans une distribution similaire à celle exposée dans le chapitre précédent. Nous observerons comment U^* évolue en fonction de X^* le long des sections longitudinales, notamment à $Y = 0, -4, +4, -8, +8, -10, +10$ cm sur le plan Z_1 . Cette distribution sera également examinée sur les plans Z_2 , Z_3 et Z_4 pour obtenir une compréhension complète du comportement des vitesses relatives à travers différentes profondeurs du canal.

V.2.1 La première série d'essais

Les caractéristiques hydrauliques et géométriques de la première série d'essais concernant le ressaut contrôlé par seuil mince en canal composé sont consignées dans le tableau. 5.1 et présentées dans le chapitre précédent.

Les rapports adimensionnels (U^* et X^*) utilisés pour tracer les courbes (Fig 5.1 à 5.7) sont répertoriés dans les tableaux ci-dessous (Tab 5.1 à 5.4) :

Tableau 5.1 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour la section longitudinale $Y = 0$ cm.

X^*	U^* $Y = 0$			
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
0,517	0,332	0,332	0,309	0,332
0,560	0,207	0,199	0,270	0,285
0,603	0,077	0,293	0,232	0,283
0,647	0,230	0,229	0,208	0,231
0,690	0,056	0,136	0,184	0,178
0,733	0,125	0,142	0,152	0,176
0,776	0,033	0,126	0,121	0,174
0,819	0,049	0,101	0,104	0,165
0,862	0,028	0,038	0,085	0,156
0,905	0,028	0,109	0,083	0,165
0,948	0,021	0,055	0,079	0,173
0,991	0,049	0,071	0,071	0,162
1,034	0,050	0,069	0,072	0,159
1,078	0,051	0,068	0,073	0,156
1,121	0,020	0,058	0,063	0,140
1,164	0,038	0,045	0,065	0,146
1,207	0,038	0,038	0,063	0,143
1,250	0,038	0,032	0,061	0,139
1,293	0,040	0,043	0,059	0,139
1,336	0,063	0,052	0,065	0,139
1,379	0,050	0,042	0,064	0,135
1,422	0,037	0,031	0,063	0,131

1,466	0,067	0,057	0,072	0,120
1,509	0,039	0,029	0,077	0,130
1,552	0,060	0,051	0,081	0,117
1,595	0,070	0,036	0,087	0,126
1,638	0,043	0,074	0,093	0,113

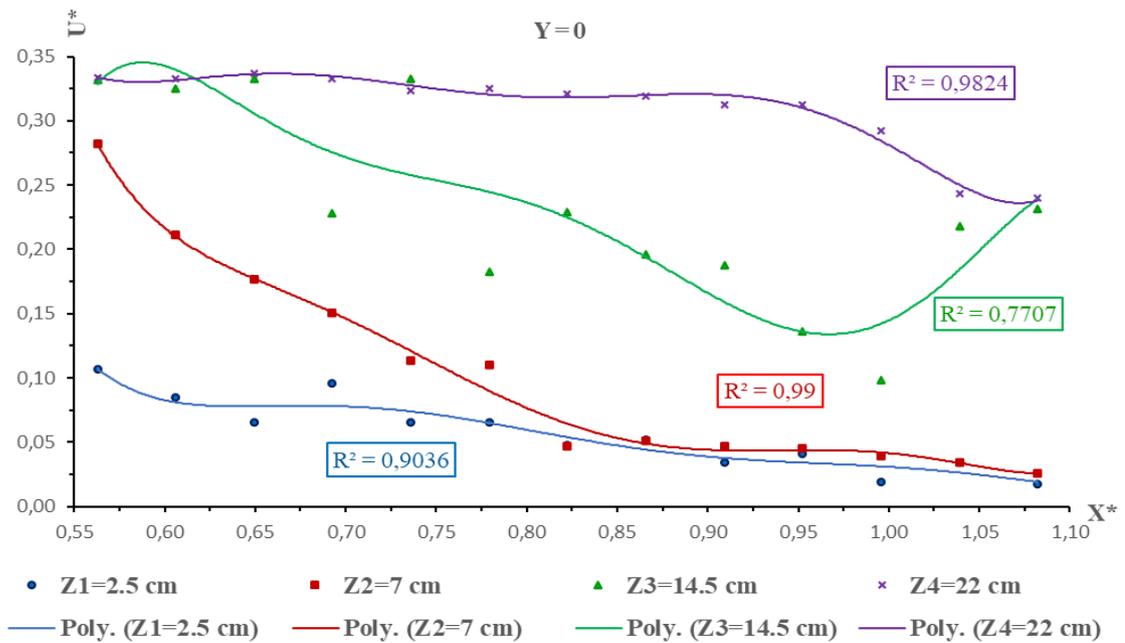


Figure 5.1 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale médiane $Y = 0$ cm

Tableau 5.2 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.

U^*								
$Y = - 4$					$Y = + 4$			
X^*	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
0,506	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326
0,549	0,280	0,326	0,309	0,314	0,272	0,292	0,292	0,315
0,591	0,236	0,326	0,291	0,303	0,219	0,254	0,256	0,304
0,633	0,174	0,269	0,275	0,290	0,154	0,242	0,273	0,286
0,675	0,110	0,212	0,249	0,279	0,089	0,182	0,026	0,270
0,717	0,071	0,165	0,199	0,287	0,053	0,141	0,199	0,284
0,759	0,029	0,116	0,163	0,300	0,018	0,101	0,144	0,292
0,802	0,023	0,066	0,138	0,288	0,019	0,066	0,124	0,274
0,844	0,014	0,024	0,111	0,291	0,014	0,031	0,102	0,259
0,886	0,014	0,022	0,093	0,251	0,014	0,030	0,083	0,292
0,928	0,014	0,014	0,074	0,212	0,014	0,024	0,061	0,319
0,970	0,014	0,014	0,054	0,199	0,014	0,024	0,049	0,243

1,013	0,014	0,014	0,034	0,195	0,014	0,024	0,035	0,167
1,055	0,014	0,014	0,032	0,192	0,014	0,024	0,035	0,164
1,097	0,014	0,014	0,029	0,187	0,014	0,024	0,033	0,161

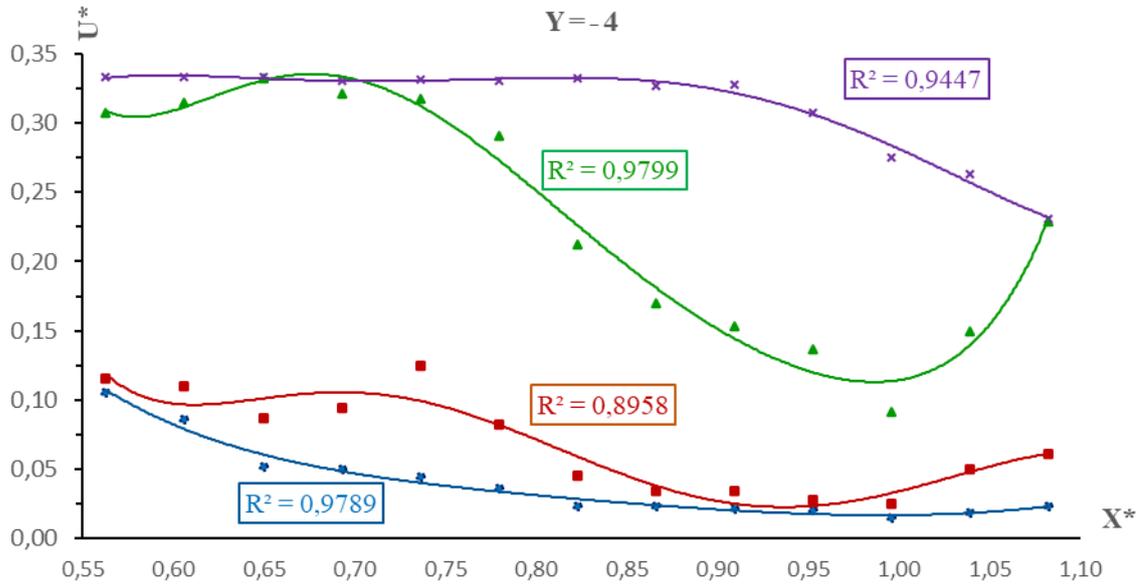


Figure 5.2 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = -4$ cm

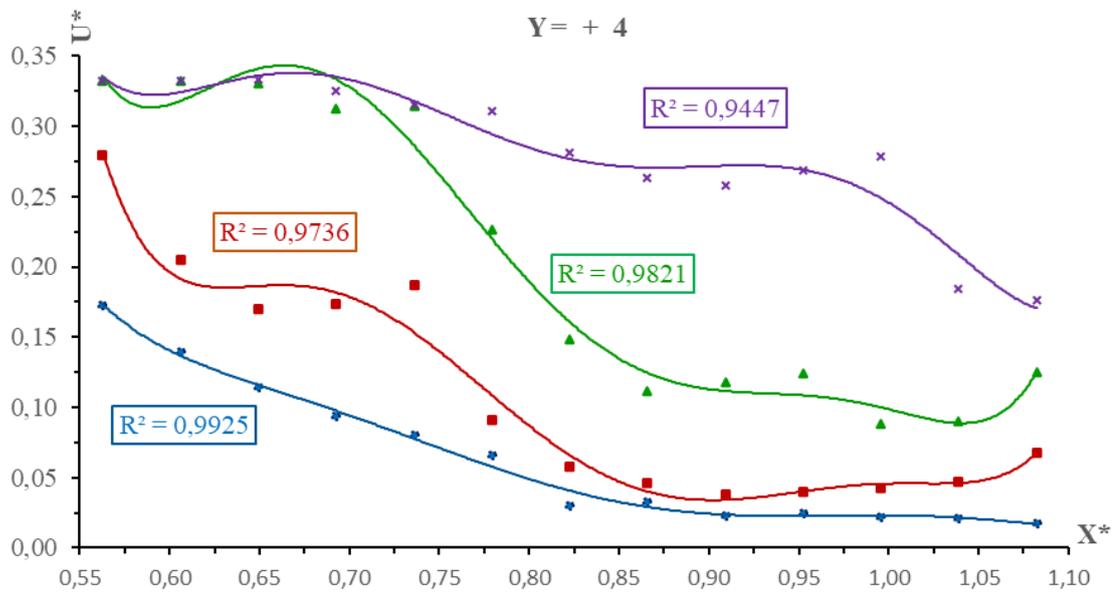


Figure 5.3 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = +4$ cm

Tableau 5.3 : Les vitesses relatives (U*) et les positions relatives (X*) pour les sections longitudinales

X*	U*							
	Y = - 8 cm				Y = - 8 cm			
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z1	Z2	Z3	Z4
0,517	0,316	0,332	0,256	0,332	0,127	0,175	0,168	0,332
0,560	0,249	0,262	0,266	0,306	0,078	0,153	0,127	0,305
0,603	0,183	0,193	0,274	0,279	0,030	0,131	0,085	0,279
0,647	0,277	0,144	0,210	0,272	0,181	0,217	0,109	0,239
0,690	0,056	0,103	0,146	0,265	0,060	0,147	0,133	0,198
0,733	0,049	0,083	0,124	0,243	0,061	0,131	0,132	0,163
0,776	0,023	0,105	0,101	0,221	0,029	0,059	0,131	0,127
0,819	0,044	0,047	0,077	0,163	0,044	0,103	0,090	0,163
0,862	0,017	0,044	0,054	0,108	0,020	0,040	0,048	0,198
0,905	0,040	0,079	0,061	0,120	0,024	0,050	0,047	0,154
0,948	0,017	0,023	0,068	0,132	0,014	0,032	0,045	0,109
0,991	0,018	0,056	0,059	0,105	0,032	0,041	0,064	0,104
1,034	0,022	0,051	0,059	0,105	0,025	0,028	0,062	0,101
1,078	0,026	0,045	0,059	0,104	0,018	0,016	0,061	0,098
1,121	0,034	0,057	0,049	0,079	0,019	0,052	0,082	0,099
1,164	0,041	0,031	0,054	0,095	0,014	0,023	0,055	0,090
1,207	0,041	0,032	0,054	0,094	0,016	0,024	0,051	0,089
1,250	0,041	0,032	0,054	0,092	0,018	0,024	0,048	0,088
1,293	0,042	0,058	0,046	0,096	0,014	0,038	0,040	0,097
1,336	0,027	0,040	0,054	0,090	0,021	0,019	0,048	0,086
1,379	0,036	0,039	0,056	0,096	0,020	0,020	0,048	0,078
1,422	0,046	0,038	0,058	0,099	0,020	0,020	0,048	0,070
1,466	0,039	0,041	0,063	0,093	0,037	0,041	0,057	0,072
1,509	0,038	0,025	0,065	0,103	0,017	0,019	0,047	0,070
1,552	0,050	0,079	0,068	0,101	0,042	0,073	0,038	0,069
1,595	0,061	0,033	0,093	0,091	0,015	0,017	0,056	0,080
1,638	0,065	0,065	0,091	0,092	0,014	0,109	0,073	0,092

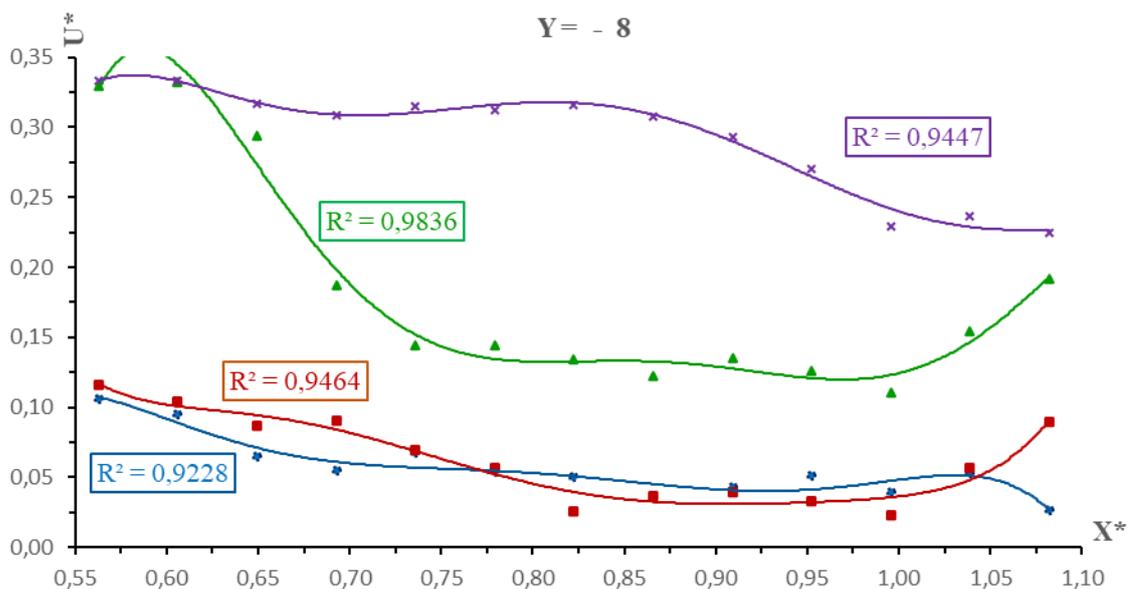


Figure 5.4 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = - 8$ cm

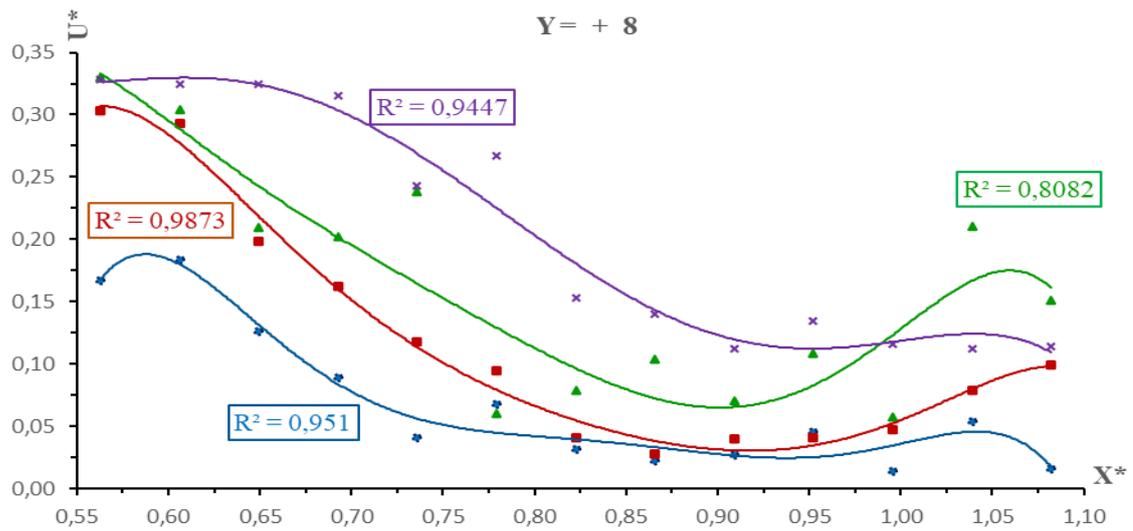


Figure 5.5 : Variation de la vitesse relative $U^* = f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = + 8\text{ cm}$

Tableau 5.4 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = -10\text{ cm}$ et $Y = +10\text{ cm}$.

X^*	U^*			
	$Y = -10\text{ cm}$		$Y = +10\text{ cm}$	
	Z3	Z4	Z3	Z4
0,517	0,223	0,332	0,113	0,332
0,560	0,182	0,279	0,102	0,285
0,603	0,141	0,237	0,091	0,237
0,647	0,114	0,216	0,084	0,210
0,690	0,086	0,194	0,078	0,183
0,733	0,074	0,196	0,074	0,140
0,776	0,058	0,192	0,069	0,096
0,819	0,045	0,146	0,045	0,075
0,862	0,031	0,092	0,019	0,053
0,905	0,030	0,102	0,024	0,067
0,948	0,023	0,112	0,029	0,081
0,991	0,033	0,116	0,030	0,074
1,034	0,034	0,114	0,034	0,075
1,078	0,034	0,111	0,038	0,077
1,121	0,043	0,120	0,044	0,069
1,164	0,045	0,104	0,033	0,074
1,207	0,047	0,104	0,032	0,074
1,250	0,049	0,103	0,031	0,073
1,293	0,054	0,090	0,022	0,068
1,336	0,050	0,093	0,037	0,059
1,379	0,048	0,087	0,039	0,058
1,422	0,051	0,082	0,040	0,056
1,466	0,052	0,075	0,052	0,053
1,509	0,070	0,102	0,049	0,051
1,552	0,088	0,090	0,045	0,050
1,595	0,094	0,093	0,042	0,051
1,638	0,088	0,090	0,039	0,052

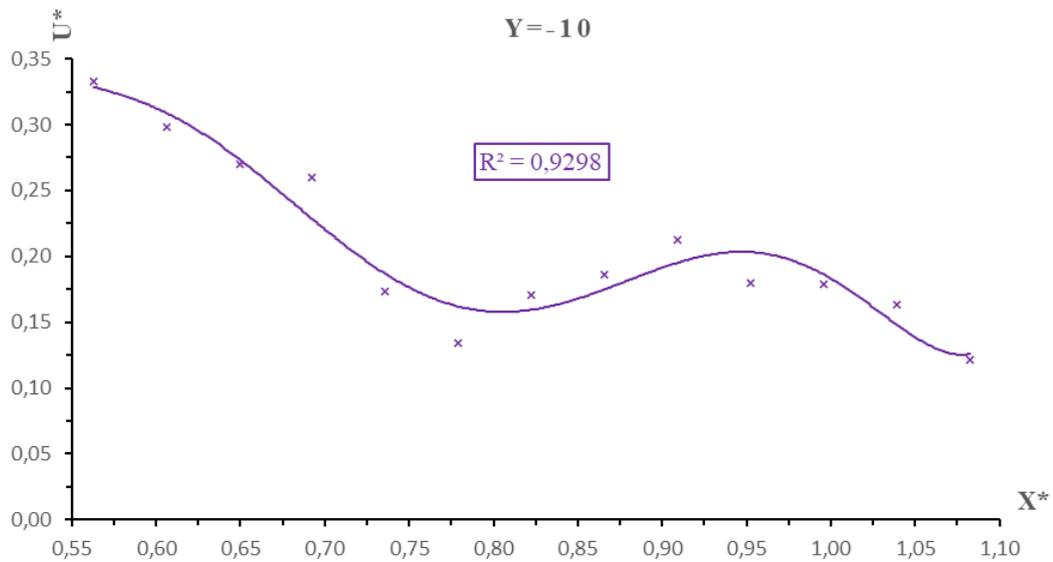


Figure 5.6 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = -10$ cm

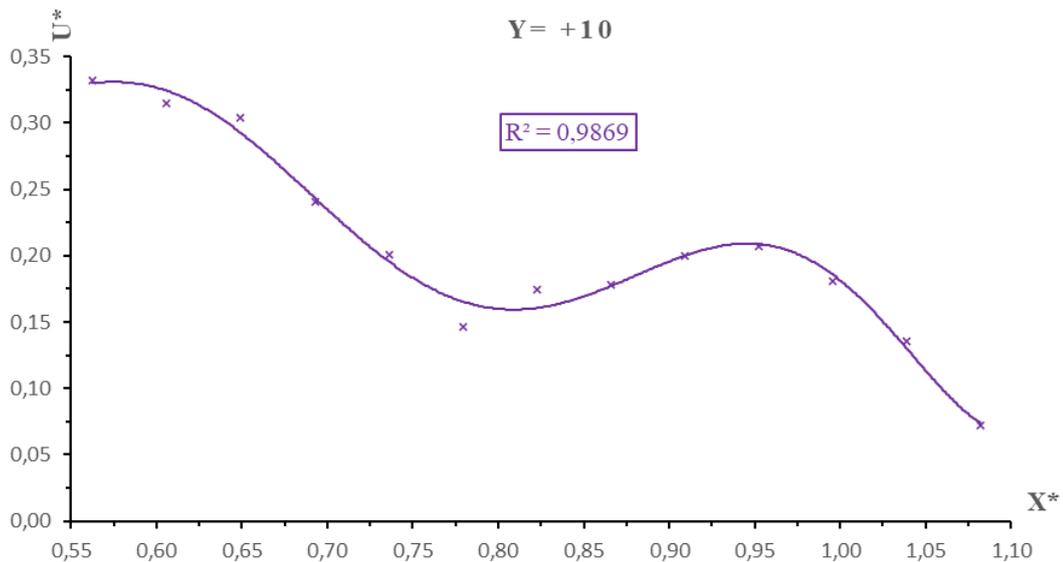


Figure 5.7 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = +10$ cm

Les figures de la première série d'essais présentées ci-dessus (Fig 5.1 jusqu'à Fig 5.7) découvrent distinctement la distribution des rapports de vitesse relative (U^*), créant un nuage de points bien réparti. Cette répartition nous a permis d'appliquer la méthode des moindres carrés non linéaires pour ajuster la composition de ces points. L'objectif était d'évaluer la corrélation entre les vitesses relatives (U^*) et le rapport des positions relatives (X^*) dans un ressaut hydraulique forcé de type "A" par seuil mince évoluant en canal composé. Cette relation a une tendance d'une fonction polynomiale du second degré se forme ;

$$U^* = a(X^*)^6 + b(X^*)^5 + c(X^*)^4 + d(X^*)^3 + e(X^*)^2 + f(X^*) + g$$

Les coefficients de détermination (R^2) remportés suite à cette analyse statistique ont montré des valeurs très élevées, oscillant entre **0,77** et **0,99**.

V.2.2 La deuxième série d'essais

Les propriétés hydrauliques de la deuxième série d'essais sur le ressaut contrôlé par seuil mince sont consignées dans le tableau 4.2, exposé dans le chapitre précédent. Les valeurs adimensionnelles (U^* et X^*) employées pour élaborer les graphiques (Fig 5.8 à 5.14) sont récapitulées dans les tableaux ci-dessous (Tab 5.5 à 5.8).

La représentation graphique des vitesses relatives par rapport aux positions relatives dans la deuxième série d'essais, précisément menée pour un ressaut hydraulique contrôlé dans un canal composé, est illustrée dans les figures (Fig 5.8 à Fig 5.14). Ces graphiques ont confirmé que la relation entre les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) a été établie à l'aide d'une modélisation par une fonction polynomiale du second degré ($U^* = a (X^*)^2 + b (X^*) + c$). Les coefficients de détermination (R^2) obtenus sont significativement élevés, variant entre 0,74 et 0,98. Ces valeurs de R^2 affirment de la qualité de l'ajustement de cette fonction polynomiale aux données expérimentales spécifiquement pour notre configuration du ressaut contrôlé. Cela souligne la robustesse et la précision de la relation existante entre les vitesses relatives et les positions relatives dans ce contexte expérimental particulier.

Tableau 4.5 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour la section longitudinale $Y = 0$ cm.

U^*				
$Y = 0$				
X^*	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
0,563	0,107	0,282	0,332	0,333
0,606	0,085	0,211	0,325	0,332
0,649	0,065	0,177	0,333	0,337
0,693	0,095	0,150	0,228	0,333
0,736	0,065	0,113	0,333	0,323
0,779	0,065	0,110	0,183	0,325
0,823	0,048	0,047	0,229	0,321
0,866	0,051	0,051	0,195	0,318
0,909	0,035	0,046	0,187	0,312
0,952	0,041	0,045	0,136	0,312
0,996	0,019	0,039	0,098	0,291
1,039	0,034	0,034	0,218	0,243
1,082	0,017	0,026	0,231	0,239

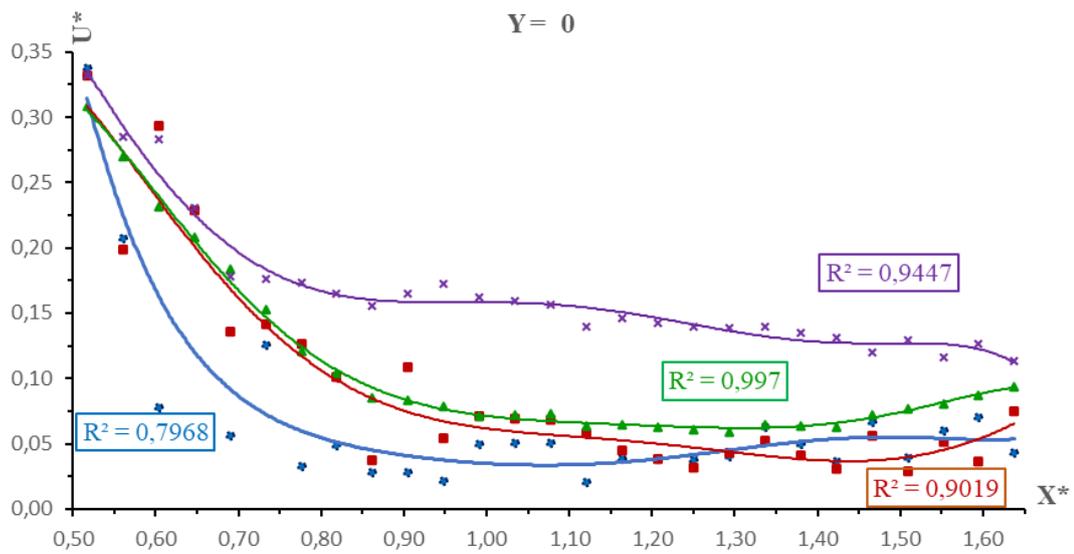


Figure 5.8 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = 0$ cm

Tableau 5.6 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.

U^*								
$Y = - 4$					$Y = + 4$			
X^*	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
0,563	0,106	0,115	0,307	0,332	0,172	0,279	0,332	0,332
0,606	0,085	0,110	0,314	0,332	0,139	0,204	0,332	0,332
0,649	0,052	0,087	0,332	0,333	0,114	0,170	0,330	0,333
0,693	0,050	0,094	0,321	0,330	0,093	0,173	0,312	0,325
0,736	0,045	0,125	0,317	0,331	0,080	0,186	0,314	0,315
0,779	0,036	0,082	0,290	0,330	0,066	0,091	0,226	0,310
0,823	0,023	0,045	0,212	0,332	0,030	0,058	0,149	0,281
0,866	0,023	0,034	0,170	0,327	0,033	0,046	0,111	0,263
0,909	0,022	0,034	0,153	0,327	0,023	0,038	0,118	0,257
0,952	0,020	0,028	0,136	0,307	0,025	0,039	0,124	0,268
0,996	0,015	0,025	0,091	0,275	0,022	0,042	0,088	0,278
1,039	0,018	0,050	0,149	0,263	0,021	0,047	0,090	0,184
1,082	0,023	0,061	0,229	0,230	0,017	0,067	0,125	0,176

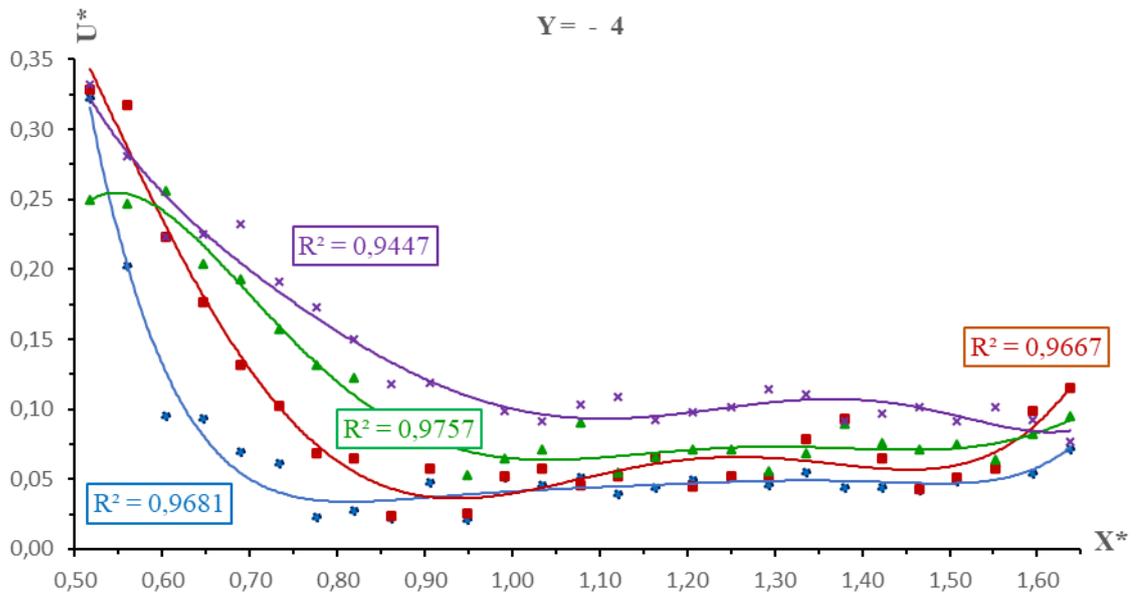


Figure 5.9 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = -4$ cm

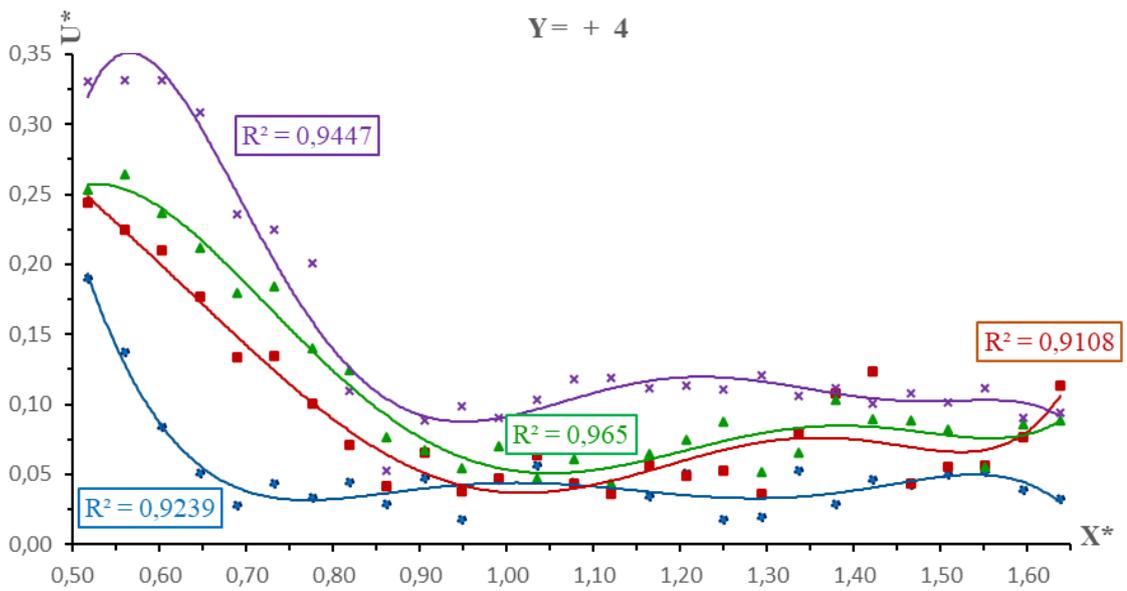


Figure 5.10 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = +4$ cm

Tableau 5.7 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 8 \text{ cm}$ et $Y = + 8 \text{ cm}$.

U^*								
X^*	$Y = - 8 \text{ cm}$				$Y = + 8 \text{ cm}$			
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z1	Z2	Z3	Z4
0,563	0,105	0,116	0,329	0,333	0,167	0,303	0,330	0,328
0,606	0,095	0,104	0,332	0,332	0,183	0,292	0,304	0,324
0,649	0,065	0,086	0,293	0,316	0,126	0,198	0,209	0,324
0,693	0,055	0,090	0,187	0,308	0,089	0,162	0,202	0,314
0,736	0,067	0,069	0,144	0,315	0,041	0,118	0,238	0,243
0,779	0,054	0,057	0,144	0,312	0,068	0,094	0,060	0,266
0,823	0,050	0,026	0,134	0,315	0,031	0,041	0,079	0,153
0,866	0,037	0,036	0,122	0,308	0,022	0,028	0,103	0,140
0,909	0,043	0,039	0,135	0,293	0,026	0,040	0,071	0,112
0,952	0,051	0,033	0,126	0,270	0,046	0,040	0,108	0,135
0,996	0,039	0,023	0,111	0,229	0,014	0,047	0,057	0,115
1,039	0,053	0,057	0,154	0,236	0,053	0,079	0,210	0,112
1,082	0,026	0,089	0,191	0,225	0,016	0,099	0,151	0,114

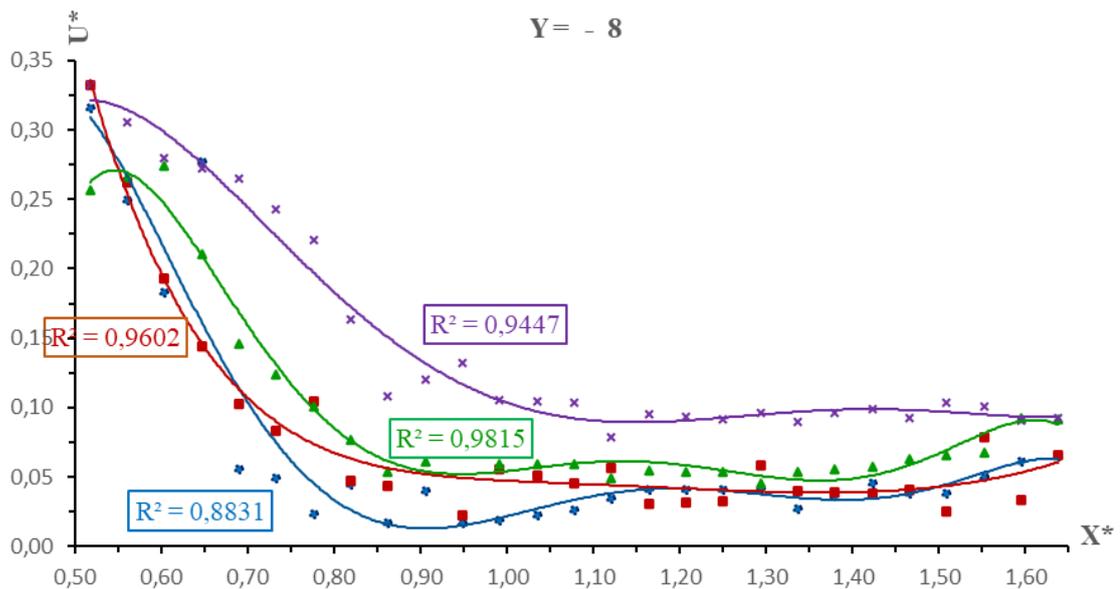


Figure 5.11 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = - 8 \text{ cm}$.

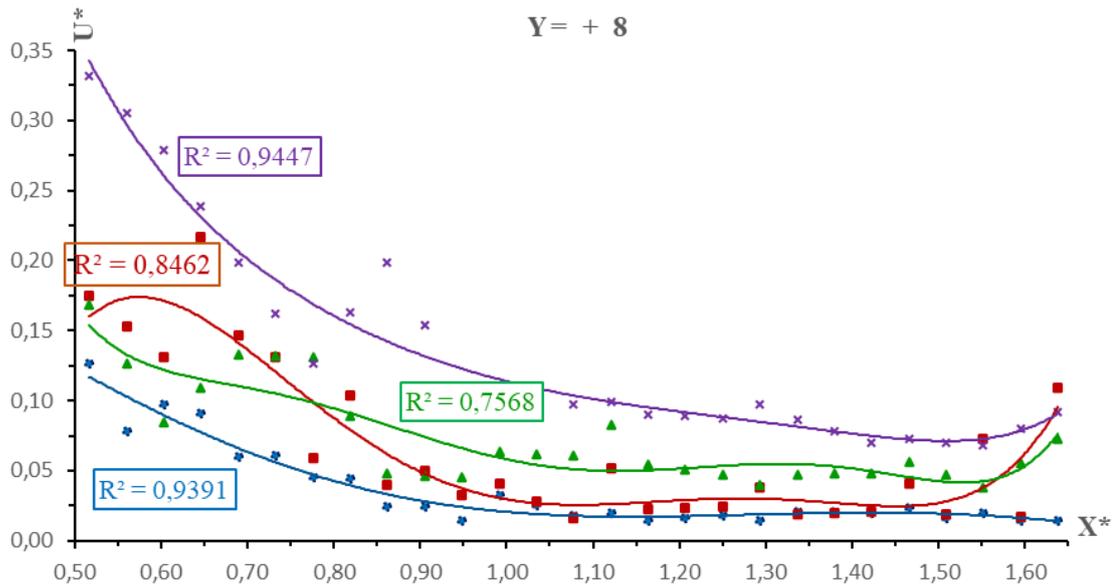


Figure 5.12 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = + 8$ cm.

Tableau 5.8 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 10$ cm et $Y = +10$ cm.

U*		
	Y= -10 cm	Y= +10 cm
X*	Z4	Z4
0,563	0,332	0,332
0,606	0,298	0,315
0,649	0,270	0,303
0,693	0,260	0,240
0,736	0,173	0,201
0,779	0,134	0,146
0,823	0,170	0,174
0,866	0,185	0,177
0,909	0,212	0,200
0,952	0,180	0,207
0,996	0,179	0,180
1,039	0,163	0,136
1,082	0,121	0,072

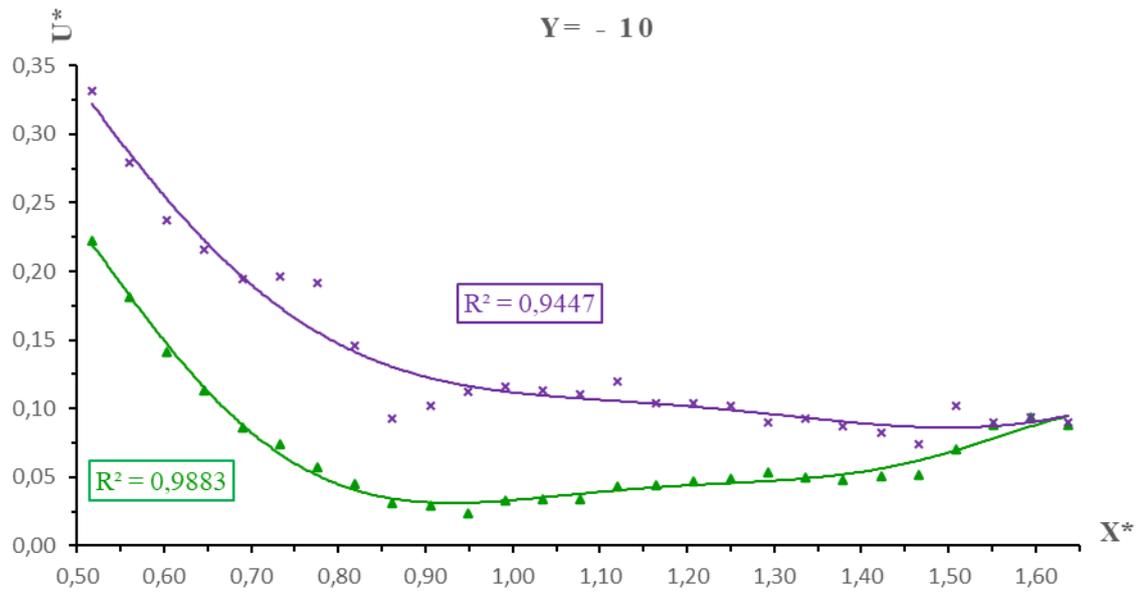


Figure 5.13 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = -10$ cm.

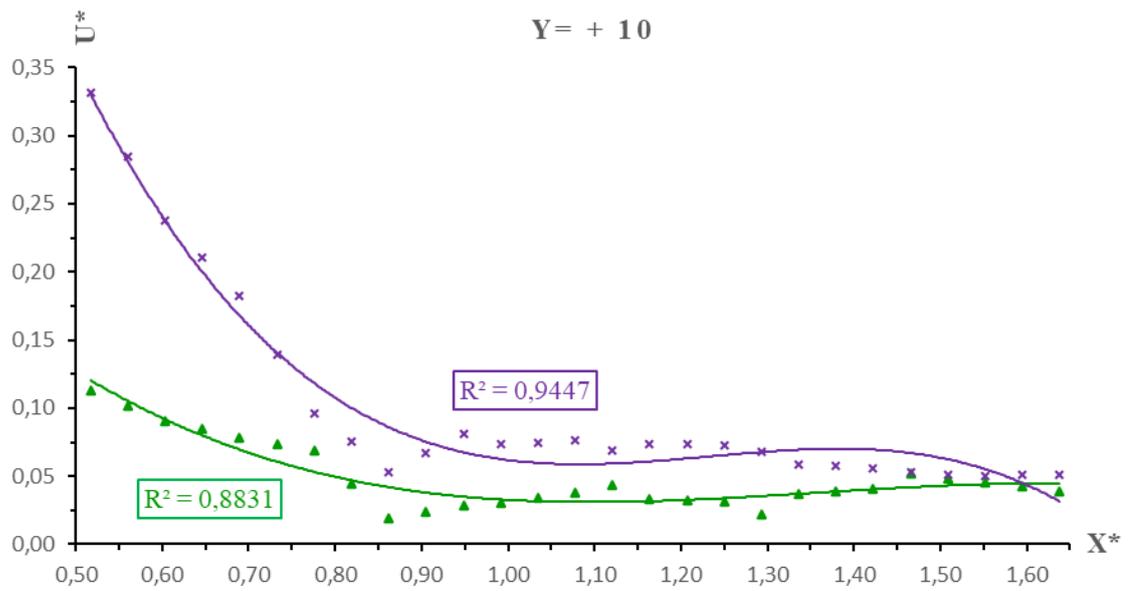


Figure 5.14 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = +10$ cm.

V.3 ÉVALUATION DE LA RELATION ENTRE LES VITESSES RELATIVES ET LES POSITIONS RELATIVES DANS UN RESSAUT HYDRAULIQUE FORCÉ DE TYPE "A"

Cette phase de notre étude expérimentale vise à analyser aussi la corrélation entre les vitesses relatives ($U^* = U_i/U_1$) et les positions relatives ($X^* = X/L_J$) au sein du ressaut Hydraulique Forcé de Type "A". L'objectif est d'établir une relation fonctionnelle entre ces deux paramètres ($U^* = f(X^*)$).

Les valeurs relatives (U^* , X^*) observées dans cette étude présentent une répartition similaire à celles exposées précédemment, démontrant une dépendance de U^* par rapport à X^* le long des sections longitudinales situées à $Y = 0, -4, +4, -8, +8, -11, +11$ cm sur le plan Z_1 . Cette répartition est similaire sur les plans Z_2 , Z_3 et Z_4 , soulignant la cohérence des observations à travers différentes sections du ressaut hydraulique de type "A".

Il convient de noter que les paramètres U_i , U_1 , X et L_J conservent les mêmes notations que celles introduites dans la première partie de notre chapitre.

V.3.1 La première série d'essais

Les caractéristiques hydrauliques et géométriques de cette première série d'essais portant sur le ressaut forcé de type "A" sont consignées dans le chapitre antérieur (Tab 4.4). Les valeurs adimensionnelles (U^* et X^*) utilisées pour créer les courbes (Fig 5.15 à 5.21) sont répertoriées dans les tableaux ci-dessous (Tab 5.9 à 5.12).

Tableau 5.9 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour la section longitudinale $Y = -0$ cm.

U^*				
$Y = 0$				
X^*	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
0,506	0,326	0,326	0,326	0,326
0,549	0,297	0,327	0,299	0,305
0,591	0,268	0,327	0,272	0,285
0,633	0,207	0,266	0,255	0,277
0,675	0,146	0,204	0,238	0,269
0,717	0,088	0,157	0,217	0,272
0,759	0,030	0,111	0,196	0,275
0,802	0,022	0,069	0,149	0,273
0,844	0,014	0,028	0,101	0,271
0,886	0,014	0,021	0,081	0,226
0,928	0,014	0,015	0,061	0,181
0,970	0,014	0,015	0,045	0,173
1,013	0,014	0,015	0,030	0,164
1,055	0,014	0,014	0,027	0,161

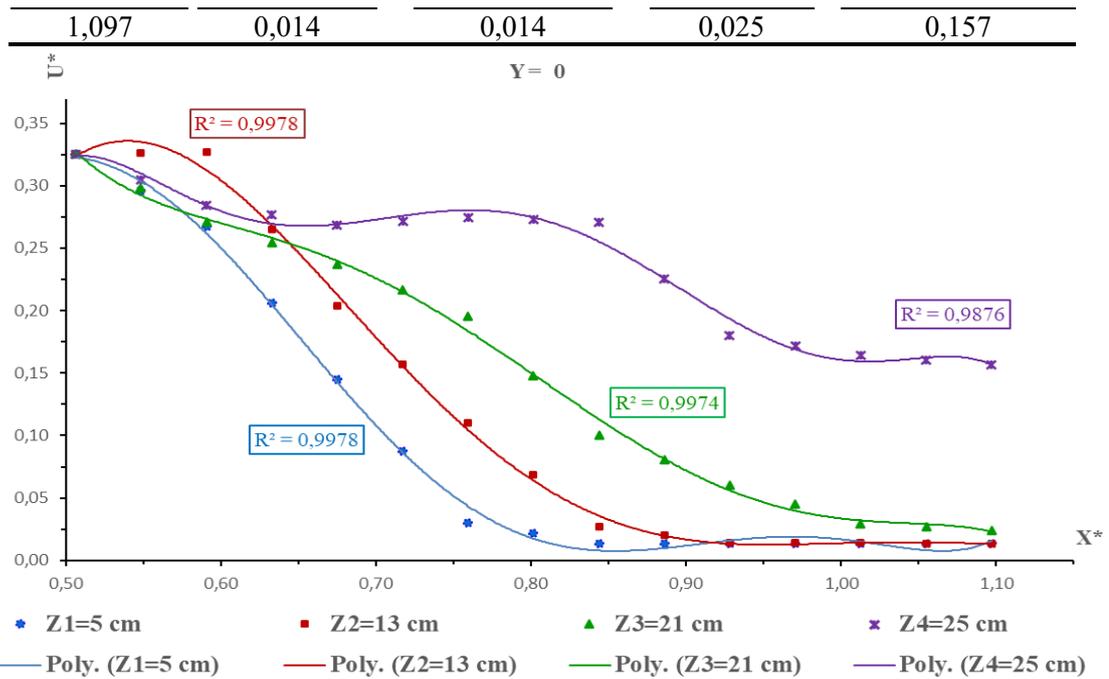


Figure 5.15 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = 0$ cm.

Tableau 5.10 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.

U^*								
$Y = - 4$					$Y = + 4$			
X^*	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
0,506	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326
0,549	0,280	0,326	0,309	0,314	0,272	0,292	0,292	0,315
0,591	0,236	0,326	0,291	0,303	0,219	0,254	0,256	0,304
0,633	0,174	0,269	0,275	0,290	0,154	0,242	0,273	0,286
0,675	0,110	0,212	0,249	0,279	0,089	0,182	0,026	0,270
0,717	0,071	0,165	0,199	0,287	0,053	0,141	0,199	0,284
0,759	0,029	0,116	0,163	0,300	0,018	0,101	0,144	0,292
0,802	0,023	0,066	0,138	0,288	0,019	0,066	0,124	0,274
0,844	0,014	0,024	0,111	0,291	0,014	0,031	0,102	0,259
0,886	0,014	0,022	0,093	0,251	0,014	0,030	0,083	0,292
0,928	0,014	0,014	0,074	0,212	0,014	0,024	0,061	0,319
0,970	0,014	0,014	0,054	0,199	0,014	0,024	0,049	0,243
1,013	0,014	0,014	0,034	0,195	0,014	0,024	0,035	0,167
1,055	0,014	0,014	0,032	0,192	0,014	0,024	0,035	0,164
1,097	0,014	0,014	0,029	0,187	0,014	0,024	0,033	0,161

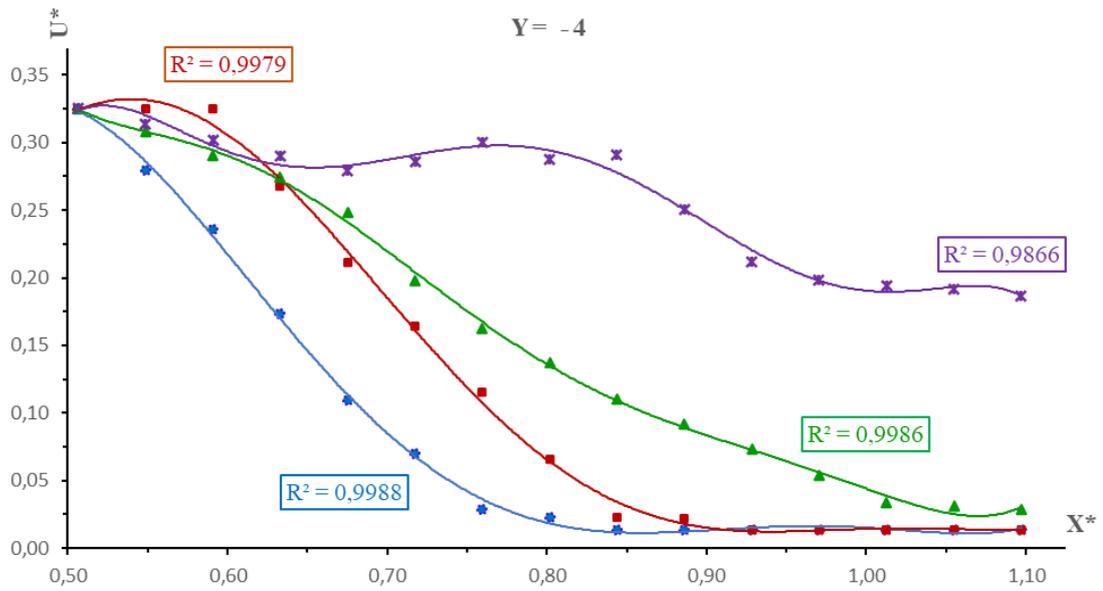


Figure 5.16 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = -4$ cm.

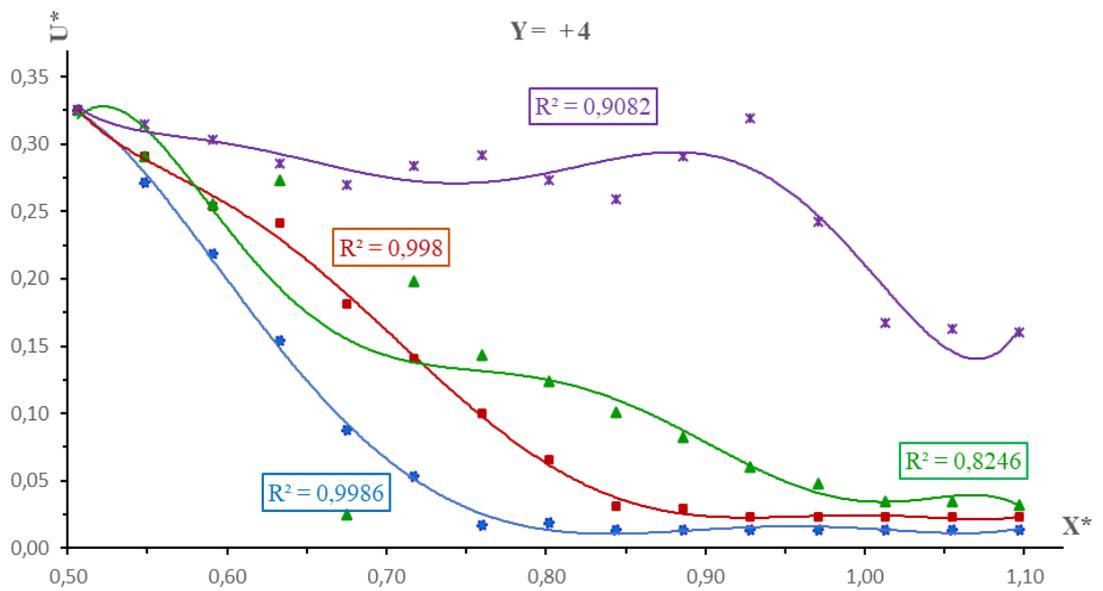


Figure 5.17 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = +4$ cm.

Tableau 5.11 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4 \text{ cm}$ et $Y = + 4 \text{ cm}$.

X^*	U^*							
	$Y = - 8 \text{ cm}$				$Y = + 8 \text{ cm}$			
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z1	Z2	Z3	Z4
0,506	0,326	0,326	0,326	0,326	0,253	0,326	0,326	0,326
0,549	0,295	0,321	0,221	0,326	0,179	0,227	0,268	0,309
0,591	0,264	0,316	0,116	0,326	0,104	0,128	0,209	0,292
0,633	0,176	0,236	0,119	0,303	0,086	0,199	0,186	0,264
0,675	0,088	0,157	0,122	0,280	0,069	0,146	0,164	0,235
0,717	0,058	0,117	0,130	0,294	0,049	0,109	0,130	0,234
0,759	0,029	0,078	0,139	0,308	0,029	0,071	0,095	0,234
0,802	0,022	0,053	0,118	0,313	0,022	0,049	0,078	0,243
0,844	0,014	0,027	0,097	0,317	0,014	0,026	0,060	0,253
0,886	0,014	0,020	0,064	0,236	0,014	0,022	0,045	0,286
0,928	0,014	0,014	0,032	0,154	0,014	0,020	0,030	0,319
0,970	0,014	0,014	0,029	0,184	0,014	0,020	0,036	0,233
1,013	0,014	0,014	0,025	0,214	0,014	0,018	0,043	0,148
1,055	0,014	0,014	0,025	0,213	0,014	0,017	0,042	0,146
1,097	0,014	0,014	0,000	0,000	0,014	0,016	0,041	0,143

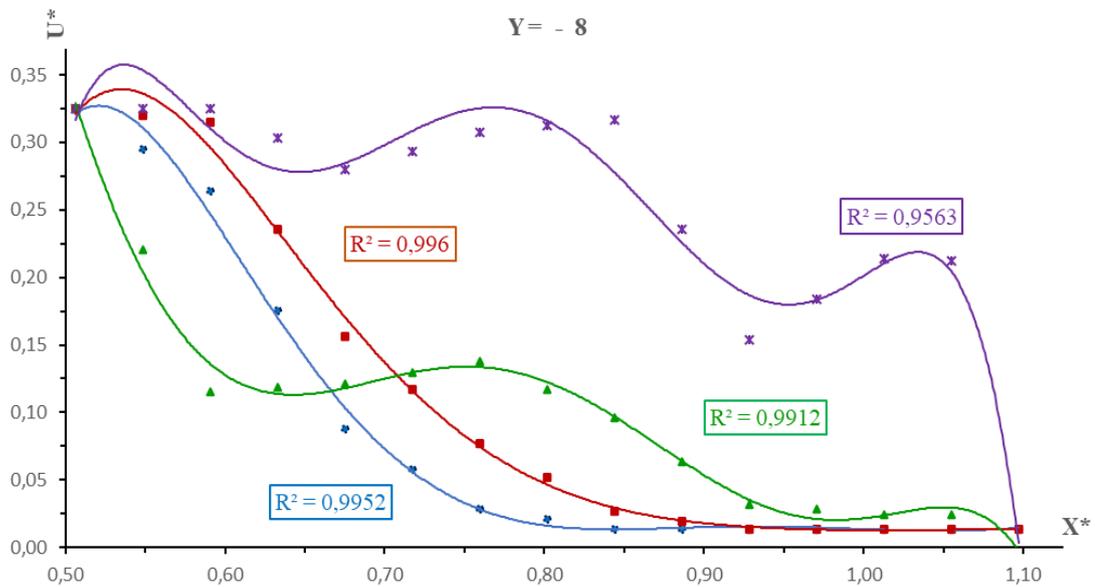


Figure 5.18 : Variation de la vitesse relative $U^* = f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = - 8 \text{ cm}$.

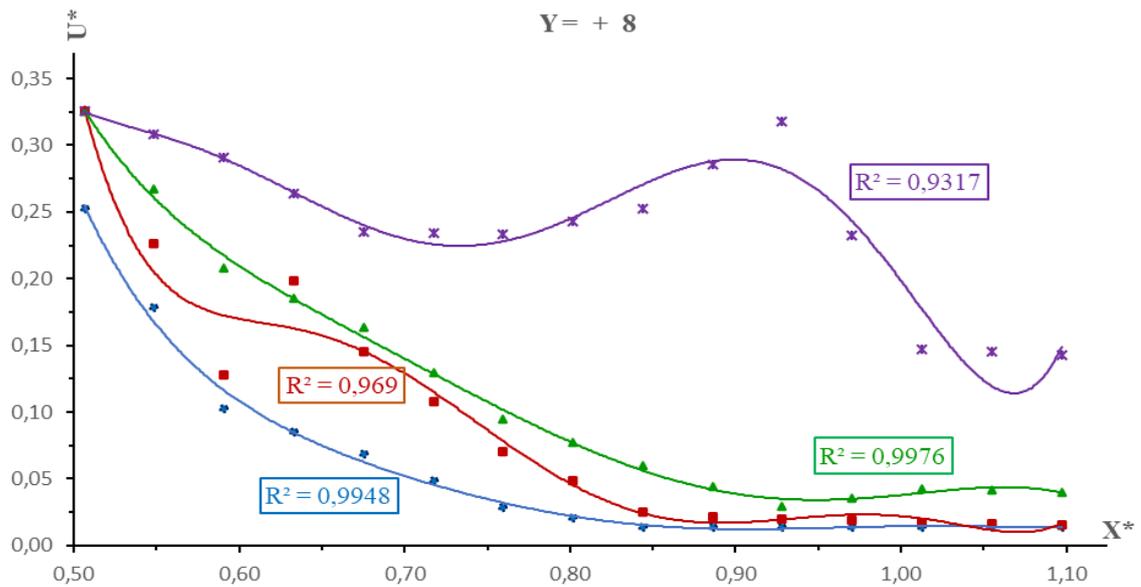


Figure 5.19 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = + 8$ cm.

Tableau 5.12 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.

X^*	U^*			
	$Y = - 11$ cm		$Y = + 11$ cm	
	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4
0,506	0,326	0,326	0,326	0,326
0,549	0,316	0,320	0,228	0,234
0,591	0,307	0,315	0,131	0,142
0,633	0,212	0,257	0,102	0,130
0,675	0,117	0,199	0,074	0,119
0,717	0,083	0,233	0,048	0,147
0,759	0,049	0,267	0,023	0,176
0,802	0,040	0,277	0,034	0,163
0,844	0,031	0,286	0,046	0,151
0,886	0,040	0,210	0,042	0,231
0,928	0,049	0,134	0,039	0,311
0,970	0,041	0,140	0,039	0,311
1,013	0,034	0,146	0,039	0,311
1,055	0,034	0,146	0,029	0,203
1,097	0,033	0,146	0,020	0,095

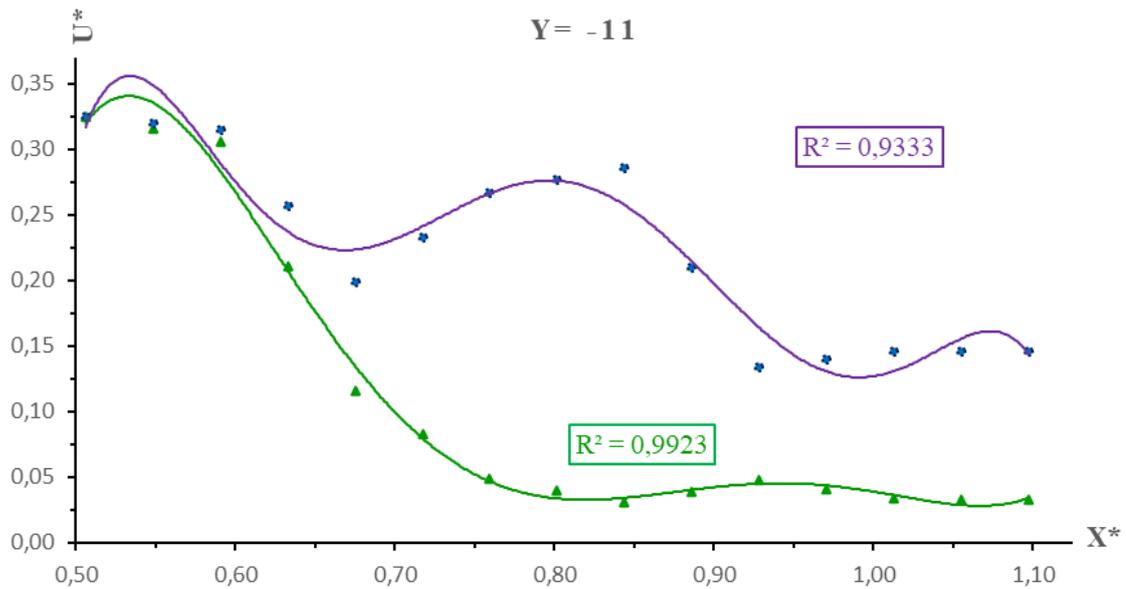


Figure 5.20 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = -11$ cm.

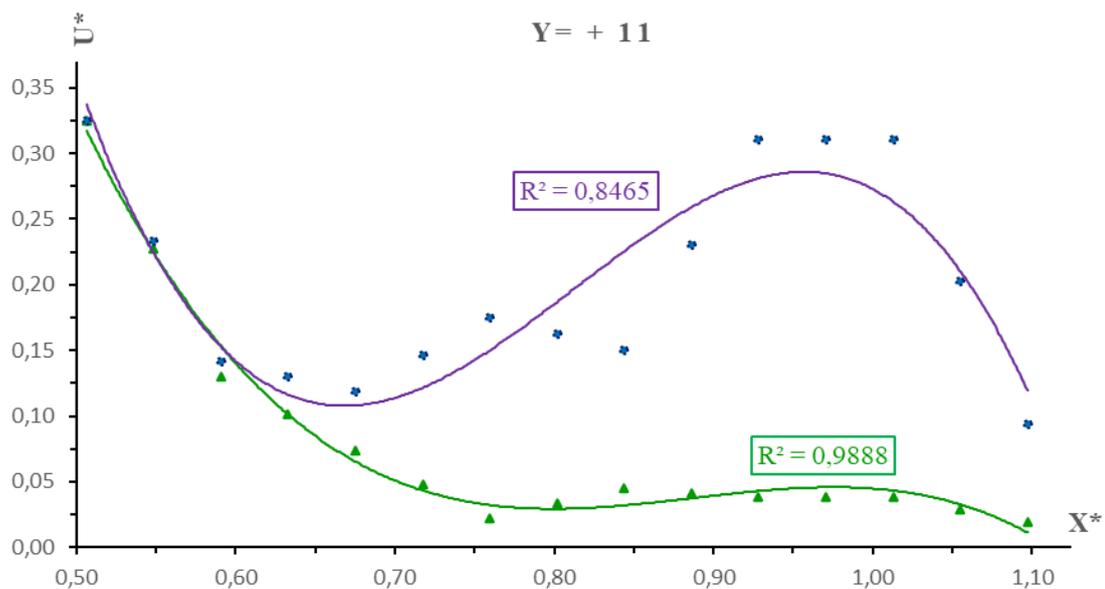


Figure 5.21 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = +11$ cm.

Les figures présentées ci-dessus (Fig 5.15 jusqu'à Fig 5.21) de la première série d'essais, dévoilent clairement la distribution des rapports de vitesse relative (U^*), formant un nuage de points bien réparti. Cette distribution nous a permis d'appliquer la méthode des moindres carrés non linéaires pour ajuster l'ensemble de ces points. L'objectif était d'établir la corrélation entre les vitesses relatives (U^*) et le rapport des positions relatives (X^*) dans un ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant en canal composé. Cette relation a été spécifiée par une fonction polynomiale. Les coefficients de détermination (R^2) obtenus suite à cette analyse

statistique ont révélé des valeurs très élevés, oscillant entre **0,83** et **0,99**. Ces coefficients sont des indicateurs de la précision avec laquelle le modèle polynomial décrit la relation entre les vitesses relatives et les positions relatives dans notre étude expérimentale.

V.3.2 La deuxième série d'essais

Les caractéristiques hydrauliques et les dimensions géométriques relatives aux deuxièmes séries d'essai du ressaut de type "A" ont été documentées dans le tableau 4.4 du chapitre antérieur. Les données adimensionnelles (U^* et X^*) utilisées pour générer les courbes graphiques (Figures 5.22 à 5.28) sont résumées dans les tableaux ci-dessous (5.13 à 5.16).

Tableau 5.13 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour la section longitudinale $Y = - 0$ cm.

U^*				
$Y = 0$				
X^*	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
0,55	0,277	0,277	0,277	0,277
0,59	0,277	0,277	0,277	0,277
0,63	0,277	0,277	0,277	0,277
0,67	0,252	0,277	0,277	0,277
0,71	0,227	0,277	0,277	0,271
0,75	0,168	0,271	0,277	0,265
0,79	0,109	0,268	0,277	0,263
0,83	0,085	0,245	0,277	0,252
0,87	0,061	0,156	0,277	0,250
0,91	0,051	0,165	0,277	0,249
0,94	0,041	0,173	0,277	0,243
0,98	0,045	0,192	0,253	0,239
1,02	0,048	0,223	0,230	0,237
1,06	0,083	0,225	0,230	0,237
1,10	0,119	0,228	0,230	0,235
1,14	0,092	0,222	0,230	0,234
1,18	0,065	0,221	0,230	0,235

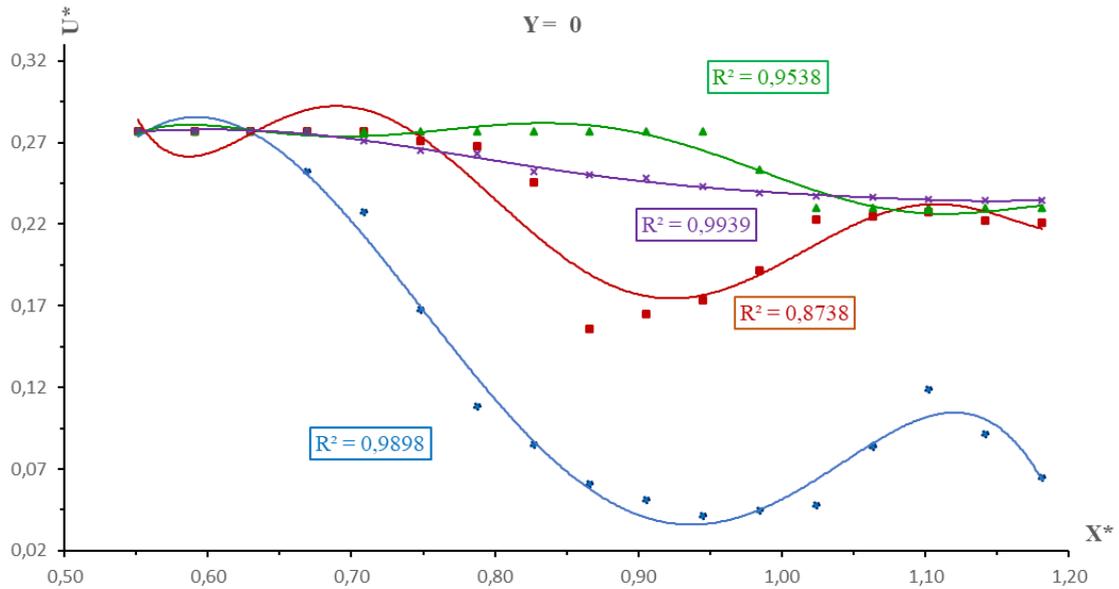


Figure 5.22 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = 0$ cm.

Tableau 5.14 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.

U*								
Y = - 4					Y = + 4			
X*	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄
0,55	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277
0,59	0,244	0,262	0,277	0,277	0,246	0,265	0,277	0,277
0,63	0,214	0,250	0,277	0,277	0,215	0,252	0,277	0,277
0,67	0,196	0,219	0,276	0,247	0,194	0,219	0,277	0,277
0,71	0,084	0,240	0,265	0,249	0,174	0,164	0,261	0,269
0,75	0,144	0,169	0,242	0,239	0,141	0,170	0,243	0,265
0,79	0,062	0,245	0,198	0,243	0,108	0,178	0,204	0,260
0,83	0,089	0,187	0,198	0,229	0,083	0,189	0,197	0,249
0,87	0,074	0,223	0,194	0,228	0,059	0,200	0,201	0,249
0,91	0,052	0,203	0,187	0,219	0,056	0,200	0,199	0,245
0,94	0,028	0,183	0,217	0,208	0,054	0,198	0,225	0,240
0,98	0,050	0,175	0,168	0,211	0,054	0,171	0,170	0,234
1,02	0,045	0,186	0,223	0,196	0,055	0,145	0,223	0,230
1,06	0,075	0,169	0,216	0,188	0,072	0,171	0,220	0,229
1,10	0,136	0,201	0,224	0,167	0,091	0,199	0,223	0,224
1,14	0,077	0,192	0,215	0,145	0,073	0,196	0,223	0,223
1,18	0,136	0,201	0,207	0,141	0,057	0,194	0,206	0,215

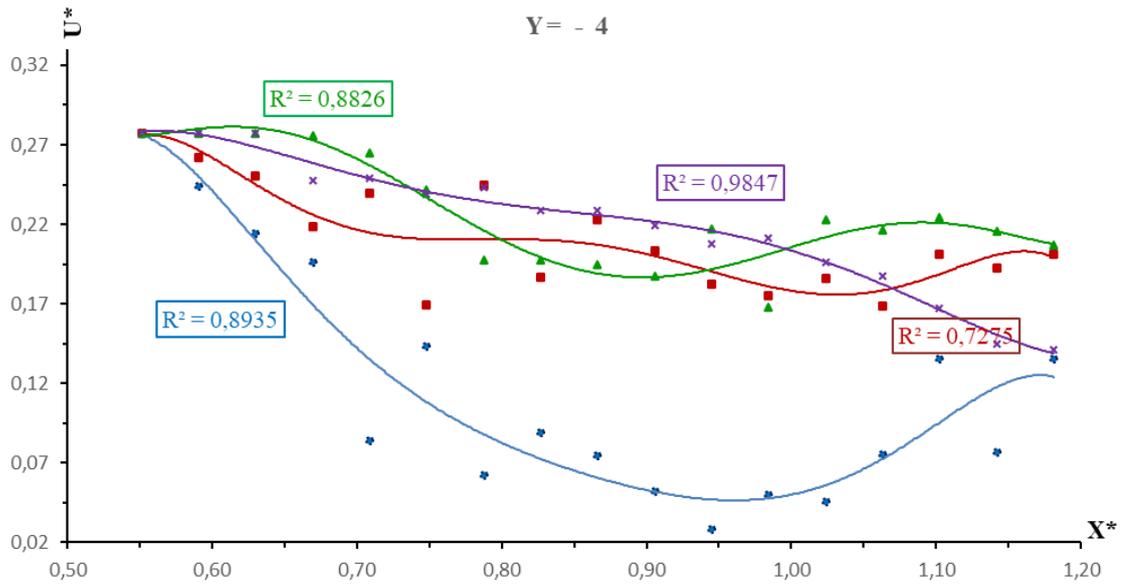


Figure 5.23 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = - 4$ cm.

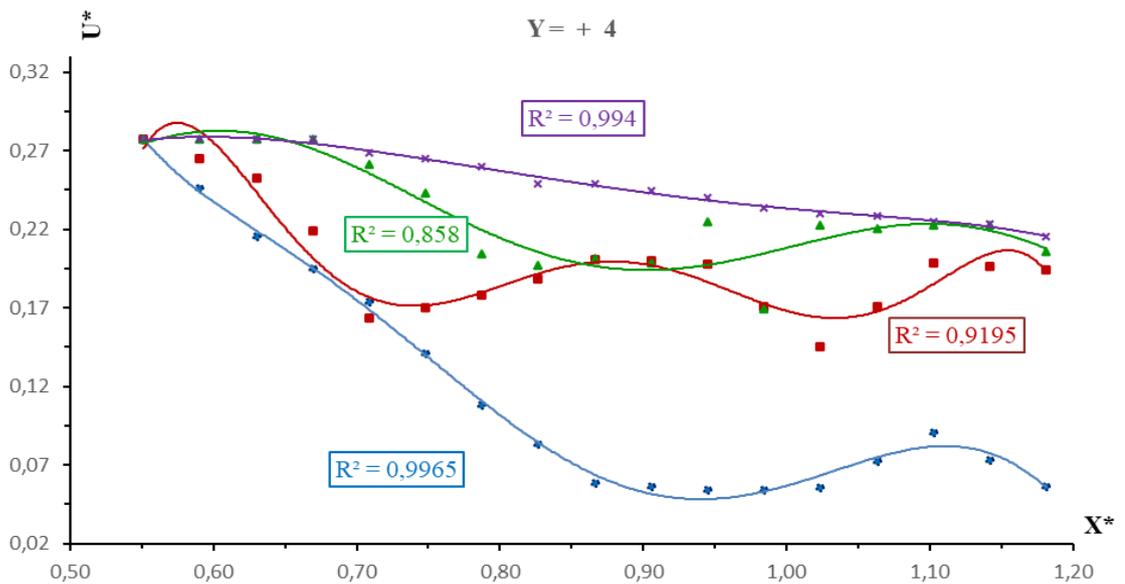


Figure 5.24 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = + 4$ cm.

Tableau 5.15 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales pour $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.

U^*								
$Y = - 8$ cm					$Y = + 8$ cm			
X^*	Z1	Z2	Z3	Z4	Z1	Z2	Z3	Z4
0,55	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277
0,59	0,204	0,229	0,277	0,277	0,206	0,231	0,277	0,277
0,63	0,133	0,182	0,277	0,277	0,135	0,186	0,277	0,277
0,67	0,092	0,183	0,277	0,277	0,138	0,148	0,277	0,277
0,71	0,052	0,184	0,277	0,266	0,142	0,179	0,277	0,269
0,75	0,042	0,213	0,193	0,262	0,124	0,180	0,194	0,263
0,79	0,032	0,242	0,109	0,254	0,106	0,183	0,111	0,256
0,83	0,038	0,238	0,108	0,249	0,075	0,177	0,111	0,252
0,87	0,041	0,235	0,108	0,245	0,045	0,175	0,109	0,248
0,91	0,040	0,224	0,121	0,243	0,053	0,148	0,119	0,243
0,94	0,043	0,214	0,134	0,238	0,062	0,122	0,128	0,239
0,98	0,042	0,232	0,130	0,237	0,050	0,118	0,125	0,237
1,02	0,040	0,251	0,127	0,237	0,038	0,113	0,121	0,237
1,06	0,079	0,214	0,124	0,235	0,039	0,113	0,119	0,236
1,10	0,118	0,178	0,120	0,235	0,042	0,112	0,115	0,235
1,14	0,097	0,178	0,118	0,232	0,056	0,112	0,114	0,113
1,18	0,077	0,178	0,118	0,243	0,071	0,110	0,113	0,250

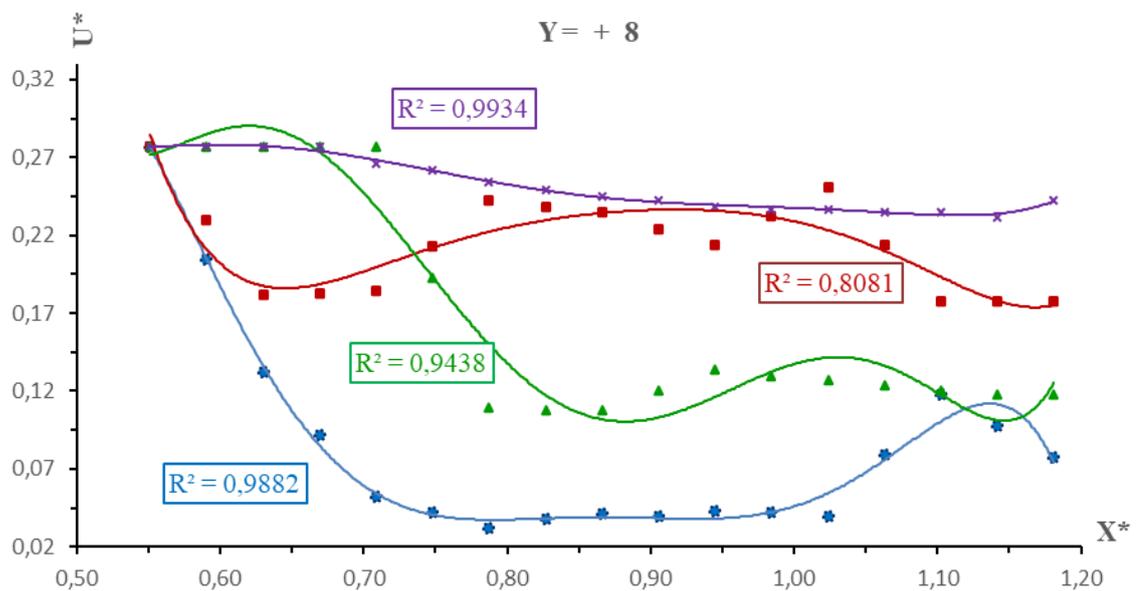


Figure 5.25 : Variation de la vitesse relative $U^* = f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = - 8$ cm.

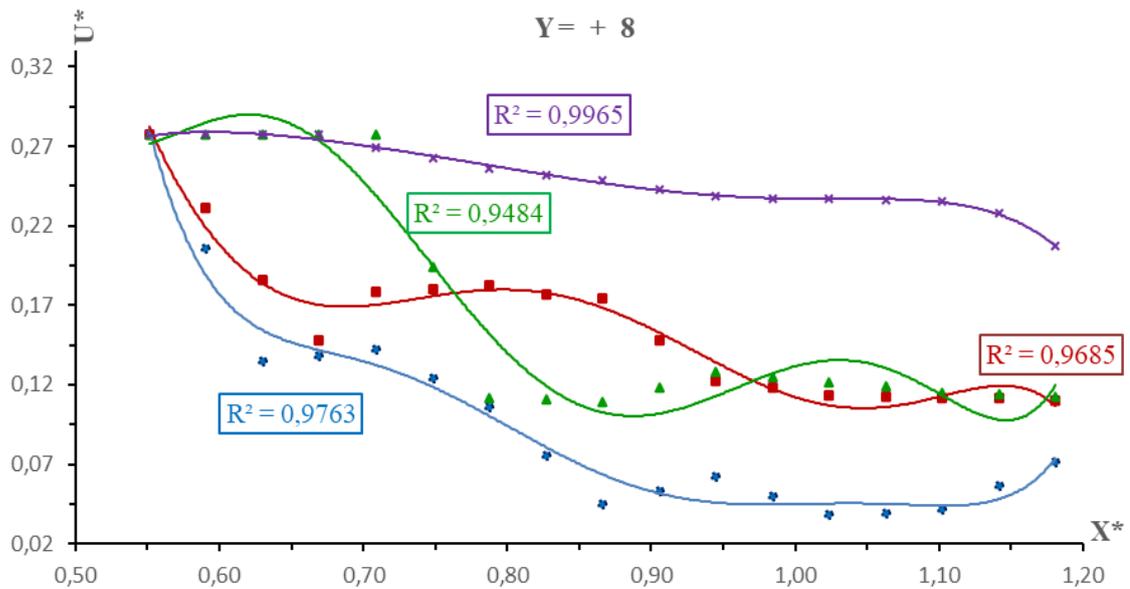


Figure 5.26 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = + 8$ cm.

Tableau 5.16 : Les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) pour les sections longitudinales $Y = - 4$ cm et $Y = + 4$ cm.

X^*	U^*			
	$Y = - 11$ cm		$Y = +11$ cm	
	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4
0,55	0,278	0,278	0,278	0,278
0,59	0,269	0,278	0,248	0,278
0,63	0,261	0,278	0,218	0,278
0,67	0,229	0,274	0,213	0,272
0,71	0,198	0,272	0,211	0,265
0,75	0,129	0,269	0,140	0,265
0,79	0,062	0,261	0,068	0,259
0,83	0,063	0,248	0,067	0,250
0,87	0,066	0,235	0,067	0,239
0,91	0,087	0,237	0,088	0,237
0,94	0,107	0,239	0,110	0,237
0,98	0,103	0,237	0,106	0,235
1,02	0,100	0,237	0,103	0,235
1,06	0,096	0,235	0,099	0,235
1,10	0,093	0,235	0,096	0,233
1,14	0,091	0,224	0,096	0,220
1,18	0,091	0,218	0,096	0,215

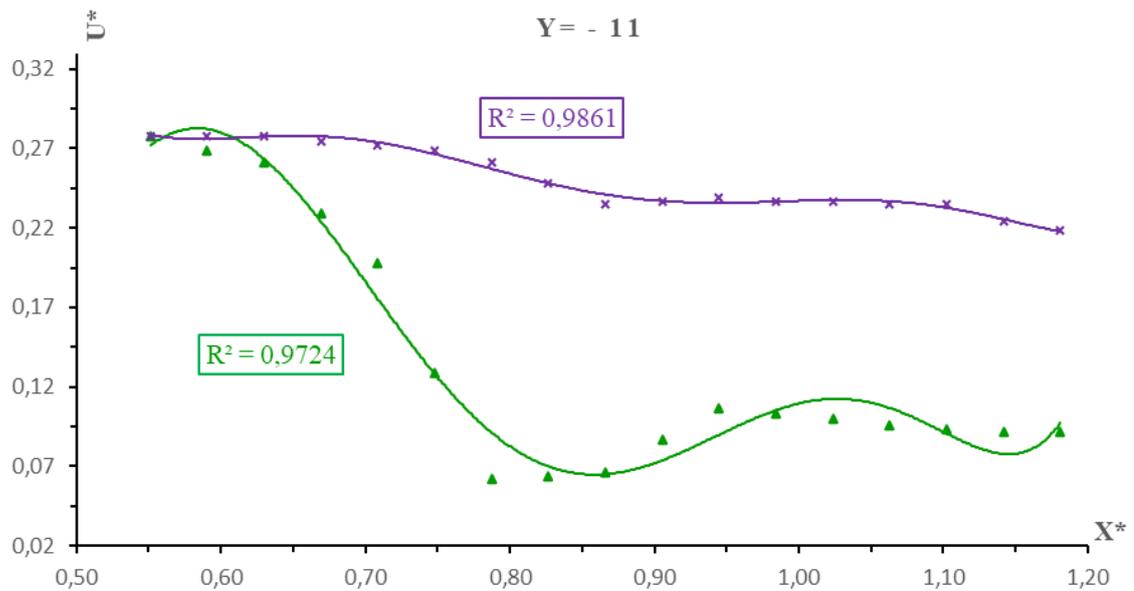


Figure 5.27 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = -11$ cm.

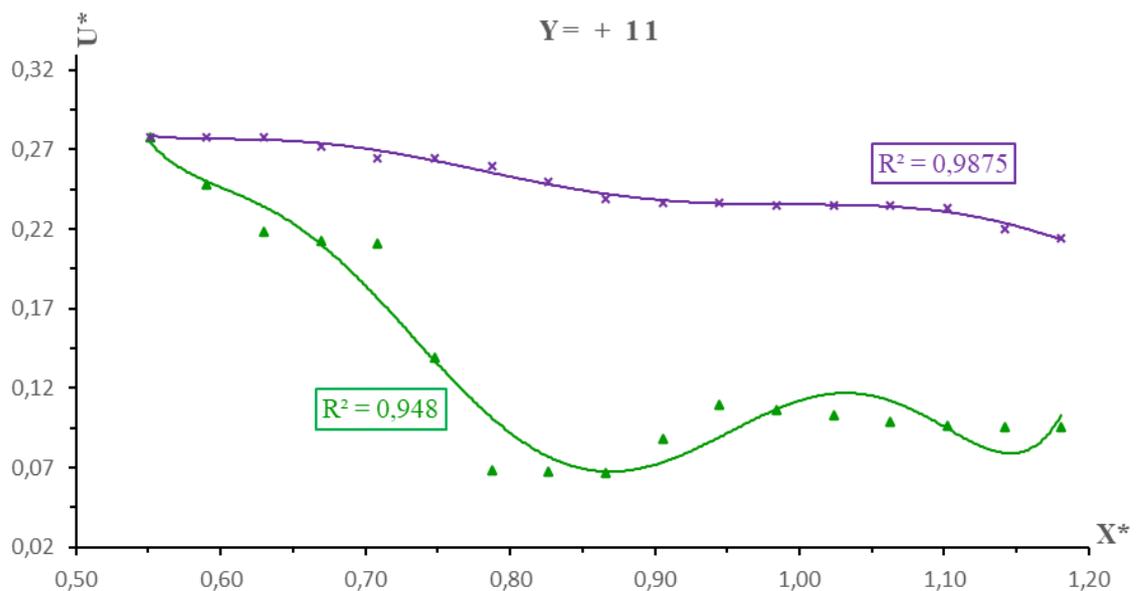


Figure 5.28 : Variation de la vitesse relative $U^*=f(X^*)$ pour la section longitudinale $Y = +11$ cm.

Ces graphiques (Fig 5.22 à 5.28), issus de la seconde série d'essais, ont réaffirmé l'établissement de la relation entre les vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*) par une fonction polynomiale. Cette relation présente des coefficients de détermination (R^2) significativement élevés, se situant entre **0,72** et **0,99**. Ces résultats de R^2 attestent la qualité de l'ajustement de la fonction polynomiale aux données expérimentales, spécifiquement pour notre configuration du ressaut forcé de type "A". Cela met en lumière la robustesse et la précision de la relation existante entre les vitesses relatives et les positions relatives dans cette dernière série d'essais.

V.4 DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats présentés sur les sections longitudinales, représentant les vitesses relatives (U^*) en fonction des positions relatives (X^*), démontrent deux régions distinctes de distribution des vitesses. La première région, observée pour les deux types de ressaut réalisés, s'étend du pied du ressaut jusqu'à la position relative $X^* = 0,5$ (correspondant à $X = 50\%$ de la longueur du ressaut L_J), où les vitesses relatives (U^*) de l'écoulement (pour tous les plans Z_1, Z_2, Z_3, Z_4) enregistrent des valeurs maximales $U^* > 0,33$ (représentant 33% de la vitesse initiale U_1) par rapport aux vitesses relatives enregistrées en dehors de cette région. Cette intensité des vitesses dans cette région est attribuable à l'effet du jet de grande vitesse sortant du convergent, où l'appareil ne peut pas mesurer les vitesses.

Les vitesses élevées observées dans la partie amont du ressaut hydraulique induisent une perturbation significative de l'écoulement, comme souligné par Wang and Chanson, (2015). Cette perturbation est dû à l'intensité élevée des turbulences qui se manifestent particulièrement près de début du ressaut hydraulique, décroissant en s'éloignant vers le seuil. Ces turbulences jouent un rôle crucial dans la génération de rouleau et la formation de bulles d'air de différentes tailles. Chanson, (2009) a également signalé, dans ses recherches, que les ressauts hydrauliques se caractérisent par des turbulences à grande échelle, entraînant des bulles d'air et un taux de dissipation d'énergie élevé.

Au-delà de cette position ($X^* = 0,5$) et en se rapprochant du seuil, les vitesses relatives sur tous les plans de l'écoulement décroissent progressivement, présentant certaines agitations sur les plans internes (Z_2, Z_3), jusqu'à atteindre environ $U^* = 0,02$ (correspondant à 2% de U_1).

La variation des vitesses relatives U^* à la surface de l'écoulement (plan Z_4) présente une tendance décroissante à partir de la position relative $X^* = 0,5$ (50% de L_J), où elles atteignent des valeurs maximales $U^* = 0,33$ (33% de U_1). Cette diminution se poursuit jusqu'à $U^* = 0,15$ (15% de U_1) près du seuil, pouvant même descendre en dessous de $U^* = 0,05$ (5% de U_1).

Dans la dernière séquence de notre ressaut, à environ $X^* > 0,8$ (80% de L_J), la vitesse au fond de l'écoulement atteint son minimum, pouvant enregistrer moins de $U^* = 0,011$ (représentant 1% de U_1). Pendant ce temps, la vitesse à la surface de l'écoulement reste toujours plus élevée que celle observée au fond, avec $U^* = 0,05$ (5% de U_1). Cette diminution des vitesses dans l'écoulement aval conduit à la fin du rouleau, marquée par la disparition des bulles d'air et la diminution des vagues d'eau, rendant l'écoulement stable, voire presque uniforme. Cette

stabilité nous permet d'observer continuellement pour déterminer la hauteur finale de l'écoulement (H_2), à partir de laquelle nous pouvons conclure sur la longueur approximative du ressaut (L_J).

Les courbes représentant la section médiane de l'écoulement ($Y = 0$ cm) révèlent que les vitesses à la surface, en particulier dans cette section, atteignent leur maximum, parfois dépassant $U^* = 0.33$ (33% de U_1) dans la position longitudinale $0.5 < X^* < 0.6$ (correspondant à une position entre 50% et 60% de L_J). D'autre part, les courbes représentant la variation des vitesses aux sections ($Y = -4$ cm et $Y = +4$ cm) mettent en évidence une symétrie approximative dans la distribution générale des vitesses. Cette symétrie entre les axes se maintient tout au long du canal, avec une légère diminution des valeurs des vitesses par rapport à la section médiane de l'écoulement. Les figures illustrant la distribution des vitesses sur les côtés du canal, aux sections $Y = -8$ cm et $Y = +8$ cm, nous permettent de constater que les vitesses sont légèrement inférieures à celles observées au centre du canal.

Dans la zone centrale de l'écoulement, la vitesse moyenne, la fluctuation de vitesse et l'intensité de la turbulence affichent toutes des valeurs relativement élevées. En outre, ces paramètres présentent une décroissance notable en s'approchant des parois latérales. Ces observations revêtent une importance cruciale pour la compréhension des mécanismes générateurs de turbulences, des processus de transport de sédiments, ainsi que des mécanismes d'érosion des berges. Ces conclusions, en cohérence avec les travaux antérieurs de Bhowmik et al., (1995), renforcent la pertinence de nos résultats dans le cadre de la recherche en hydraulique.

Les courbes représentant les sections longitudinales situées dans la partie trapézoïdale du canal ($Y = -10$ cm, $+10$ cm, ou -11 cm et $+11$ cm) sur les deux couches superficielles de l'écoulement (Plans Z_3 et Z_4) mettent en évidence une similitude remarquable entre elles au sein d'une même expérience. Elles révèlent une variation de vitesse similaire le long du canal, avec des vitesses maximales observées au pied du ressaut, suivies d'une diminution en se dirigeant vers le seuil. Ces courbes présentent également des vitesses relativement plus faibles que celles observées dans d'autres sections aux mêmes plans Z_3 et Z_4 . Cette diminution de vitesse peut être attribuée à l'effet du frottement des parois du canal, étant donné que la distance entre les parois et ces deux axes est très proche (2.5 cm).

La distribution équitable du débit entre le lit mineur (de forme rectangulaire) et le lit majeur (de forme trapézoïdale) dans le contexte spécifique de notre canal composé se réalise simultanément à la formation du rouleau. Chaque augmentation du débit conduit à la

construction d'un rouleau étendu. Bousmar et al., (2005) ont observé que, pour parvenir à un équilibre dans la répartition du débit entre les sous-sections du lit mineur et du lit majeur, une distance accrue est nécessaire.

V.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons entrepris l'exploration et l'évaluation de la corrélation entre les vitesses et les distances en utilisant des valeurs adimensionnelles (U^* et X^*) déduites des mesures expérimentales précédemment exposées dans le chapitre 4. Notre analyse s'est focalisée sur deux configurations distinctes d'un canal composé caractérisé par une section trapézoïdale à base rectangulaire : le ressaut contrôlé par un seuil mince et le ressaut forcé de type "A", gouverné par deux seuils minces.

Suite à la représentation graphique des vitesses relatives en fonction des positions relatives, nous avons réalisé une analyse statistique à l'aide de la méthode des moindres carrés, obtenant des coefficients de détermination R^2 très élevés, oscillant entre 0.73 et 0.98, à l'exception de quelques sections enregistrant des valeurs faibles, attribuables à une turbulence significative, particulièrement dans le ressaut forcé de type "A". Ces résultats de R^2 certifient de la qualité remarquable de l'ajustement de la fonction polynomiale aux données expérimentales, spécifiquement dans le cadre de nos configurations du ressaut contrôlé et forcé de type "A". Ces constatations mettent en évidence la robustesse et la précision inhérentes à la relation établie entre les vitesses relatives et les positions relatives au sein de cette série d'essais.

L'évaluation de la relation entre ces deux paramètres adimensionnels nous a permis d'attribuer une utilisation universelle aux valeurs des vitesses, mesurées expérimentalement. Cela a permis de déterminer les vitesses en fonction de leurs positions, en se référant aux pourcentages présentés dans cette étude, qui sont liés aux valeurs de la vitesse initiale et à la longueur du ressaut. Cette approche est applicable indépendamment des caractéristiques hydrauliques et géométriques spécifiques du ressaut considéré (Q , U_1 , H_1 , H_S , L_S , L_R , L_J ...etc.), qu'il s'agisse d'un ressaut contrôlé ou forcé dans un canal composé de la même forme de section que celle utilisée dans notre étude.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La présente étude constitue une contribution particulièrement pertinente dans le contexte plus vaste de la recherche sur la distribution des vitesses dans les écoulements fluviaux ainsi que dans les canaux composés. Elle représente également une source d'information pour la conception et la stabilisation des canaux, la gestion des crues et les projets d'aménagement hydraulique.

La thèse se focalise sur une étude théorique et expérimentale de la distribution des vitesses moyennes horizontales dans deux types de ressauts hydrauliques, à savoir le ressaut contrôlé par seuil mince et le ressaut forcé de type "A" également par seuils minces, évoluant dans un canal composé de forme trapézoïdale (lit majeur) à base rectangulaire (lit mineur) et de pente nulle. Ce travail est répartie en cinq chapitres le premier et le deuxième sont dédiés pour une recherche bibliographique explorant les types de ressauts hydrauliques utilisés dans cette étude, le troisième chapitre est consacré à la description et l'illustration des méthodes et matériels utilisés dans notre expérimentation, le quatrième chapitre se concentre sur la présentation et l'analyse des résultats obtenues, quant au cinquième et dernier chapitre nous avons entrepris l'évaluation d'une relation fonctionnelle adimensionnelle entre les vitesses relatives et les positions relatives.

Notre étude cherche à enrichir la compréhension et l'exploration expérimentale de la distribution des vitesses au sein des deux types de ressaut hydraulique mentionnés préalablement dans notre canal composé. Le but principal est d'évaluer la relation entre la distribution des vitesses relatives (adimensionnelles) ($U^* = U_i/U_1$) et les positions relatives ($X^* = X/L_j$), afin d'établir une relation fonctionnelle ($U^* = f(X^*)$) en utilisant la méthode statistique des moindres carrés. Ces caractéristiques (U^* et X^*) sont exprimées sous forme de rapports adimensionnels, favorisant une application universelle et une meilleure applicabilité dans le domaine pratique.

A cet effet, nous avons utilisé un modèle expérimental constituant le canal de forme composée, fabriqué en plexiglas (PMMA) et lié à un système d'alimentation en eau en circuit fermé. En présentant aussi, les éléments essentiels pour déclencher notre phénomène hydraulique (le ressaut) incluent le convergent, qui nous fournit la hauteur initiale H_1 , les seuils à parois minces et le déversoir rectangulaire pour calculer le débit.

Enfin, l'instrument principal de mesure de la vitesse est le micro-moulinet monté sur un chariot roulant sur notre canal assurant la couverture du maillage planifié pour les mesures des vitesses ponctuelles dans nos configurations des ressauts.

Dans la première partie de notre étude expérimentale qui se résume dans le quatrième chapitre, le premier volet de ce chapitre se concentre sur le ressaut contrôlé à paroi mince. Les résultats présentés sur des sections longitudinales des vitesses moyennes horizontales (U) en fonction de la position (X) révèlent deux régions distinctes ; la première région montre des vitesses au fond du canal près du convergent plus élevées que celles en surface en raison de l'effet du jet sortant du convergent ($U \gg 150$ cm/s), cette région s'étend jusqu'à $X = 120$ cm. La deuxième région, débutant à cette position, démontre que les vitesses en surface dépassent celles du fond. Toutes les vitesses (de fond et de surface) décroissent vers l'aval. La perspective transversale confirme que la vitesse au centre atteint sa valeur maximale et diminue en s'éloignant de l'axe médian de l'écoulement.

Les observations clés incluent la présence d'un jet à haute vitesse dans la zone amont du ressaut, des fluctuations significatives de la vitesse dans la première région du ressaut, une diminution proportionnelle des vitesses au-delà de $x = 130$ cm, une vitesse maximale au centre du canal diminuant vers les parois, des valeurs négatives de vitesse à la surface entre $x = 120$ et 150 cm, une couche semi-uniforme près du seuil, des disparités de vitesse entre les côtés du canal proches du seuil, et une vitesse plus élevée dans la partie rectangulaire du canal, représentant la base du canal composé, par rapport à la partie supérieure représentant la partie trapézoïdale du canal.

L'analyse des résultats du deuxième volet de ce chapitre, portant sur le ressaut forcé de type "A" régié par deux seuils minces, révèle un jet à grande vitesse ($U \gg 150$ cm/s) dans la zone amont, décroissant substantiellement en direction de l'aval. L'analyse transversale confirme que la vitesse atteint sa valeur maximale au centre de l'écoulement ($Y = 0$ cm) et diminue progressivement en s'éloignant de l'axe central en allant vers les parois du canal.

Des vitesses opposées (signes négatifs) sont enregistrées tant en amont qu'en aval du premier seuil, surtout dans la zone de $X = 160$ à 255 cm. Près du premier seuil ($X = 180$ cm), cette perturbation de la direction de l'écoulement est attribuable à la grande turbulence générée par le jet d'eau sortant du convergent. Les deux ensembles d'expériences présentent des similitudes notables dans la distribution des vitesses le long de l'écoulement du ressaut contrôlé, mais la deuxième expérience, avec son débit plus élevé, affiche une turbulence encore plus prononcée.

Ces observations soulignent la complexité et la dynamique spécifiques du ressaut forcé de type "A" dans notre configuration expérimentale. En outre, le ressaut forcé de type "A", défini par la présence de deux seuils minces, dévoile une turbulence plus accentuée dans l'ensemble des sections longitudinales et transversales, comparativement au ressaut contrôlé.

Dans la deuxième partie de notre étude expérimentale et le cinquième chapitre, nous avons entrepris l'exploration et l'évaluation de la corrélation entre les vitesses et les distances en utilisant des valeurs adimensionnelles (U^* et X^*) déduites des mesures expérimentales précédemment exposées dans le chapitre 4. Suite à la représentation graphique des vitesses relatives en fonction des positions relatives, nous avons réalisé une analyse statistique à l'aide de la méthode des moindres carrés, obtenant des coefficients de détermination R^2 très élevés, oscillant entre 0.73 et 0.98, à l'exception de quelques sections enregistrant des valeurs faibles, attribuables à une turbulence significative, particulièrement dans le ressaut forcé de type "A". Ces résultats de R^2 certifient de la qualité remarquable de l'ajustement de la fonction polynomiale de deuxièmes degrés ou parfois troisième degré aux données expérimentales, spécifiquement dans le cadre de nos configurations du ressaut contrôlé et forcé de type "A". Ces constatations mettent en évidence la robustesse et la précision inhérentes à la relation établie entre les vitesses relatives et les positions relatives au sein de ces séries d'essais.

La robustesse de la relation entre ces deux paramètres adimensionnels nous a permis d'attribuer une utilisation universelle de ces rapports des vitesses relatives (U^*) et les positions relatives (X^*). Cela permettra de déterminer les vitesses en fonction de leurs positions, en se référant aux pourcentages présentés dans cette étude, qui sont liés aux valeurs de vitesse initiale et à la longueur du ressaut. Cette approche est applicable indépendamment des caractéristiques hydrauliques et géométriques spécifiques du ressaut considéré ($Q, U_1, H_1, H_s, L_s, L_r, L_j$), qu'il s'agisse d'un ressaut contrôlé ou forcé de type "A" dans un canal composé de la même forme de section que celle utilisée dans notre étude.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achour, B.**, 2000. Hydraulic jump in a suddenly widened circular tunnel. *Journal of Hydraulic Research* 38, 307–311. <https://doi.org/10.1080/00221680009498330>
- Achour, B., Debabèche, M.**, 2003. Control of hydraulic jump by sill in triangular channel. *Journal of Hydraulic Research* 41, 319–325. <https://doi.org/10.1080/00221680309499976>
- Achour, B., Debabeche, M.**, 2003a. Ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en U. *Journal of Hydraulic Research* 41, 97–103. <https://doi.org/10.1080/00221680309499933>
- Bakhmeteff, B.A., Matzke, A.E.**, 1936. The Hydraulic Jump in Terms of Dynamic Similarity. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 101, 630–647. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0004708>
- Benabdesselam, A., Houichi, L., Achour, B.**, 2022. GRNN-based models for hydraulic jumps in a straight rectangular compound channel. *Model. Earth Syst. Environ.* 8, 1787–1798. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01186-5>
- Bhowmik, N.G., Mazumder, B.S., Xia, R., Soong, T.W.**, 1995. Distribution of turbulent velocity fluctuations in a natural river. *Journal of Hydraulic Research* 33, 649–661. <https://doi.org/10.1080/00221689509498562>
- Bousmar, D., Rivière, N., Proust, S., Paquier, A., Morel, R., Zech, Y.**, 2005. Upstream Discharge Distribution in Compound-Channel Flumes. *Journal of Hydraulic Engineering* 131, 408–412. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:5\(408\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:5(408))
- Bousmar, D., Wilkin, N., Jacquemart, J.-H., Zech, Y.**, 2004. Overbank Flow in Symmetrically Narrowing Floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering* 130, 305–312. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:4\(305\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:4(305))
- Chanson, H.**, 2009. Development of the Bélanger Equation and Backwater Equation by Jean-Baptiste Bélanger (1828). *Journal of Hydraulic Engineering* 135, 159–163. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2009\)135:3\(159\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:3(159))
- Chen, J.G., Zhang, J.M., Xu, W.L., Peng, Y.**, 2014. Characteristics of the Velocity Distribution in a Hydraulic Jump Stilling Basin with Five Parallel Offset Jets in a Twin-Layer Configuration. *Journal of Hydraulic Engineering* 140, 208–217. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000817](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000817)
- Debabeche, M.**, 1996. Contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire (PhD Thesis). Thèse de Magistère, Université de Biskra.
- Debabeche, M.**, 2003. Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques, Doctorat d'état, Département d'Hydraulique, Université de Biskra.
- Debabeche, M.**, (2008), Les écoulements brusquement variés, cours de 1ère année magister, polycopié, Université de Biskra. Debabeche, M.

- Forster, J.W., Skrinde, R.A.**, 1950. Closure to “Forster and Skrinde on Hydraulic Jump.” Transactions of the American Society of Civil Engineers 115, 1007–1022. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006340>
- Görtler, H.**, 1954. On the Three-dimensional Instability of Laminar Boundary Layers on Concave Walls. National Advisory Committee for Aeronautics.
- Hachemi Rachedi, L.**, 2006. Analyse d’un écoulement au travers d’une contraction laterale (masters). Université Mohamed Khider - Biskra.
- Hager, W.H.**, 1987. Lateral Outflow Over Side Weirs. Journal of Hydraulic Engineering 113, 491–504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:4\(491\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:4(491))
- Hager, W.H.**, 1989. Hydraulic Jump in U-Shaped Channel. Journal of Hydraulic Engineering 115, 667–675. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1989\)115:5\(667\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:5(667))
- Hager, W.H.**, 1992. Classical Hydraulic Jump, in: Hager, W.H. (Ed.), Energy Dissipators and Hydraulic Jump, Water Science and Technology Library. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 5–40. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8048-9_2
- Hager, W.H.**, 2013. Energy Dissipators and Hydraulic Jump. Springer Science & Business Media.
- Hager, W.H., Bremen, R., Kawagoshi, N.**, 1990. Classical hydraulic jump: length of roller. Journal of Hydraulic Research 28, 591–608. <https://doi.org/10.1080/00221689009499048>
- Hager, W.H., Li, D.**, 1992. Sill-controlled energy dissipator. Journal of Hydraulic Research 30, 165–181. <https://doi.org/10.1080/00221689209498932>
- Hager, W.H., Sinniger, R.**, 1985. Flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise. Journal of Hydraulic Research 23, 101–113. <https://doi.org/10.1080/00221688509499359>
- Houichi, L., Dechemi, N., Heddami, S., Achour, B.**, 2012. An evaluation of ANN methods for estimating the lengths of hydraulic jumps in U-shaped channel. Journal of Hydroinformatics 15, 147–154. <https://doi.org/10.2166/hydro.2012.138>
- Huang, B.-S., Lai, G.-W., Qiu, J., Lin, S.-Z.**, 2002. Hydraulics of compound channel with vegetated floodplains. Journal of Hydrodynamics, Ser. B 14, 23–28.
- Khattaoui, M., Achour, B.**, 2012. Ressaut hydraulique en lit composé (hydraulic jump in compound channel), cited in symmetric compound channels. Journal of Hydrodynamics, Series B 17, 295–300.
- Law, A.W.-K., Herlina, N.**, 2002. An Experimental Study on Turbulent Circular Wall Jets. Journal of Hydraulic Engineering 128, 161–174. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:2\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:2(161))
- Leutheusser, H.J., Kartha, V.C.**, 1972. Effects of Inflow Condition on Hydraulic Jump. Journal of the Hydraulics Division 98, 1367–1385. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003371>

- LI, B., HU, X., XU, L.,** 2005. Review of research work of overbank distribution of flow velocity in compound channel. *Journal of Waterway and Harbour* 26, 228–232.
- Maatooq, J., Taleb, E.,** 2018. The Effects of Baffle Blocks Locations and Blockage Ratio on the Sequent Depth and Velocity Distribution of Forced Hydraulic Jump. *International Symposium on Hydraulic Structures*.
- Parsaie, A., Haghiabi, A.H., Saneie, M., Torabi, H.,** 2016. Prediction of energy dissipation on the stepped spillway using the multivariate adaptive regression splines. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 22, 281–292. <https://doi.org/10.1080/09715010.2016.1201782>
- Peltier, Y., Proust, S., Riviere, N., Paquier, A., Shiono, K.,** 2013. Turbulent flows in straight compound open-channel with a transverse embankment on the floodplain. *Journal of Hydraulic Research* 51, 446–458. <https://doi.org/10.1080/00221686.2013.796499>
- Proust, S., Bousmar, D., Rivière, N., Paquier, A., Zech, Y.,** 2010. Energy losses in compound open channels. *Advances in Water Resources* 33, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.10.003>
- Proust, S., Rivière, N., Bousmar, D., Paquier, A., Zech, Y., Morel, R.,** 2006. Flow in Compound Channel with Abrupt Floodplain Contraction. *Journal of Hydraulic Engineering* 132, 958–970. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:9\(958\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:9(958))
- Rajaratnam, N.,** 1962. An experimental study of air entrainment characteristics of the hydraulic jump. *J Inst Eng India* 42, 247–273.
- Rajaratnam, N.,** 1965. The Hydraulic Jump as a Well Jet. *Journal of the Hydraulics Division* 91, 107–132. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001299>
- Rajaratnam, N., Muralidhar, D.,** 1971. Pressure And Velocity Distribution For Sharp-Crested Weirs. *Journal of Hydraulic Research*. <https://doi.org/10.1080/00221687109500348>
- Rajaratnam, N., Subramanya, K.,** 1968. Hydraulic Jumps Below Abrupt Symmetrical Expansions. *Journal of the Hydraulics Division* 94, 481–504. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001780>
- Rand, W.,** 1957. Section of Mathematics and Engineering: An Approach to Generalized Design of Stilling Basins. *Transactions of the New York Academy of Sciences* 20, 173–191. <https://doi.org/10.1111/j.2164-0947.1957.tb01666.x>
- Rand, W.,** 1965. Flow Over a Vertical Sill in an Open Channel. *Journal of the Hydraulics Division* 91, 97–121. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001297>
- Riguet, F.,** 2021. Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée (PhD Thesis). *Faculté des Sciences et de la technologie*.
- Rouse, H., Siao, T.T., Nagaratnam, S.,** 1959. Turbulence Characteristics of the Hydraulic Jump. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 124, 926–950. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007738>

- Saghebian, S.M.**, 2018. Predicting the relative energy dissipation of hydraulic jump in rough and smooth bed compound channels using SVM. *Water Supply* 19, 1110–1119. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.162>
- Schröder, R.**, 1963. The turbulent flow in the free hydraulic jump (PhD Thesis). Habilitationsschrift, 59, Institute of Hydraulic Engineering and Water
- Shiono, K., Knight, D.W.**, 1991. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics* 222, 617–646. <https://doi.org/10.1017/S0022112091001246>
- Tominaga, A., Nezu, I.**, 1991. Turbulent Structure in Compound Open-Channel Flows. *Journal of Hydraulic Engineering* 117, 21–41. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:1\(21\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:1(21))
- Wang, H., Chanson, H.**, 2015. Experimental Study of Turbulent Fluctuations in Hydraulic Jumps. *Journal of Hydraulic Engineering* 141, 04015010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001010](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001010)
- Wang, H., Zheng, X., Wüthrich, D., Bai, R., Liu, S.**, 2023. Air entrainment and free-surface fluctuations in A-type hydraulic jumps with an abrupt drop. *Journal of Hydraulic Research* 61, 720–734. <https://doi.org/10.1080/00221686.2023.2239193>
- Wang, W., Cai, J., Xu, W.**, 1998. Discharge distribution in straight compound channels. *Journal of Hydrodynamics* 10, 31–36.
- Yang, K.-J., Cao, S.-Y., Liu, X.-N.**, 2005. Research on system dynamics model of conveyance capacity in symmetric compound channels. *Journal of Hydrodynamics, Series B* 17, 295–300.