

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

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



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

Mémoire de Master

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Thème

**Distribution des vitesses dans un ressaut
hydraulique contrôlé en canal composé**

Nom et Prénom de l'étudiant :
Ben Salem Dhirar

Encadreur : M. Bouriche Fouzi

Année universitaire : 2019 - 2020

Remerciements

Avant tout, je remercie *DIEU* qui a illuminé mon chemin et qui m'a armé courage pour achever mes études.

Pour ce travail, j'ai bénéficié des orientations, encouragements et précieux conseils de mon encadreur, Mr. Bouriche Fouzi, Enseignant à l'Université de Biskra que je remercie vivement et auquel j'exprime ma profonde reconnaissance pour l'aide scientifique et morale qu'il n'a cessé de me donner.

Je présente mes remerciements aux membres de jury de bien vouloir accepter d'évaluer mon travail. Je dois présenter mes remerciements au chef du département de génie civil et d'hydraulique.

Je remercie vivement tous les enseignants de notre département d'hydraulique et un merci spécial au Professeur MT. Bouziane.

Dédicace

MA DARONNE

Résumé

L'étude proposée a pour but d'analyser théoriquement et expérimentalement le comportement des vitesses horizontales dans un ressaut hydraulique contrôlé par seuil à parois mince évoluant dans un canal trapézoïdal à base rectangulaire. L'expérimentation a été réalisée dans un modèle réduit physique, conçu au laboratoire d'hydraulique de l'Université de Biskra.

Nous avons présenté et analysé nos résultats bruts de la distribution des vitesses longitudinales et transversales afin de connaître le comportement de notre configuration du ressaut. Nos résultats ont été utilisés pour montrer la relation relative entre les vitesses de fond et de surface de l'écoulement dans le ressaut (V_f/V_1 et V_s/V_1) et le rapport de position relative (x/L_j).

Mots clés : Ressaut contrôlé, Canal composé, Seuil mince, Vitesse relative de fond, Vitesse relative de surface.

ملخص

الهدف من الدراسة المقترحة هو التحليل النظري والتجريبي لسلوك السرعات الأفقية في القفزة الهيدروليكية التي يتم التحكم فيها بواسطة عتبة ذات جدار رقيق تتطور في قناة شبه منحرفة بقاعدة مستطيلة، وأجريت التجارب في نموذج فيزيائي صمم في مختبر الري بجامعة بسكرة.

كنا قد عرضنا وحللنا النتائج الأولية لتوزيع السرعات طوليا وعرضيا من أجل معرفة سلوك القفزة الهيدروليكية. تم استخدام هذه النتائج لإظهار العلاقة النسبية بين السرعات عند أسفل و سطح التدفق في القناة ($V_f/V_1, V_s/V_1$) والموضع النسبي (x/L_j).

الكلمات المفتاحية : القفزة المائية، قناة مركبة، عتبة رقيقة، السرعة النسبية السفلية، السرعة النسبية السطحية.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	I
----------------------------	---

CHAPITRE I

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS LES DIFFERENTS CANAUX

I.1	INTRODUCTION.....	1
I.2	RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE.....	2
I.2.1	Ressaut hydraulique classique.....	2
I.2.2	Ressaut hydraulique contrôlée par seuil continu à paroi mince.....	10
I.3	RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOÏDAL.....	12
I.3.1	Approche de Wanoschek et Hager (1989).....	12
I.3.2	Présentations des essais.....	14
I.3.3	Caractéristiques de l'écoulement.....	14
I.3.4	Rapport des hauteurs conjuguées.....	15
I.3.5	Rouleau de fond.....	16
I.3.6	Longueur de ressaut.....	17
I.4	RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL COMPOSE.....	18
I.4.1	Caractéristique de l'écoulement en lit composé.....	18
I.4.2	L'avantage des canaux de type composé.....	19
I.4.3	Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé.....	21
I.4.4	Rendement du ressaut.....	24
I.5	CONCLUSION.....	25

CHAPITRE II

DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

II.1	INTRODUCTION.....	27
II.2	RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE.....	27
II.2.1	Distribution des vitesses dans la partie inférieure du ressaut.....	28
II.2.2	Etude de Hager (1992).....	29
II.3	RESSAUT HYDRAULIQUE AVEC CINQ JETS DE DECALAGE PARALLELE.....	34
II.3.1	Configuration et description de l'expérience.....	34
II.3.2	Distribution de vitesse sur des plans horizontaux.....	36
II.4	RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE PROFILE EN 'U'.....	41
II.5	RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE DANS UN CANAL TRIANGULAIRE.....	43

II.5.1	Etude de Debabeche (1996).....	43
II.6	DOMAINE DES CANAUX COMPOSE	46
II.7	CONCLUSION.....	46

CHAPITRE III

DESCRIPTION DU MODEL

III.1	INTRODUCTION.....	47
III.2	DESCRIPTION DU CANAL	47
III.3	APPAREILLAGES DE MESURE.....	49
III.3.1	Limnimètre	49
III.3.2	Mesure du débit	49
III.3.3	Mesure de vitesse	51
III.4	PROTOCOLE DES ESSAIS	52
III.4.1	Opération de mesure de la vitesse	52
III.5	SEUILS	53
III.6	CONCLUSION.....	53

CHAPITRE IV

ETUDE EXPERIMENTALE

IV.1	INTRODUCTION.....	54
IV.2	DESCRIPTION DES ESSAIS	54
IV.3	RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	56
IV.3.1	Première expérience	56
IV.3.2	Deuxième expérience	70
IV.3.3	Récapitulation.....	76
IV.4	LA RELATION ENTRE LES VITESSES MOYENNES ET LA POSITION RELATIVE X/L_j	77
IV.4.1	Première expérience	78
A.	Les vitesses dans le centre du canal.....	78
B.	Les vitesses dans les côtés du canal.....	80
IV.4.2	Deuxième expérience	82
A.	Les vitesses dans le centre du canal.....	82
B.	Les vitesses dans les côtés du canal.....	84
IV.5	CONCLUSION.....	86
CONCLUSION GENERALE		87

{ INTRODUCTION GENERAL }

INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine des constructions hydrauliques, tels que les barrages sont souvent soumis à des fortes crues, qu'il est nécessaire d'évacuer pour la sécurité de l'ouvrage. En effet, l'écoulement torrentiel provenant de l'évacuateur de crue du barrage est caractérisé par des forces tractrices présentent un caractère érosif.

A cet effet, le barrage est doté d'un dissipateur de charge hydraulique, nécessaire pour dissiper l'énergie de l'écoulement d'eau provenant du barrage afin de la restituer en régime fluvial vers la rivière. Selon la bibliographie le moyen le moins onéreux et le plus pratique est certainement le ressaut hydraulique qu'est la conséquence du passage de l'écoulement d'un régime torrentiel vers un régime fluvial. Donc le ressaut hydraulique est l'un des phénomènes les plus complexes en hydraulique à surface libre, on trouve son application dans plusieurs domaines tels que les canaux d'irrigation.

Les premières expériences étaient dans le domaine du ressaut hydraulique ont été dirigées par Leonardo de Vinci (1452-1519) et Bidone (1781-1839). Plus tard, Bélanger (1928) a, pour la première fois, présenté une expression mathématique au rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.

En 1927, Safranez a, quant à lui, fait l'étude expérimentale systématique sur le ressaut hydraulique classique. Plus tard, Bakhmeteff et Matzake (1936) ont effectué des expériences sur les pentes très faibles et ont proposé les dimensions du profil de surface extérieur ; ils ont présenté des données expérimentales pour le rapport des profondeurs conjuguées et la longueur du ressaut dans un canal rectangulaire. Dans le même ordre, Moore (1957) a étudié la formation du ressaut à la base des chutes d'eau. Enfin Posey et Hsing (1938) ont étudié le ressaut hydraulique dans le canal trapézoïdal.

Notre étude porte le ressaut hydraulique évoluant dans un canal composé, ce dernier type de canaux n'a pas fait l'objet de beaucoup recherches. Les travaux les plus intéressants sur le ressaut hydraulique dans ce type de canaux sont ceux effectués par Khattaoui et Achour (2012). De plus, les recherches expérimentales dans le domaine de la distribution des vitesses sur ce type de canal ouvert sont rares, mais il y a quelques travaux expérimentaux dans d'autres types de canaux que nous présenterons dans cette étude.

Le but principal de notre étude expérimentale est la mesure des vitesses horizontales et montrer leurs comportement dans le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal composé trapézoïdal à base rectangulaire. Notre présent mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre de l'étude bibliographique est divisé à trois volets ; dans le premier volet nous allons donner un bref aperçu sur le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, nous étudierons la classification effectuée par Bradley et Peterka (1957), ainsi que nous citerons les travaux de Hager et sinniger (1986), Hager et al (1990), et ceux de Bretz (1988). Le deuxième volet sera consacré aux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal, à savoir, ceux de Wanoschek et Hager (1989). Le troisième et dernier volet, nous allons donner une aperçus générales sur les caractéristiques de l'écoulement qui distinguent de canal de forme rectangulaire composée, après nous allons citer les travaux de Khattaoui et Achour (2012) concernant le ressaut hydraulique dans un lit composé.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude bibliographique sur la distribution des vitesses dans quelque type de canaux. Notre attention sera portée sur les travaux de Rajaratnam et Subramanya (1968, 1970), Hager (1992), Chen et al (2014), Debabeche (1996), et Debabeche (2003).

Le troisième chapitre sera consacré pour décrire la méthode et le matériel utilisé dans notre expérimentations, nous allons donner une description détaillée au model expérimental utilisé pour entamer l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal prismatique de forme trapézoïdal à base rectangulaire. En outre, a l'illustration du mode opératoire.

Le quatrième chapitre a pour but d'étudier expérimentalement la distribution des vitesses dans le ressaut hydraulique. Ce travail a été divisé en deux parties, la première partie dans laquelle nous présentons les résultats des mesures dans les sections transversales et longitudinales, tandis que la deuxième partie présente les résultats obtenus en cherchant une relation entre les vitesses relatives et la position relative sur les deux couches de vitesses de fond et superficielle de notre écoulement. L'expérimentation a été réalisée dans un modèle réduit physique, conçu au laboratoire d'hydraulique de l'Université de Biskra.

CHAPITRE I

Ressaut hydraulique dans les différents canaux

Chapitre I

Ressaut hydraulique dans différents canaux

I.1 Introduction

Ce premier chapitre a pour but de définir et présenter les travaux les plus intéressants entrepris sur le ressaut hydraulique évoluant dans les différents canaux de section droite rectangulaire, trapézoïdale et composé.

Deux types de ressaut en canal rectangulaire, seront alors examinés, le ressaut hydraulique classique, où nous citerons essentiellement les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince, où il sera question des travaux de Forster et Skrinde (1950) demeurant toujours en vigueur et aussi les travaux de Achour, Sedira et Debabeche (2002).

Pour un canal trapézoïdal nous citerons particulièrement ceux effectués Wanoschek et Hager (1989), ces derniers ont analysé les différents paramètres hydrauliques caractérisant le ressaut hydraulique classique. Ils ont décrit d'une manière détaillée le comportement du ressaut, nous allons aborder à travers leurs travaux de paramètre et caractéristique du ressaut; ce paramètre est le rapport des hauteurs conjuguées Y , obtenu par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut.

Un canal composé est un canal à deux étages constitués d'un lit mineur et un lit majeur. Ce type de canal est notamment observable en rivière mais aussi dans les réseaux d'assainissement où le lit majeur prend une forme d'une banquette permettant le passage des agents d'entretien. Les canaux composés sont donc des canaux à géométrie complexe contrairement aux géométries simples tels que des canaux rectangulaires, trapézoïdaux ou encore ovoïdes. L'étude des écoulements uniformes, ou plus encore les écoulements non uniformes en lit composé sont très compliqués à cause du transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur Bousmar et al, (2005). Ces deux phénomènes, se manifestant de différentes façons, sont des sources de dissipation d'énergie supplémentaires de l'écoulement. Donc l'étude sera consacrée aux caractéristiques d'écoulement dans les canaux composés, ainsi que nous allons exposer les travaux effectués par Achour et Khattaoui (2012) sur les caractéristiques du ressaut hydraulique en lit composé.

I.2 Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

I.2.1 Ressaut hydraulique classique

Le ressaut hydraulique est une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement permanent, qui se produit lors du passage du régime torrentielle au régime fluvial.

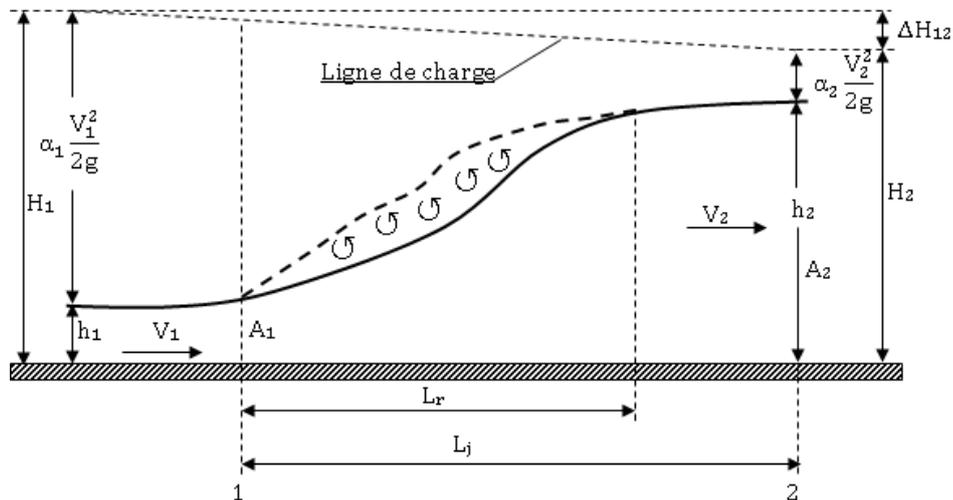


Figure 1.1 : Schématisation d'un ressaut hydraulique

Les hauteurs h_1 et h_2 sont appelées profondeurs conjuguées du ressaut. La distance L_j entre la section 1 et 2 est appelée longueur du ressaut et la distance L_r appelée longueur du rouleau. La perte de charge est représentée par ΔH_{12} .

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ces sections initiales et finales à la charge totale dans sa section initiale.

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un coefficient cinétique (ou nombre de Froude $IF_1 > 1$) et représente la relation entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation des petites perturbations.

I.2.1.1 Typologie du ressaut hydraulique classique

Selon la classification proposée par Bradley et Peterka (1957), le ressaut classique peut se présenter sous quatre configurations distinctes. Cette classification se base principalement sur la valeur du nombre de Froude IF_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, en excluant les formes obtenues pour $IF_1 < 1,7$. Ces dernières sont décrites par plusieurs auteurs tel que Anderson (1978) et ne répondent pas aux exigences d'un bassin de dissipation d'énergie ; les ressauts correspondants sont dits ondulés présentant tantôt une

surface libre régulièrement perturbée et lisse ($1 < IF_1 < 1,4$), tantôt une surface libre irrégulièrement ondulée ($1,4 < IF_1 < 1,7$) (Figure 1.2.a).

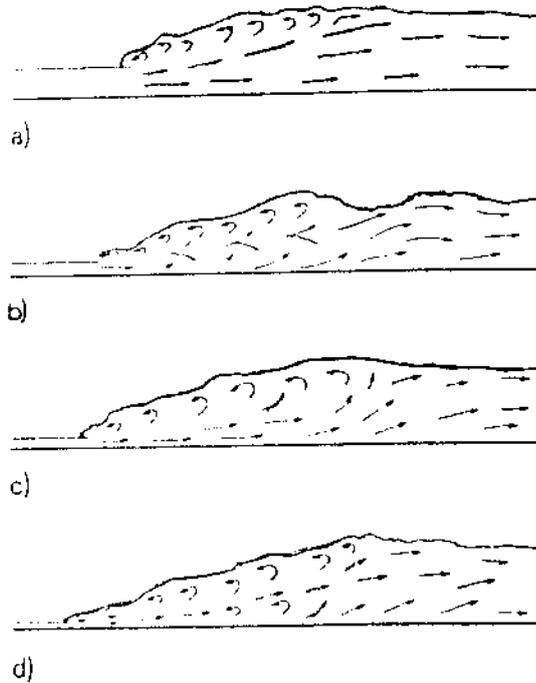


Figure 1.2 : Forme du ressaut classique

a) pré-ressaut, b) ressaut de transition, c) ressaut stable, d) ressaut agité.

Selon la classification de Bradley et Peterka (1957) on distingue quatre configurations de ressaut :

a. Le pré – ressaut : Il est obtenu pour la gamme $1,7 < IF_1 < 2,5$ (Figure 1.1.b). La surface du ressaut est composée d'une série de petits rouleaux pour $IF_1 = 1,7$; ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude IF_1 augmente. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible.

b. Ressaut de transition : Le ressaut de transition est Obtenu pour la gamme $2,5 < IF_1 < 4,5$ (Figure 1.2.c). Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

c. Ressaut stable : Il est Obtenu pour la gamme $4,5 < IF_1 < 9$ (Figure 1.2.d). C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans les bassins de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

d. Ressaut agité ou clapoteux : Obtenu pour $IF_1 > 9$ (Figure 1.2.e). Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très grande. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.

I.2.1.2 Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut

On ne peut pas appliquer le théorème de Bernoulli entre les sections 1 et 2 pour, qui ΔH_{1-2} déterminer les profondeurs conjuguées du ressaut, étant donné que le terme représente la perte de charge, n'est pas connu et que les formules du régime uniforme ne sont pas applicables. C'est le théorème d'Euler qui permet de résoudre ce problème. Considérons un ressaut classique évoluant entre la section initiale et finale respectivement 1 et 2 (figure 1.3)

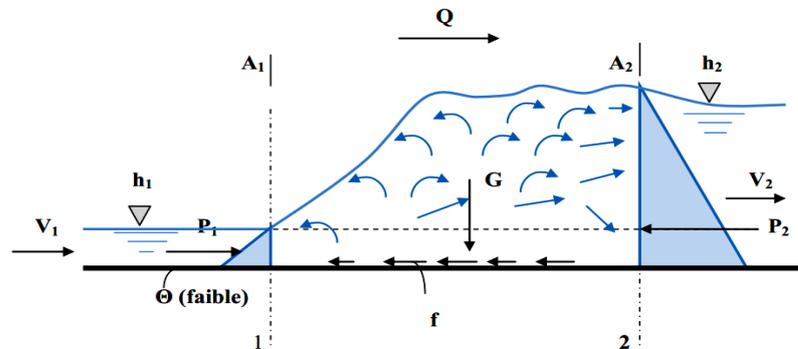


Figure 1.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut

L'équation de continuité permet d'écrire :

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} \quad (1.1)$$

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

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

D'après le résultat classique dû à Bélanger (1828) qui s'obtiendra en appliquant le théorème d'Euler qui ne fait intervenir que les forces extérieures et qui ne met pas en cause les pertes de charges dues à la turbulence et aux remous intérieurs. Donc l'auteur a appliqué ce théorème à la masse liquide contenue entre les sections (A_1) et (A_2) et a supposé:

- la répartition des pressions dans les sections (A_1) et (A_2) est hydrostatique.
- les frottements sur les parois et le fond du canal le long de la faible distance séparant (A_1) et (A_2) sont négligeables par rapport à la perte de charge due à la turbulence créée par le ressaut.

Chapitre I : Ressaut hydraulique dans différents canaux

- les vitesses des différents filets liquides dans chacune des sections (A_1) et (A_2) sont parallèles à la vitesse moyenne V , et considérées uniformes.
- la résistance de l'air est négligeable.

Donc l'application de la deuxième loi de Newton nous donne :

$$\beta_2 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_2 - \beta_1 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_1 = P_1 - P_2 + G \cdot \sin \theta - f \quad (1.3)$$

Où :

β : Facteur de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité puisque la répartition des vitesses est supposée uniforme.

ρ : la masse volumique du liquide en mouvement.

Q : débit volume.

V : vitesse d'écoulement.

g : accélération de la pesanteur.

G : poids de la tranche liquide située entre 1 et 2.

P_1 et P_2 : forces des pressions hydrostatiques.

θ : angle d'inclinaison du canal (pour un ressaut classique $\theta = 0^\circ$)

f : force de frottement (considérée comme négligeable).

En tenant compte de tous ces paramètres la relation (1.3) s'écrit :

$$\frac{1}{2} \bar{\omega} \cdot b \cdot h_1^2 + \rho \cdot Q \cdot V_1 = \frac{1}{2} \bar{\omega} \cdot b \cdot h_2^2 + \rho \cdot Q \cdot V_2 \quad (1.4)$$

Le nombre de Froude IF_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut évoluant dans un canal rectangulaire s'écrit :

$$IF_1^2 = \frac{Q^2}{g \cdot b^2 \cdot h_1^3} \quad (1.5)$$

Après avoir introduire les relations (1.1), (1.2) et (1.5) dans la relation (1.4) on obtiendra :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} [\sqrt{1 + 8IF_1^2} - 1] \quad (1.6)$$

Et en fin on a abouti à l'équation de Bélanger (1828), liant le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut au nombre de Froude IF_1 , en réalité c'est une équation d'une droite représentée par la figure 1.4.

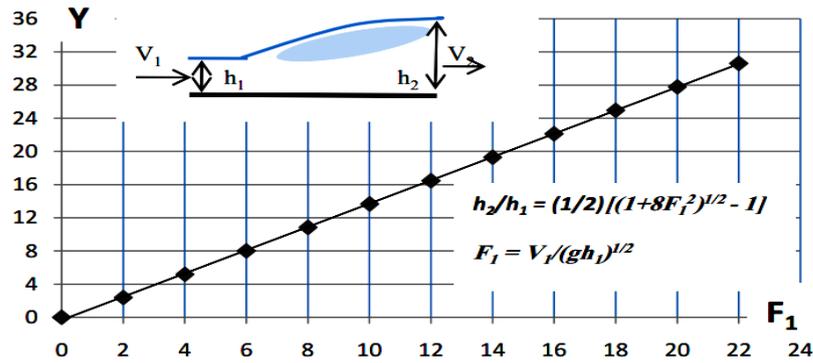


Figure 1.4 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger (1828)

Hager et Sinniger (1986), ont donné une relation plus simple que la relation (1.6), et applicable pour un nombre de Froude $IF_1 > 3$.

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot IF_1 - \frac{1}{2} \quad (1.7)$$

I.2.1.3 Hauteurs du ressaut

La hauteur du ressaut a été définie comme étant égale à :

$$h = h_2 - h_1 \quad (1.8)$$



Figure 1.5 : Hauteur du ressaut

I.2.1.4 Longueur du ressaut

Il résulte de ce qu'on a dit précédemment que le ressaut se produit toujours au cours du passage d'un régime torrentiel à un régime fluvial. La longueur L_j est la caractéristique du ressaut la plus difficile à déterminer, mais on estime que cela est possible que si :

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

Pratiquement, pour calculer les dimensions du bassin d'amortissement, on considère comme limite d'aval du ressaut le point à partir duquel le revêtement du béton n'est plus nécessaire.

Les essais de Bradley et Peterka (1957) ont permis à Hager et al. (1990) de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur L_j du ressaut. Celle-ci rapportée à la hauteur initiale h_1 du ressaut, peut s'écrire comme suit :

$$L_j^* / h_1 = 220.Tgh [(IFr_1-1)/22] \quad (1.9)$$

D'après Hager et al. (1990), la variation de la longueur relative L_j/h_2 en fonction du nombre de Froude IFr_1 montre que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à 6 pour une gamme pratique $4 < IFr_1 < 12$.

$$L_j^*/h_2^*=6 \quad (1.10)$$

D'autres formules ont été proposées, pour un canal de section droite rectangulaire, selon Carlier (1980) on a :

- formule de Smetana (1933)

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

Pour un nombre de Froude au-delà de $Fr_1 = 3$ selon Sinniger et Hager (1985), on peut également appliquer la formule empirique suivante :

$$\frac{L_j}{h_2} = \frac{35\sqrt{IF_1}}{(8+IF_1)} \quad (1.12)$$

Et qui conduit aux mêmes résultats.

I.2.1.5 Longueur du rouleau

En 1990 Hager et al définissent deux types de longueur du rouleau tous dépendent de forme du ressaut étudié. En effet, ils ont introduit la notion de longueur du rouleau développé et non développé.

La figure (1.6) illustre ces deux types du ressaut et les longueurs L_r qui correspondent.

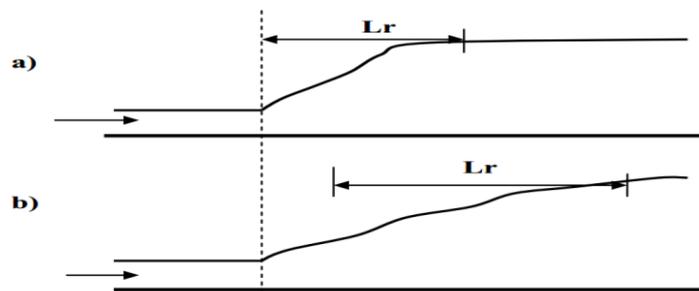


Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique : a)Rouleau développé, b) Rouleau non développé

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

Le rouleau non-développé : se caractérise par une longueur plus courte que celle du rouleau développé et sa surface à l'aval se présente sous l'aspect de vagues. Au fond de la masse liquide en mouvement, on peut distinguer une zone de rouleau dite de séparation formant un tourbillon de fond. En raison de la présence de cette zone, le jet entrant dans la section initiale du ressaut est dévié vers la surface libre.

Les essais effectués par Hager et al. (1990) indique que, pour le cas du ressaut classique, le rapport $\lambda_r^* = L_r^* / h_1$ dépend du nombre de Froude Fr_1 et du rapport d'aspect $w = h_1/b$. Les auteurs proposent les relations suivantes:

$$\lambda_r^* = -12 + 160 \operatorname{Tgh}(IFr_1 / 20) \text{ pour } w = h_1/b < 0,1 \quad (1.13)$$

$$\lambda_r^* = -12 + 100 \operatorname{Tgh}(IFr_1 / 12,5) \text{ pour } 0,1 < w < 0,7 \quad (1.14)$$

« Tgh » désigne la tangente hyperbolique.

Les auteurs notent que pour $IFr_1 < 8$, les relations (1.13) et (1.14) peuvent être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

$$\lambda_r^* = L_r^* / h_1 = 8. (IFr_1 - 1,5) ; 2,5 < IFr_1 < 8 \quad (1.15)$$

I.2.1.6 Rendement du ressaut

Le ressaut provoque une importante dissipation d'énergie mécanique ; ce phénomène est irréversible. Les caractéristiques de la turbulence sont très complexes et dépendent fortement des conditions à l'amont.

La figure 1.7 montre la ligne de charge totale le long de la longueur L_j sur laquelle s'étend le ressaut classique.

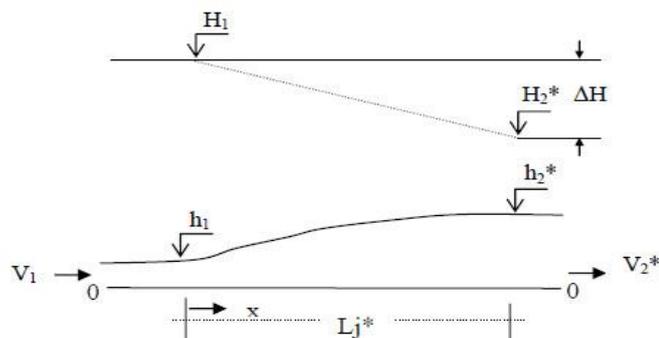


Figure 1.7 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

En se référant au plan 0-0, la charge totale dans la section initiale du ressaut s'écrit :

$$H_1 = h_1 + \alpha_1 \cdot V_1^2 / (2 \cdot g) \quad (1.16)$$

Tandis que la charge totale dans la section finale est :

$$H_2^* = h_2^* + \alpha_2 \cdot V_2^{*2} / (2 \cdot g) \quad (1.17)$$

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

La perte de charge ΔH^* due au ressaut est la différence des charges totales initiale et finale :

$$\Delta H^* = H_1 - H_2^* \quad (1.18)$$

En raison du caractère permanent de l'écoulement, l'équation de continuité reste en vigueur et l'on peut écrire :

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2^* \cdot A_2^* \quad (1.19)$$

Où $A_1 = b \cdot h_1$ et $A_2^* = b \cdot h_2^*$. En tenant compte des relations (1.16), (1.17) et (1.18), (1.19) s'écrit:

$$\Delta H^* = (h_1 - h_2^*) + (h_1^{-2} - h_2^{*2}) \cdot (q / (2 \cdot g)) \quad (1.20)$$

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

$$q^2 / (2 \cdot g) = (h_1 \cdot h_2^{*2} + h_1^2 \cdot h_2^*) / 4 \quad (1.21)$$

Ainsi, l'équation (1.20) s'écrit sous sa forme définitive :

$$\Delta H^* = (h_2 - h_1^*)^3 / (4 \cdot h_2^* \cdot h_1) \quad (1.22)$$

La relation (1.22) exprime la perte de charge due au ressaut classique en fonction des hauteurs conjuguées de celui-ci.

On exprime souvent la capacité de dissipation du ressaut par le rapport $\eta^* = \Delta H^* / H_1$, qui représente en fait son rendement. En tenant compte de la relation (1.4), les charges totales initiale et finale du ressaut peuvent s'écrire respectivement :

$$H_1 = h_1 [1 + IF_1^2 / 2] \quad (1.23)$$

$$H_2^* = h_1 [Y^* + IF_1^2 / (2Y^{*2})] \quad (1.24)$$

Où Y^* est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique définie par l'équation (1.5) de Bélanger. Ainsi, le rendement η^* s'écrit :

$$\eta^* = \Delta H^*/H_1 = (H_1 - H_2^*)/H_1$$

$$\eta^* = 1 - [Y^* + IF_1^2 / (2 \cdot Y^{*2})] / (1 + IF_1^2 / 2) \quad (1.25)$$

Bien que la relation (1.25) permet le calcul explicite du rendement η^* , HAGER et SINNIGER (1986) proposent une expression approchée, applicable pour $IF_1 > 2$:

$$\eta^* = [1 - 2/IF_1]^2 \quad (1.26)$$

Les relations (1.25) et (1.26) sont représentées graphiquement dans le système d'axes de coordonnées cartésiennes de la figure (1.8).

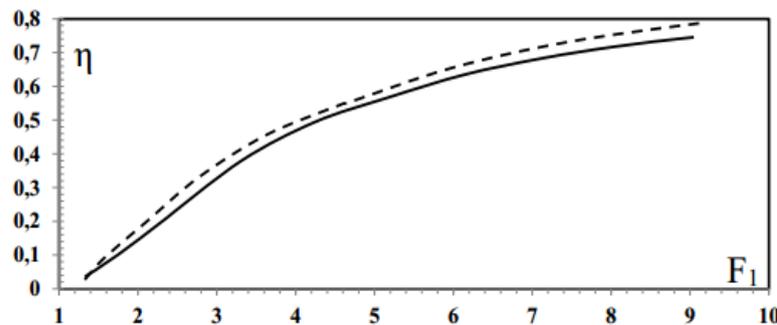


Figure 1.8 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude.
 (---) Courbe tracée selon la relation (1.25). (---) Courbe tracée selon la relation (1.26).

La figure (1.8) montre d'une part que le rendement η^* du ressaut classique est supérieur à 50% pour $IF_1 \geq 5,1$ et que les rendements calculés en application de la relation approchée (1.25) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.26) d'autre part ; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

I.2.2 Ressaut hydraulique contrôlée par seuil continu à paroi mince

I.2.2.1 Approche de FORSTER et SKRINDE

En admettant une répartition hydrostatique des pressions et une distribution uniforme des vitesses dans les sections de part et d'autre du ressaut.

L'étude expérimentale de FORSTER et SKRINDE (1950) vise à définir la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, pour des valeurs données de la position relative x/h_2 du seuil.

Pour chaque essai effectué, le rapport x/h_2 est maintenu constant tout en assurant la formation complète du ressaut. La longueur du bassin amortisseur est à la limite égale à la position x du seuil comptée à partir du début du ressaut (figure 1.6).

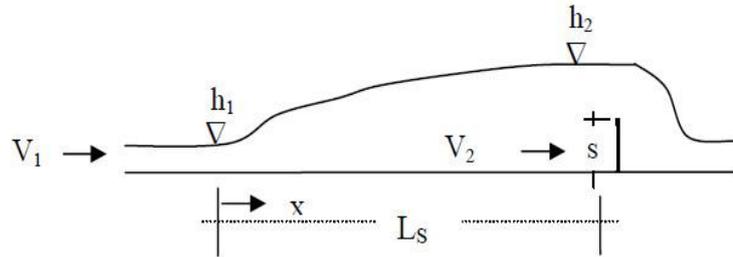


Figure 1.9 : Schéma du ressaut contrôlé par un seuil continu à mince paroi.

I.2.2.2 Etude de Achour, Sedira et DEBABECHE (2002)

La hauteur géométrique « s » du seuil ainsi que sa position « x » sont choisies de telle sorte que le rapport x/h_2 prenne des valeurs comprises entre 3 et 10 ; les essais sont exécutés avec un pas de variation $\Delta (x/h_2) \cong 0,5$.

Une très large gamme de valeurs de la hauteur relative s/h_1 a été obtenue $1 \leq s/h_1 \leq 6$, ainsi que une gamme pratique du nombre de Froude IF_1 tel que $3 \leq IF_1 \leq 9$.

Les valeurs expérimentales de la hauteur relative S du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude IF_1 sont représentées graphiquement sur la figure 1.10

L'analyse des mesures expérimentales obtenues a surtout montré que la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil est liée au nombre de Froude IF_1 par une relation de type puissance : $S = C_0(IF_1 - 1)^\beta$

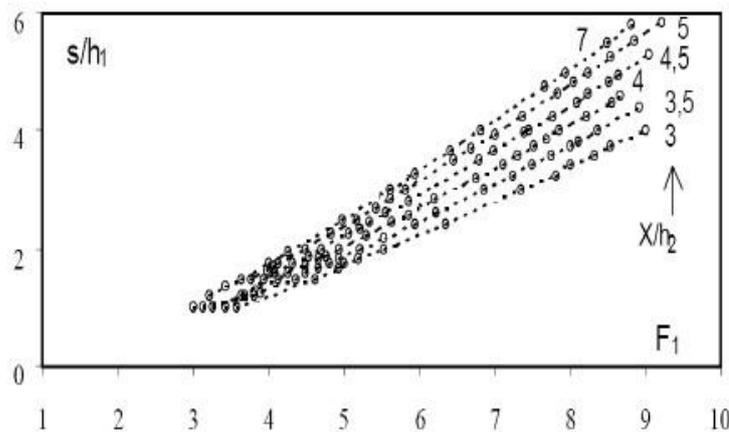


Figure 1.10 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de x/h_2 .

Une analyse complémentaire a permis d'écrire :

$$S = 0,0604 (x/h_2) + 0,1186(IF_1 - 1)^{1,25} \quad \text{Pour } 3 \leq x/h_2 \leq 5 \quad (1.27)$$

$$S = 0,0086 (x/h_2) + 0,379(IF_1 - 1)^{1,25} \quad \text{Pour } 5 \leq x/h_2 \leq 10 \quad (10)$$

La figure 1.10 montre que les courbes se rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que x/h_2 augmente. Il apparaît ainsi que dans la gamme relativement large $5 \leq x/h_2 \leq 7$, voire même $5 \leq x/h_2 \leq 10$, la variation que subit la hauteur relative S pour le même nombre de Froude IF_1 n'est pas significative.

I.3 Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

I.3.1 Approche de Wanoschek et Hager (1989)

Les ressauts hydrauliques dissipent une grande quantité d'énergie mécanique. Ce phénomène est donc appliqué dans les bassins d'amortissements. Les bassins d'amortissements actuels ont généralement une forme rectangulaire. Le rendement du ressaut hydraulique $\varepsilon = \Delta H/H_1$ croît avec l'augmentation du nombre de Froude IF_1 . $\Delta H = H_1 - H_2$ est la perte d'énergie entre la section amont et aval du ressaut (figure 1.11). La fonction $\varepsilon(Fr1)$ peut facilement être établie pour les bassins prismatiques non rectangulaires, si l'on suppose que la force de frottement le long des parois du canal est compensée par la force de gravité longitudinale. Typiquement, une telle configuration s'établit dans des canaux, dont la pente inférieure à 1%.

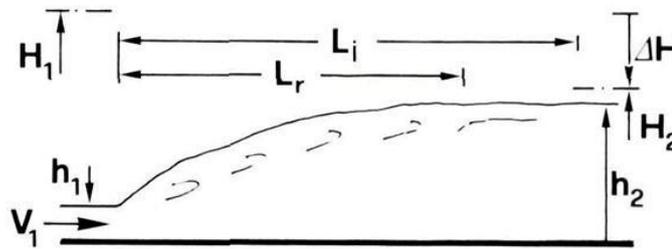


Figure 1.11 : Schéma de définition pour le ressaut hydraulique.

Du point de vue pratique, les canaux à section trapézoïdale sont particulièrement préoccupants. Pour un nombre de Froude IF_1 donné le rendement ε (équation 1.29) augmente avec $M = mh_1/b$, m est la cotangente de la pente latérale, h_1 la profondeur amont et b la largeur de base de la section transversale trapézoïdale symétrique.

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{IF_1^2(1+M)^3}{2Y^2(1+2M)(1+YM)}}{1 + \frac{IF_1^2(1+2M)}{2(1+2M)}} \quad 0 < \eta < 1 \quad (1.29)$$

Pour les canaux rectangulaires ($M = 0$), et les canaux triangulaires ($1/M = 0$) sont des cas particuliers de la section trapézoïdale. Les expressions donnant les rapports des profondeurs

conjuguées $Y = h_2/h_1$ et le rendement ε de l'écoulement correspondant aux deux types de canaux sont donnés par l'équation (1.30) et l'équation (1.31) respectivement pour $IF_1 > 2,5$.

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

$$Y = \sqrt{2} IF_1 - \frac{1}{2} \quad \eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{IF_1} \right]^2 \quad (1.30)$$

Pour le cas du canal triangulaire on a : $\frac{1}{M} = 0$; ($M \rightarrow \infty$). L'expression de la perte de charge relative sera :

$$Y = \left(\frac{3}{2} IF_1^2 - 1 \right)^{\frac{1}{3}} \quad \eta = \left[\left(1 - \frac{12}{IF_1^4} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \quad (1.31)$$

La dissipation d'énergie relative $\varepsilon = \Delta H / H_1$ (figure 1.12), dans laquelle :

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2}$$

H_1 est l'énergie en amont, et $\Delta H = H_1 - H_2$ (figure 1.11), est facilement déterminable en utilisant l'équation de Bernoulli.

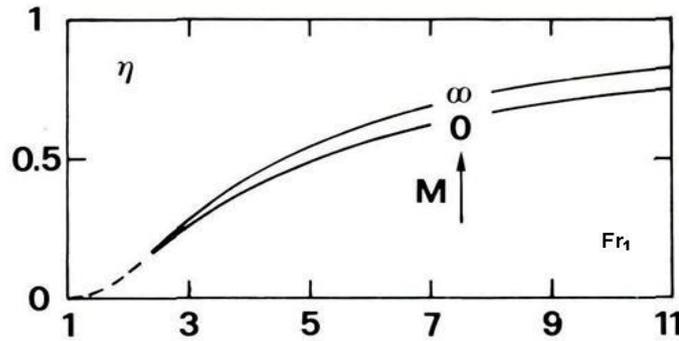


Figure 1.12 : Dissipation de l'énergie relative, $\varepsilon = \Delta H / H_1$ en fonction de IF_1 et de M pour un canal rectangulaire ($M = 0$) et triangulaire ($1/M = 0$).

Pour un IF_1 donné, la différence $(\varepsilon_T - \varepsilon_R)/\varepsilon_T$ est presque égale à 10%; les indices R et T se réfèrent respectivement au canal rectangulaire et au canal triangulaire. Cette augmentation du rendement est importante.

Par rapport au ressaut dans le canal rectangulaire un certain nombre d'avantages ont été établis. Cependant, pour la conception pratique du bassin de dissipation triangulaire est compliquée. Bien que pas aussi rentable que le ressaut dans le canal triangulaire, le ressaut hydraulique dans le canal trapézoïdal à attirer l'attention de plusieurs auteurs.

Le but de la présente étude est d'analyser les principales caractéristiques d'écoulement de ces canaux. Les résultats sont ainsi basés sur la connaissance actuelle des ressauts dans les deux sections limites et des observations obtenues dans un canal trapézoïdal symétrique à 45° .

I.3.2 Présentations des essais

Les présents essais ont été réalisés dans un canal trapézoïdal prismatique symétrique de largeur de base 0,2 m et une pente latérale de 45° ($m = 1$). La profondeur du canal était de 0,7 m et de 1,60 m de largeur. La longueur du canal horizontal était de 8 m. Le débit a été assuré par une conduite de diamètre 0,15 m. Le passage de la conduite sous pression au canal a été réalisé par une "boîte de pression". Le jet entrant est ainsi guidé par un horizontal, et a généré une profondeur de départ initiale bien définie h_0 ($\pm 0,2$ mm). Des vitesses jusqu'à $V_0 = 8 \text{ ms}^{-1}$ ont été atteintes. Observation des profils de vitesse d'admission indiquait une distribution de vitesse totalement turbulente, symétrique par rapport à l'axe du canal.

On a considéré des valeurs de $h_0 = 20$ mm, 40 mm, 60 mm et 80 mm, pour lesquelles $M = 0,1$; 0,2 ; 0,3 ; et 0,4, respectivement. Des débits Q entre $7,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ et $98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ont été exécutés. Les limites supérieures des nombres de Froude respectifs sont ainsi devenues $IF_1 = 15$; 13; 9; et 5,45. L'immersion de l'eau est réglée de telle sorte que les ressauts étaient situés le plus près possible de la section d'entrée sans pour autant submerger le couvercle.

La distance entre x_0 et x_1 , se situait généralement à 0,5 m. En raison de la vitesse moyenne V_1 à la section x_1 était inférieur à V_0 . La valeur de h_1 a été obtenue par un calcul de remous standard basé sur le débit Q , la profondeur d'écoulement h_0 , et sur l'équation de Colebrook-White pour le facteur de frottement f , puisque le domaine des nombres de Reynolds était entre 105 et 106 et le canal d'essai présent une surface pratiquement lisse, f atteint des valeurs de 0,010 à 0,012. La différence entre h_0 et h_1 était normalement faible, mais impliquait généralement une réduction de 3 % de IF_1 .

À l'extrémité aval du canal, l'eau pourrait être réglée par une grille mobile. Plus loin en aval, le débit était mesuré par un canal Venturi. Son exactitude était meilleure que $\pm 0,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ou $\pm 2,5$ % (plus grande des deux valeurs).

I.3.3 Caractéristiques de l'écoulement

Comparée au ressaut hydraulique bien connu dans les canaux rectangulaires prismatiques (ressaut classique), la configuration d'écoulement des ressauts dans les canaux trapézoïdaux est tout à fait différente. Les ressauts classiques sont caractérisés par un jet de fond à grande vitesse et un rouleau de surface superposé. De tels ressauts sont habituellement appelés bidimensionnels.

La figure (1.13) montre la représentation graphique des caractéristiques d'écoulements principaux dans un ressaut trapézoïdal. L'entrée d'air à grande vitesse (**1**) est soulevée dans

l'air et forme une zone d'éclaboussure (2) en raison de la présence d'une zone de séparation au fond (3), dit rouleau de fond. Le courant principal s'écoule donc près de la surface et diverge lentement vers les parois latérales. Ceci est dû à la concentration de l'écoulement (1) sur la partie centrale de la section transversale et à la dépression résultante le long des parois latérales. Une première partie de l'écoulement latéral retourne en amont et forme des zones (4) d'écoulement latérales.

Une deuxième partie reste à la surface et continue en aval (5). Une troisième partie plonge le long des parois latérales en pente et enrôle le rouleau de fond (6). Ce courant n'est plus entraîné par le rouleau de fond, mais continue directement vers aval du ressaut (7).

Un ressaut hydraulique trapézoïdal est ainsi géré par des phénomènes d'écoulement très spatiaux. La présence du rouleau de fond a caractérisé ce type de ressaut par rapport au ressaut classique:

- les vitesses le long du fond sont sensiblement réduites;
- Un soulèvement à la surface du courant principal et diverge vers les deux côtés du canal;
- par conséquent, les vitesses maximales se produisent le long des parois latérales près de la surface libre.

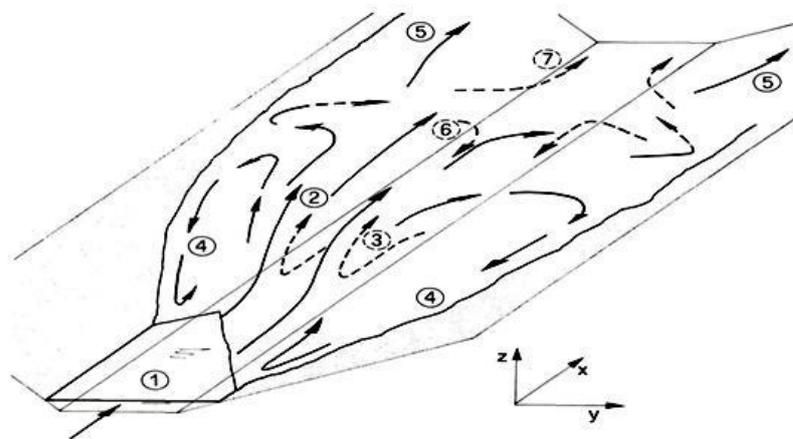


Figure 1.13 : Vue schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut en canal trapézoïdal. (—>) courants de surface, (- - ->) courants de fond.

I.3.4 Rapport des hauteurs conjuguées

Le nombre de Froude de l'écoulement incident pour un canal trapézoïdal est donné par :

$$IF_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_1^2)^3} = \frac{m^3 Q^2}{gb^5} \frac{(1+2M)}{[M(1+M)]^3} \quad (1.32)$$

Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut $Y = h_2/h_1$ peut être calculé en fonction de IF_1 et M , par l'application du théorème de la quantité de mouvement.

$$IF_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (11)$$

La Figure (1.14) montre la comparaison avec les données expérimentales et un accord général équitable est noté. Comme nous l'avons déjà indiqué précédemment, les valeurs expérimentales de Y sont toujours inférieures à celles de la théorie. Cette déviation doit être attribuée à la négligence du frottement au niveau de la paroi. Comme IF_1 et M sont généralement donnés et $h_2 = Y.h_1$ requis pour des considérations de conception.

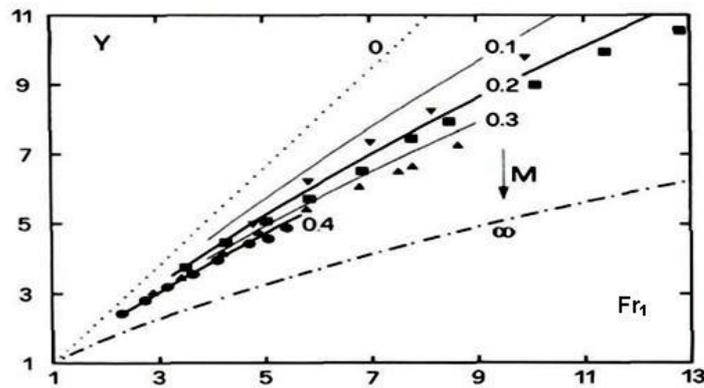


Figure 1.14: Variation du rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ pour différents valeurs de M. (—) Courbe liée à l'équation théorique (4). (...) Courbe pour $M = 0$ (canal rectangulaire), (∇) $M = 0.1$, (\blacksquare) $M = 0.2$, (\blacktriangle) $M = 0.3$, (\bullet) $M = 0.4$. (· — ·) Courbe pour $M = \infty$ (canal triangulaire).

I.3.5 Rouleau de fond

Une caractéristique particulière des ressauts trapézoïdaux avec $Fr_1 > 4$ est l'apparition d'un rouleau de fond (figure 1.15.d).

La figure (1.15.d) représente une esquisse de définition. Les dimensions globales du rouleau de fond peuvent être données par L_u (distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau de fond), L_b (longueur du rouleau de fond) et h_b (hauteur maximale du rouleau de fond).

Les figures (1.15.a) à (1.15.c), montrent les rapports : $\lambda_u = L_u/h_2$, $\lambda_b = L_b/h_2$ et h_b/h_2 en fonction de Fr_1 pour diverses valeurs de M, où h_2 correspond à la profondeur d'eau aval. Bien que la définition expérimentale des positions amont et aval soient compliqués pour un écoulement très turbulent, ces constatations révèlent qu'il existe des relations définies pour λ_u , λ_b et h_b/h_2 .

- λ_u est défini entre $2 < \lambda_u < 4$, tout à fait près de pied du ressaut.
- Pour un IF_1 donné, λ_u augmente avec l'augmentation de M.
- λ_b est beaucoup plus grand que λ_u et peut atteindre des valeurs aussi supérieures que 8.

- λ_b diminue avec la croissance de M , contrairement à λ_u .
- Il semble y avoir un maximum pour la fonction λ_b (IF_1).
- L'extrémité du rouleau de fond ($\lambda_u + \lambda_b$) est presque indépendante de M et augmente avec la croissance du nombre de Froude jusqu'à une valeur de $IF_1 = 10,5$.
- La hauteur maximale h_b/h_2 du rouleau de fond augmente avec IF_1 , jusqu'à une limite supérieure de 0,6 à 0,7. Pour IF_1 fixe h_b/h_2 augmente avec l'augmentation de M .

Il semble intéressant de souligner l'extension considérable (axiale) du rouleau de fond étonnamment, la présence d'un rouleau de fond n'a pas été détectée comme un composant typique de ressauts hydrauliques trapézoïdaux. Pourtant, une configuration d'écoulement similaire a récemment été décrite par Hager pour des ressauts dans des canaux en U, pourvu que $h_1/D \ll 1$, où D est le diamètre de la partie circulaire inférieure. Des observations récentes sur des ressauts dans un canal semi-triangulaire ont mis en évidence la présence d'un rouleau de fond. Cela peut être dû à l'effet du "demi-modèle" utilisé; les rouleaux de fonds devraient apparaître pour un modèle complet. Des enquêtes futures sont nécessaires pour ce point.

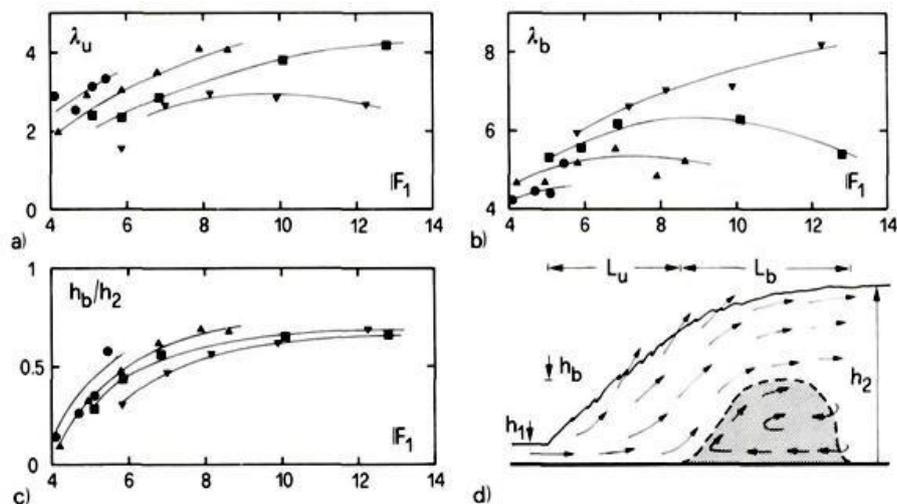


Figure 1.15: Caractéristiques principales du rouleau de fond: a) distance d'approche. b) longueur maximale. c) hauteur maximale adimensionnelle h_b/h_2 en fonction de IF_1 , et de M .

Les notations sont celles de la Figure 15. d) croquis de définition

I.3.6 Longueur de ressaut

Une autre longueur d'intérêt est la longueur du ressaut L_j . Bien que de nombreuses définitions pour cette longueur aient été avancées, nous laissons la fin du ressaut à la position où l'ébullition de surface disparaît. À ce point, les poches de bulles d'air montent à la surface

et indiquent ainsi la fin de la zone de désaération. De toute évidence, le niveau de turbulence diminué de façon significative et l'écoulement ne portent que quelques bulles d'air plus en aval. La fin du ressaut a été visualisée à la fois par les yeux et par des photographies.

La figure (1.16) montre que $\lambda_j = L_j/h_2$ en fonction de IF_1 et M . Il apparaît par conséquent que λ_j augmente avec IF_1 et M .

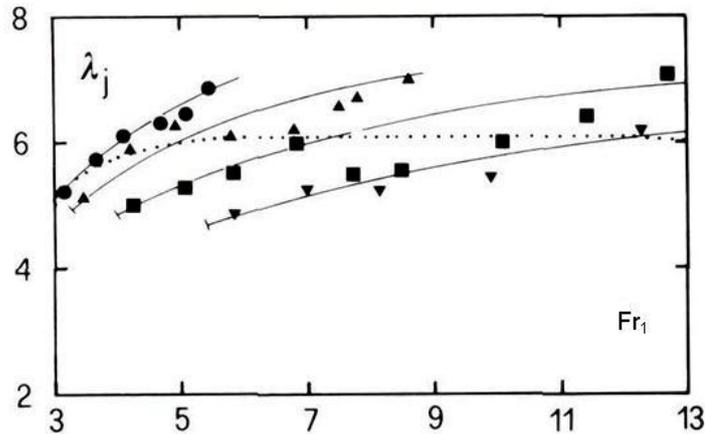


Figure 1.16 : Longueur relative du ressaut $\lambda_j = L_j/h_2$ en fonction de IF_1 et M . Les notations sont conformes à la Figure 1.13. (.....) Courbe du ressaut hydraulique en canal rectangulaire.

I.4 Ressaut hydraulique dans un canal composé

I.4.1 Caractéristique de l'écoulement en lit composé

Les écoulements en lit composé sont caractérisés par une forte interaction entre, d'une part, l'écoulement rapide et profond du lit mineur et, d'autre part, l'écoulement relativement lent et peu profond du lit majeur. Il en résulte un transfert de quantité de mouvement entre les deux lits, associé à la formation de structures turbulentes à l'interface les séparant. Dissipant une partie de l'énergie de l'écoulement, cette interaction modifie la capacité d'écoulement des deux lits et celle du lit composé Proust (2005).

La complexité des processus physiques en jeu est renforcée par le fait que l'interaction turbulente entre lits dépend à la fois de la géométrie composée et des paramètres hydrauliques (débit total, hauteur relative de débordement – i.e. rapport entre la hauteur d'eau dans le lit majeur et celle dans le lit mineur) Proust, (2005).

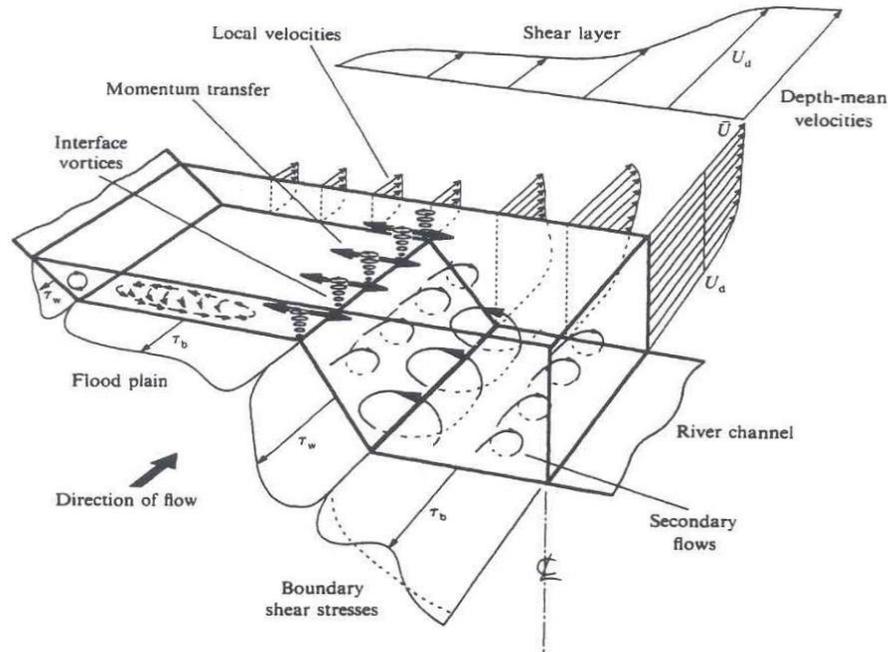


Figure 1.17 : Structure tridimensionnelle de l'écoulement en lit composé droit, d'après Shiono et Knight (1991).

I.4.2 L'avantage des canaux de type composé

On peut remarquer quelques avantages de ce type de canaux :

- Augmentation de la capacité pour absorber le débit de la crue, résultant de l'écoulement sur les talus ou lits majeurs.
- Bon transfert des sédiments dans le cas des écoulements faibles, et aussi la capacité d'absorber des débits importants en cas des crues.
- L'interaction entre les zones de profondeur d'eau différente augmente la dissipation d'énergie.
- Facilité de maintenance lorsque l'écoulement dans le canal principal.

La géométrie du canal

Il est possible de préciser les dimensions de base des canaux par l'utilisation de la géométrie globale.

Cas d'un canal de section rectangulaire composée, (Figure 1.17.a).

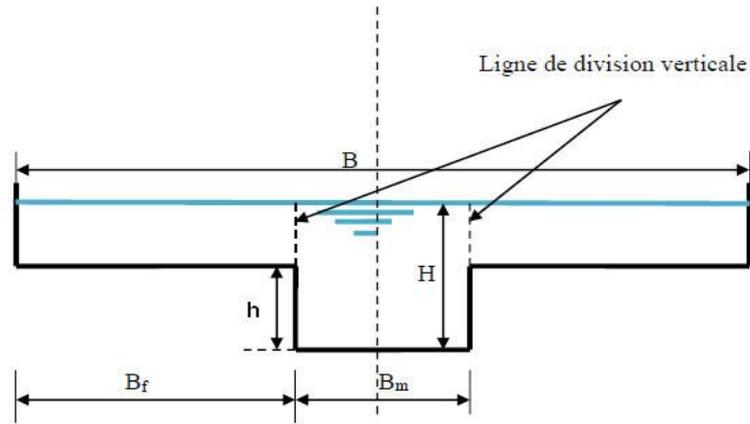


Figure 1.17.a : Définition des paramètres géométriques d'un canal de section rectangulaire composée.

Tel que :

B : Largeur du canal

B_f : Largeur du lit majeur

B_m : Largeur du lit mineur

H : Hauteur d'eau

h : hauteur de la banquettes

Cas d'un canal de section trapézoïdale composée, (Figure 1.17.b)

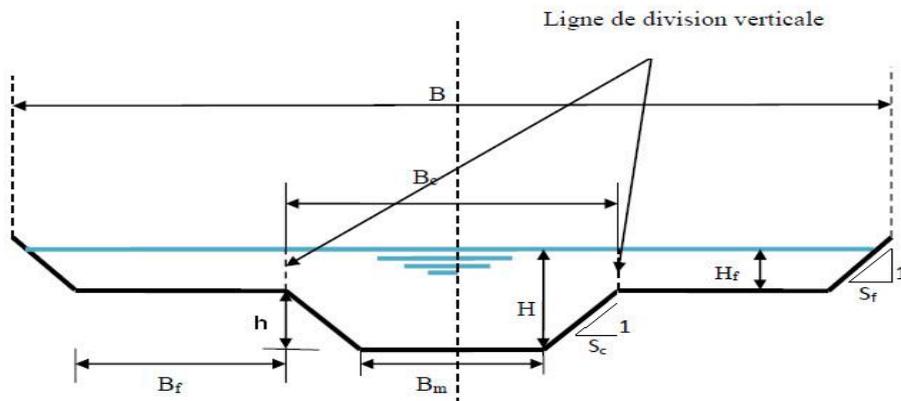


Figure 1.17.b : Définition des paramètres géométriques d'un canal de section trapézoïdal composée.

Tel que :

B_c : largeur de plein de bord du lit mineur

S_c : cotangente des talus du lit mineur

S_f : cotangente des talus du lit majeur

H_f : la charge d'eau sur le lit majeur

Pour étudier l'écoulement en lit composé symétrique, on étudier un seul coté parce que les résultats de l'autre coté sont les mêmes.

I.4.3 Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé

Selon les notes, qui ont été titrées, nous constatons que nous pouvons obtenir des très bons résultats lors de l'utilisation d'un lit composé pour dissiper l'énergie par le phénomène du ressaut hydraulique. D'après les travaux de Khattaoui et Achour, (2012), sur le ressaut hydraulique en lit composé nous allons voir comment l'évolution de ce phénomène.

Rapport des hauteurs conjuguées

La Figure (1.18) Montre les différentes caractéristiques géométriques et hydrauliques du ressaut hydraulique en lit composé droit.

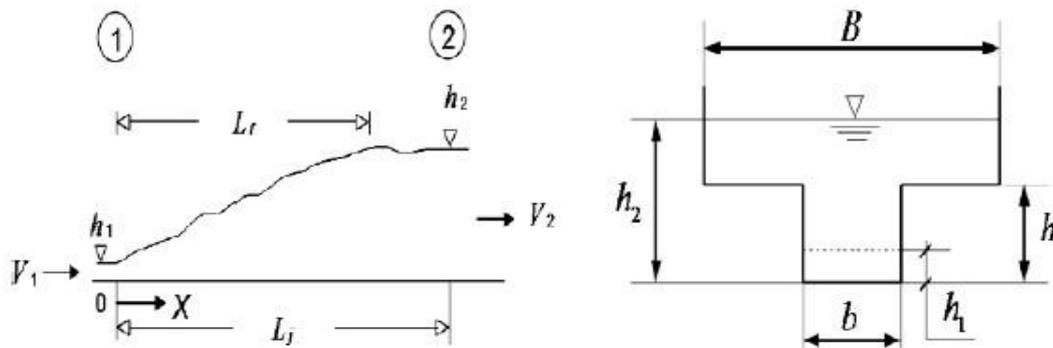


Figure 1.18: Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit Khattaoui et Achour (2012).

Le transfert de masse et de quantité de mouvement se produit à l'interface entre le lit mineur et le lit majeur, Bousmar et al. (2004). L'équation de la quantité de mouvement appliquée entre le pied et la fin du ressaut défini par la figure (1.18), s'écrit comme suit :

$$\rho \cdot Q \cdot (\beta_2 \cdot V_2 - \beta_1 \cdot V_1) = f_1 - f_2 \quad (124)$$

Où :

β_1 et β_2 : facteurs de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité puisque la répartition des vitesses est supposée 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 s'inspirant de l'article de Achour (2000), par analogie à la relation de Borda- Carnot et au vue de la forme de la relation (1.34), il paraît admissible de rajouter une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement aurait comme expression:

$$f_x = -k. \bar{\omega}(h_2 - h)^x . h_1^y (B - b)^z \quad (1.35)$$

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

h : Hauteur de plein bord du lit mineur.

$\bar{\omega}$: Poids spécifique du liquide.

k : Coefficient.

b : Largeur du lit mineur.

B : Largeur du lit majeur.

C'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 :

$$\rho . Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = f_1 - f_2 + f_x \quad (1.36)$$

Où : f_x : Force de résistance.

Analysons l'équation pour la fonction $f_x = \left(\frac{1}{2} \right) . \bar{\omega}(h_2 - h) . h_1 (B - b)$

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 :

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

En tenant compte de toutes ces hypothèses et informations ainsi que de l'équation de continuité, $V_1 . A_1 = V_2 . A_2 = Q$, l'équation 3 s'écrit en définitive, après réarrangement, comme suit :

$$2IF_1^2 \left(\frac{\beta}{y - \frac{1-\beta}{\tau}} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y-1/\tau)^2}{\tau} - \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (13)$$

Où :

$$IF_1 = Q \sqrt{b^2 . h_1^3 g} \quad (14)$$

$\tau = h_1 / h$: Rapport des hauteurs.

$\beta = b / B$: Rapport de l'élargissement.

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

$$2IF_1^2 \left(\frac{\beta}{y - \frac{1-\beta}{\tau}} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} - \frac{\left(Y - \frac{1}{\tau}\right)^2}{\beta} \quad (15)$$

Les relations (1.36) et (1.37) sont des équations fonctionnelles de forme :

$$(IF_1, Y, \beta, \tau) = 0.$$

Notons que les équations (1.37) et (1.39) peuvent s'écrire sous la forme :

$$Y + aY^2 + bY + c = 0.$$

En faisant le changement de variable $Y = x - a/3$, 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 (1.19) illustre la variation de Y , calculé par l'équation (1.39) en fonction de IF_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 $IF_1 = \left[\frac{1}{2\sqrt{2}} \right] \sqrt{(2/\tau + 1)^2 - 1}$ 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 IF_1 . L'augmentation du rapport Y en fonction de IF_1 est plus rapide pour grandes valeurs de β et diminue avec l'augmentation de τ . Khattaoui et Achour (2012).

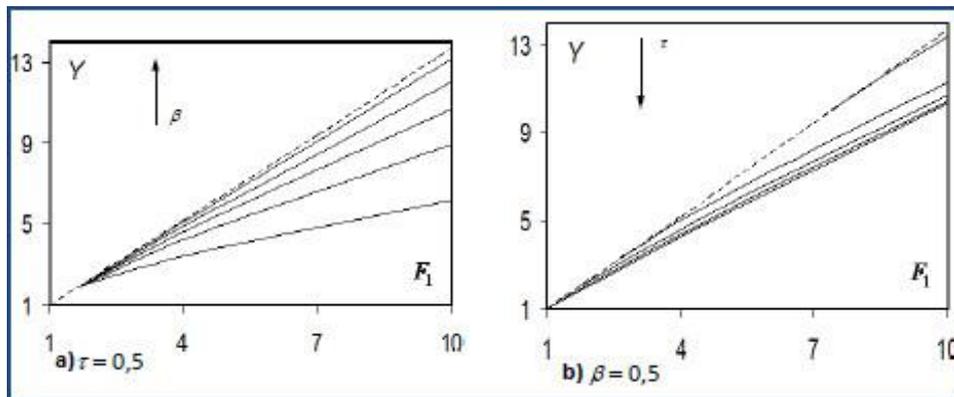


Figure 1.19 : Variation de Y , calculé par (1.34), en fonction de IF_1 , (---) : $\beta = 1$ Khattaoui et Achour (2012).

Sur la figure (1.20) nous avons représenté la variation de Y en fonction de IF_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 l'a négligeant. La différence est plus claire au fur et à mesure que le nombre de Froude IF_1 augmente. La force f_x traduit les pertes de charge dues à l'expression de l'écoulement vers le haut. Khattaoui et Achour (2012).

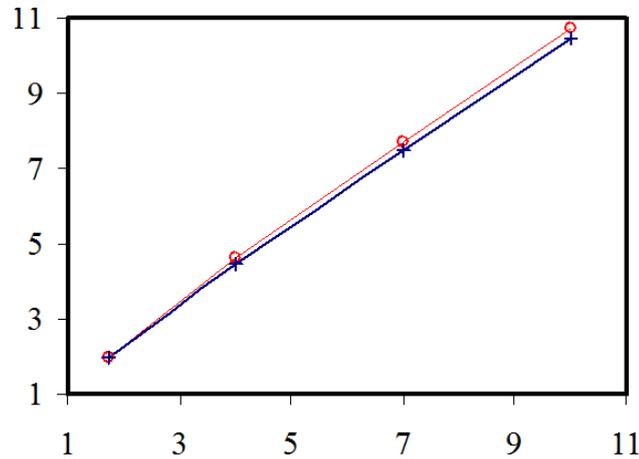


Figure 1.20 : Variation de Y en fonction de IF_1 . (o) : équation (1.34), (+) : équation (1.35), Khattaoui et Achour (2012)

I.4.4 Rendement du ressaut

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

$$\eta = 1 - \frac{Y \cdot \frac{(F_1^2)}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + IF_1^2/2} \quad (1.40)$$

L'équation (1.40) permet le calcul, d'une manière explicite, le rendement du ressaut se produisant en lit composé droit, connaissant IF_1 , Y ainsi que β et τ . En considérant les valeurs de Y calculées avec la relation (1.39), nous avons représenté sur la figure (1.21) la variation de η en fonction de IF_1 . Pour un τ et un β fixés, il est clairement illustrer sur la figure que le rendement η d'un ressaut hydraulique dans un lit composé, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de IF_1 . Pour un τ connu, en fixant IF_1 , η diminue avec l'augmentation de β et un IF_1 fixés on peut aisément voir que le η augmente avec l'accroissement de τ .

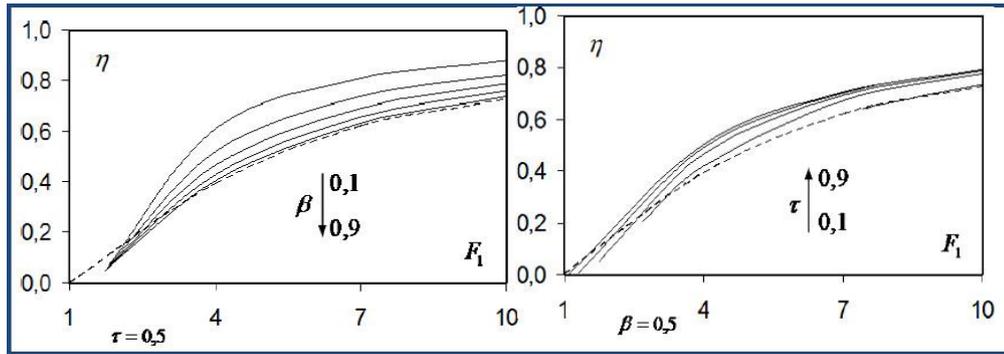


Figure 1.21 : Variation de η en fonction de IF_1 . (---) : $\beta = 1$. η est calculé par l'équation (1.37), (Khattaoui et Achour 2012).

Sur la figure (1.22) est représentée la variation de η en fonction de IF_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 l'a négligeant. (Khattaoui et Achour 2012)

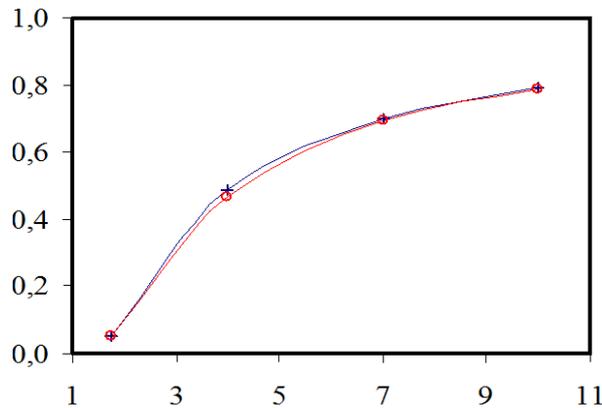


Figure 1.22 : Variation de η en fonction de IF_1 . (o) : équation (1.35), (+) équation (1.34), Khattaoui et Achour (2012).

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné trois formes du ressaut hydraulique, le cas d'un canal rectangulaire, ce type du ressaut a fait la base théorique des études dans ce domaine. On a commencé par l'équation de base, démontrée par Bélanger (1828); cette dernière est obtenue par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut classique et, elle exprime la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique, et le facteur adimensionnel connu sous le nom du nombre de Froude.

La détermination de la valeur du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement à l'amont du ressaut hydraulique, a permis à Bradley et Peterka (1957), de donner leurs classifications des différentes formes du ressaut.

A travers les études de Hager et al (1990), sur le ressaut hydraulique, les auteurs ont montré que l'estimation des caractéristiques géométriques du ressaut, telle que la longueur du ressaut L_j et la longueur L_r du rouleau ne s'effectuent que par voie expérimentale.

Dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal, la détermination des caractéristiques du ressaut, a été souvent l'objectif principal des travaux entrepris par Hager et Wanoschek (1989).

Le cas du canal trapézoïdal est le plus général : par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut, nous avons déterminé la relation des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude IF_1 et nous avons déduit le cas du canal rectangulaire et triangulaire. La même chose pour la détermination du rendement du ressaut, mais, pour ce cas, l'application du théorème de Bernoulli est nécessaire. La représentation graphique de la relation du rendement obtenu, montre que c'est le canal triangulaire qui présente le plus grand intérêt du point de vue rendement.

L'objectif du dernier cas de cette étude dans ce chapitre, consiste à faire le point sur les caractéristiques de l'écoulement en lit composé, nous avons remarqué que le canal composé produit une turbulence à l'intersection des lits, qui dissipe une quantité d'énergie.

Après nous avons examiné les travaux de Khattaoui et Achour (2012) sur les caractéristique du ressaut hydraulique en lit composé une nouvelle approche a été proposé afin de trouver l'expression définitive de la force de résistance, étroitement liée au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures, sur modèle réduit au laboratoire, sont indispensables.

CHAPITRE II

Distribution des vitesses dans le ressaut hydraulique

Chapitre II

Distribution des vitesses dans le ressaut hydraulique

II.1 Introduction

Ce deuxième chapitre, sera consacré à une étude bibliographique de la distribution des vitesses dans le ressaut hydraulique dans quelques types des canaux. Compte tenu du travail limité borné dans ce domaine et de la difficulté à l'obtenir, certaines études obtenues à partir de références étrangères sont considérées comme les premières expériences, et d'autres travaux locaux ont été menés à l'Université de Biskra.

Pour le premier volet de ce chapitre, nous avons présenté certains travaux dans le domaine de la mesure de vitesse, ces travaux expérimentaux ont été présentés dans les types de canaux différents : rectangulaire, profilé en "U", et composé. Le deuxième volet sera consacré à la distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal de section droite triangulaire. Notre attention sera particulièrement portée sur les travaux de Debabeche (1996).

II.2 Ressaut hydraulique classique en canal rectangulaire

Les premières expériences étaient dans le domaine de la mesure de vitesse appliquée sur le ressaut hydraulique ont été dirigées par Bakhmeteff et Matzke en 1936. L'année 1959 Rouse et al ont représenté le champ des vitesses pour 3 valeurs choisies de IF_1 .

En 1963, Schröder effectué une description complète de la forme de l'écoulement. Pour un ressaut hydraulique de $IF_1 = 5,1$, l'analyse de l'évolution longitudinale et transversale de la vitesse montre que la répartition verticale près du fond reste presque uniforme où il existe une zone non perturbé de hauteur z_1 (figure 2.1).

Schröder (1963) à exprimer la coordonnée verticale adimensionnelle suivante :

$$z = 2 \left(\frac{z-z_1}{h-h_1} \right), z_1 = h_1 \left(\frac{h_2-h}{h_2-h_1} \right) \quad (2.1)$$

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 $z_1(h = h_2) = 0$.

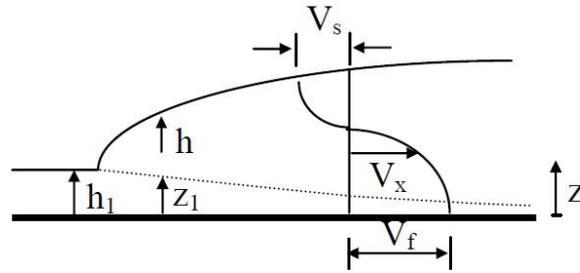


Figure 2.1 : Notation pour l'écoulement interne du ressaut hydraulique

Ces indications concernant les vitesses au fond et en surface permettent de préciser le profil universel de la vitesse dans le ressaut hydraulique.

Soit $V = (V_x - V_s) / (V_f - V_s)$ la composante longitudinale de la vitesse en fonction de Z . La figure 2.2 permet alors d'évaluer $V_x(z, x)$, une fois $V_f(x)$, $V_s(x)$ et $h(x)$ connus.

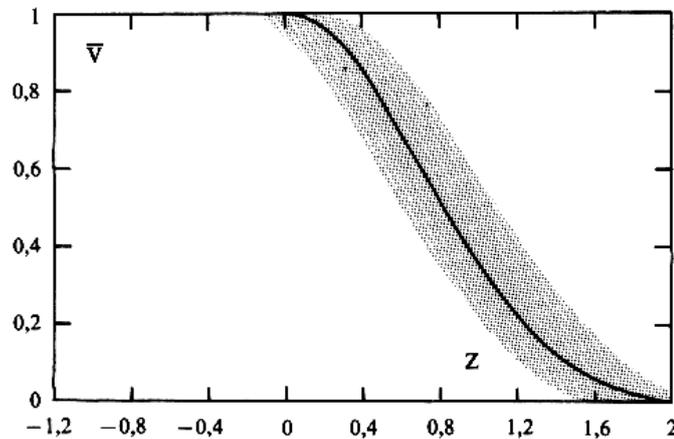


Figure 2.2 : Représentation adimensionnelle de la répartition de vitesse V en fonction de Z , Selon Schroder (1963).

II.2.1 Distribution des vitesses dans la partie inférieure du ressaut

Rajaratnam et Subramanya (1968, 1970) ont obtenu des résultats comparables :

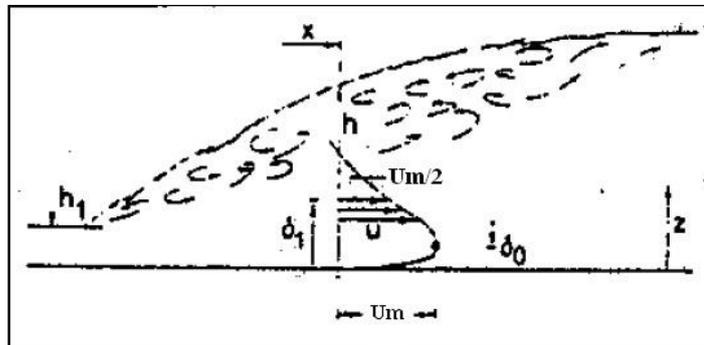


Figure 2.3 : Distribution des vitesses $u(z)$ dans la partie inférieure du ressaut

La figure 2.3 montre la variation de la distribution normalisée des vitesses u/u_m en fonction de la coordonnée verticale z/δ_1 , telles que u_m est la vitesse maximale de la section transversale et δ_1 la hauteur où $u=u_m/2$ et $\partial U/\partial z < 0$.

D'après Rajaratnam et Subramanya (1968, 1970), ces expériences donnent la relation suivante :

$$u/u_M = 2[Z\delta \exp(1 - Z\delta)]^{0.12} \quad (16)$$

$$\text{Où } Z\delta = 5Z/\delta_1 \text{ avec } u/u_m > 0$$

Selon l'équation 2.2, la vitesse maximale a lieu à $z/\delta_1=1/5$, par contre Rajaratnam et Subramanya ont trouvé approximativement $z/\delta_1=0,18$. 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 $3,9 \leq IF_1 \leq 9,05$.

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

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

D'après l'équation 2.2 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 :

$$\frac{u}{v_1} = \frac{1}{42} \left[45 - \frac{x}{h_1} \right], \frac{x}{h_1} < 30 \quad (2.4)$$

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.2.2 Etude de Hager (1992)

Une étude expérimentale sur la distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique classique a été menée par Hager (1992). Cinq séries de mesures ont alors été effectuées avec $4,3 < IF_1 < 8,9$.

Soit les paramètres suivants :

$$U = \frac{u-us}{u_m-us}, \quad z = \frac{Z-\delta_0}{h-\delta_0} \quad (2.5)$$

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 :

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

Pour tous les nombres de Froude IF_1 étudiés.

Les figure 2.4 et 2.5 montrent les points de mesures exprimant les vitesses relatives $U(Z)$ pour les nombres de Froude $IF_1 = 5,5$ 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. Est la distance verticale du point où $u = u\delta_o_m$ (figures 2.4 et 2.5). Les paramètres u_m , u_s et δ_o dépendent de x/Lr et de IF_1 .

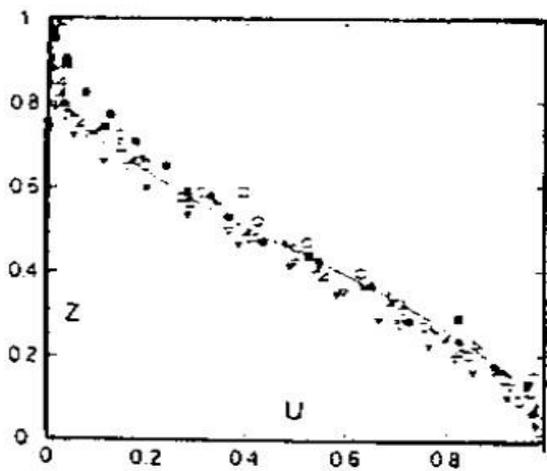


Figure 2.4 : Distribution des vitesses $U(Z)$, pour différentes longueurs relatives $X = x/L$. $IF_1 = 5,50$. $X = (\blacksquare) 0,2; (\blacktriangleright) 0,3; (\blacktriangle) 0,4; (\triangleleft) 0,5; (\blacktriangleleft) 0,6; (\nabla) 0,7; (\blacktriangledown) 0,8; (o) 0,9; (\bullet) 1$.

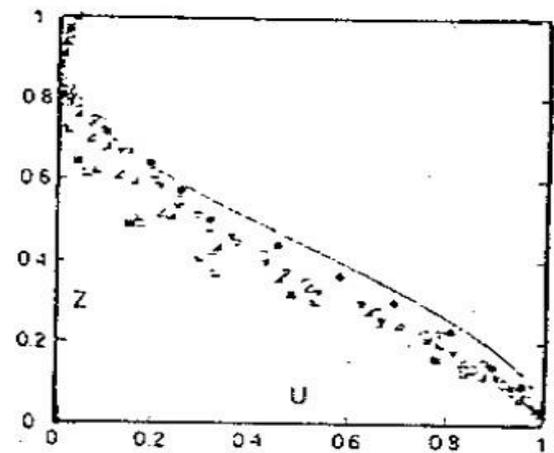


Figure 2.5 : Distribution des vitesses $U(Z)$, pour différentes longueurs relatives $X = x/Lr$. $IF_1 = 6,85$. Même notation que la figure 2.4.

La figure 2.6 montre la variation de la vitesse maximale inférieure relative en fonction de la longueur relative $U_m = (U_m - V_2) / (V_1 - V_2)$ $X = x/Lr$, telles que $V_1 = q/h_1$ et $V_2 = q/h_2$ sont les vitesses nominales à l'amont et à l'aval du ressaut.)

La figure 2.6 montre que l'effet du nombre de Froude IF_1 sur U_m est petit, et que $U_m(X)$ peut être exprimée en fonction de la longueur relative X comme suit :

$$U_m = \exp(-2X^{1.8}), 0 \leq X < 1,4 \quad (2.7)$$

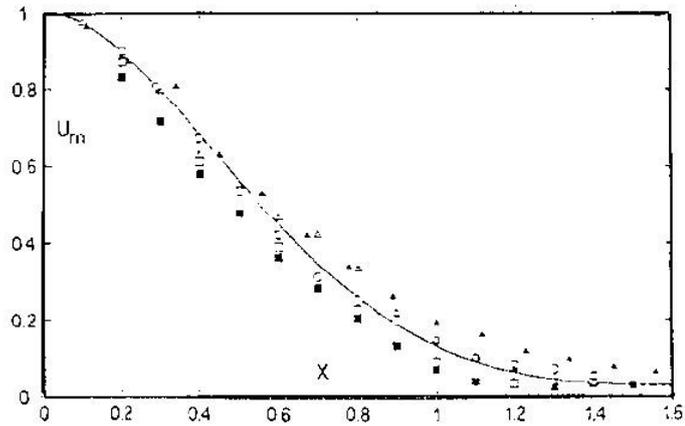


Figure 2.6 : Ressaut hydraulique classique, vitesse maximale inférieure relative U_m en fonction de la longueur relative X . (—) Courbe tracée selon l'équation.1.7. $IF_1 = (o) 4,3$, (\blacktriangle) 4,95, 5,5, (\triangle) 6,85, (\blacksquare) 8,9. (\square)

La vitesse maximale supérieure relative $U_s = u_s/v_2$ a été aussi représentée en fonction de la longueur relative X (figure 2.7) :

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

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

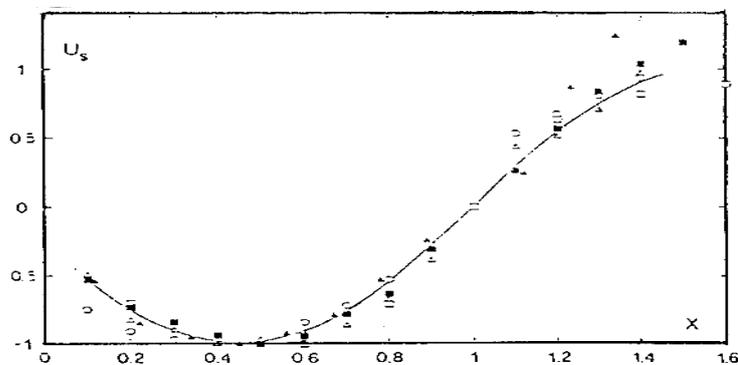


Figure 2.7 : Ressaut hydraulique classique, vitesse maximale supérieure relative U_s en fonction de la longueur relative X . Même notation que la figure 2.5, (---) Courbe tracée selon l'équation 2.8.

La variation de la hauteur (X) est représentée dans la figure 2.8 et donne en fonction de X l'expression suivante :

$$\frac{\delta_0}{h_2-h_1} = 0,06 \left[1 + 5 \left(x - \frac{1}{4} \right)^2 \right], 0.05 < X < 1,2 \quad (2.9)$$

La figure 2.8 montre que pour $X \leq 0,9$, la courbe suit parfaitement les points de mesures.

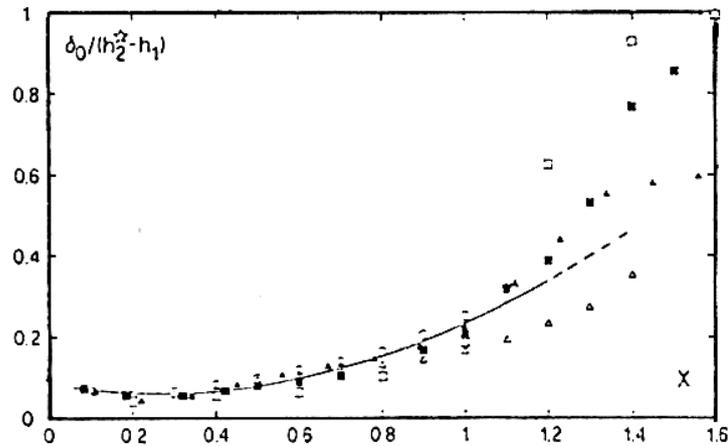


Figure 2.8 : Accroissement de la hauteur relative $\delta o / (h_2-h_1)$ en fonction de la longueur relative X . Même notation que la figure 2.6, (—) Courbe tracée selon l'équation 2.9.

La caractéristique longitudinale du ressaut qui est la plus facile à observer est 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 :

$$X = x/L_r, f = V_s / V_t \quad (2.10)$$

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

La figure 4.10 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 Schroder (1963) :

$$X^* = 1 - \frac{3}{2} \sqrt{Y-1} (X-1), f^* = \frac{V_s}{V_2} \quad (2.11)$$

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.

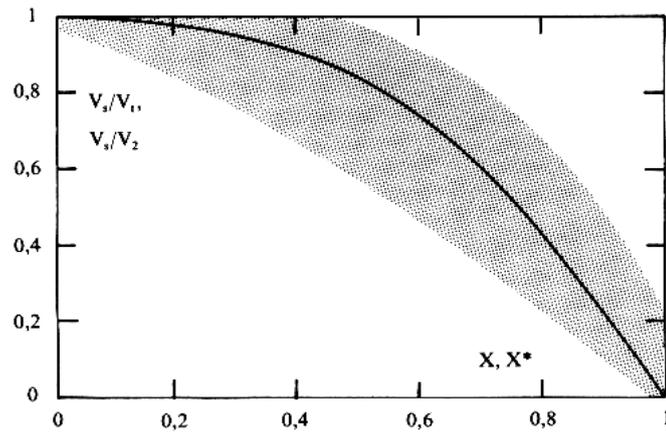


Figure 2.9 : Vitesse de surface adimensionnelle pour $0 < x < L_r$ et $x > L_r$ d'après les définitions 2.9 et 2.10.

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 :

$$f = \frac{V_f - V_2}{V_1 - V_2}, X = x/L_r \quad (2.12)$$

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 Schroder (1963). On constate que $f(X=1) = 0,2$, d'où $V_f = 0,2V_1 + 0,8V_2$.

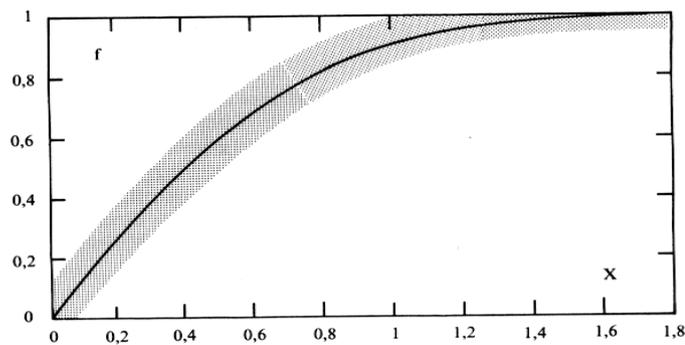


Figure 2.10 : Vitesse relative $f = (V_f - V_2) / (V_1 - V_2)$ le long du fond en fonction de la coordonnée longitudinale relative x / L_r .

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

Avec $V_1/V_2 = Y = 2,1 \cdot IF_1 - 21$ (équation de Hager) et $V_2 = Q/(bh_2) = V_1 h_1/h_2$, on déduit $V_f/V_2 \cong 1 + 0,06 \cdot IF_1$ pour $X = 1,5$.

II.3 Ressaut hydraulique avec cinq jets de décalage parallèle

Les auteurs J. G. Chen, J. M. Zhang, W. L. Xu, et Y. Peng ont conduit un nombre d'essais dans un modèle de bassin de tranquillisation (canal rectangulaire), avec plusieurs jets submergés horizontaux a été proposé, ce type proposé est un modèle similaire du bassin de la centrale hydroélectrique de barrage Xiangjiaba, qui est situé sur la rivière Jinsha en Chine. Cependant, la recherche théorique sur les bassins de tranquillisation avec de multiples jets horizontaux immergés est encore insuffisante.



Figure 2.11 : barrage de Xiangjiaba et ses annexes principales

II.3.1 Configuration et description de l'expérience

Les expériences ont été réalisées dans un canal d'eau ouvert de $L = 5$ m de long avec une section transversale rectangulaire de $0,5 \times 0,8$ m (largeur \times hauteur). La figure 2.12 est un schéma de l'installation d'essai. La section d'émission de jet comprend cinq jets décalés parallèles dans une configuration à deux couches, à savoir trois orifices de couche supérieure et deux orifices de couche inférieure, qui sont disposés en alternance. Tous les jets avaient une largeur de $b = 0,05$ m et une hauteur de $h = 0,05$ m. Pour les mesures rapportées ici, l'origine du système de coordonnées cartésiennes est le point d'intersection entre l'axe de la dalle et la goutte. La direction transversale $X =$ positive en aval, la direction latérale est Y et la direction verticale $Z =$ positive vers la surface libre; $x =$ distance de la goutte au point de mesure, $y =$ distance du centre de l'orifice au point de mesure, $z =$ distance du centre de l'orifice au point de mesure dans le plan vertical. Le système de coordonnées local est utilisé et le système de coordonnées local O' , O'' représente les coordonnées locales aux centres d'orifices des orifices des couches supérieure et inférieure, respectivement.

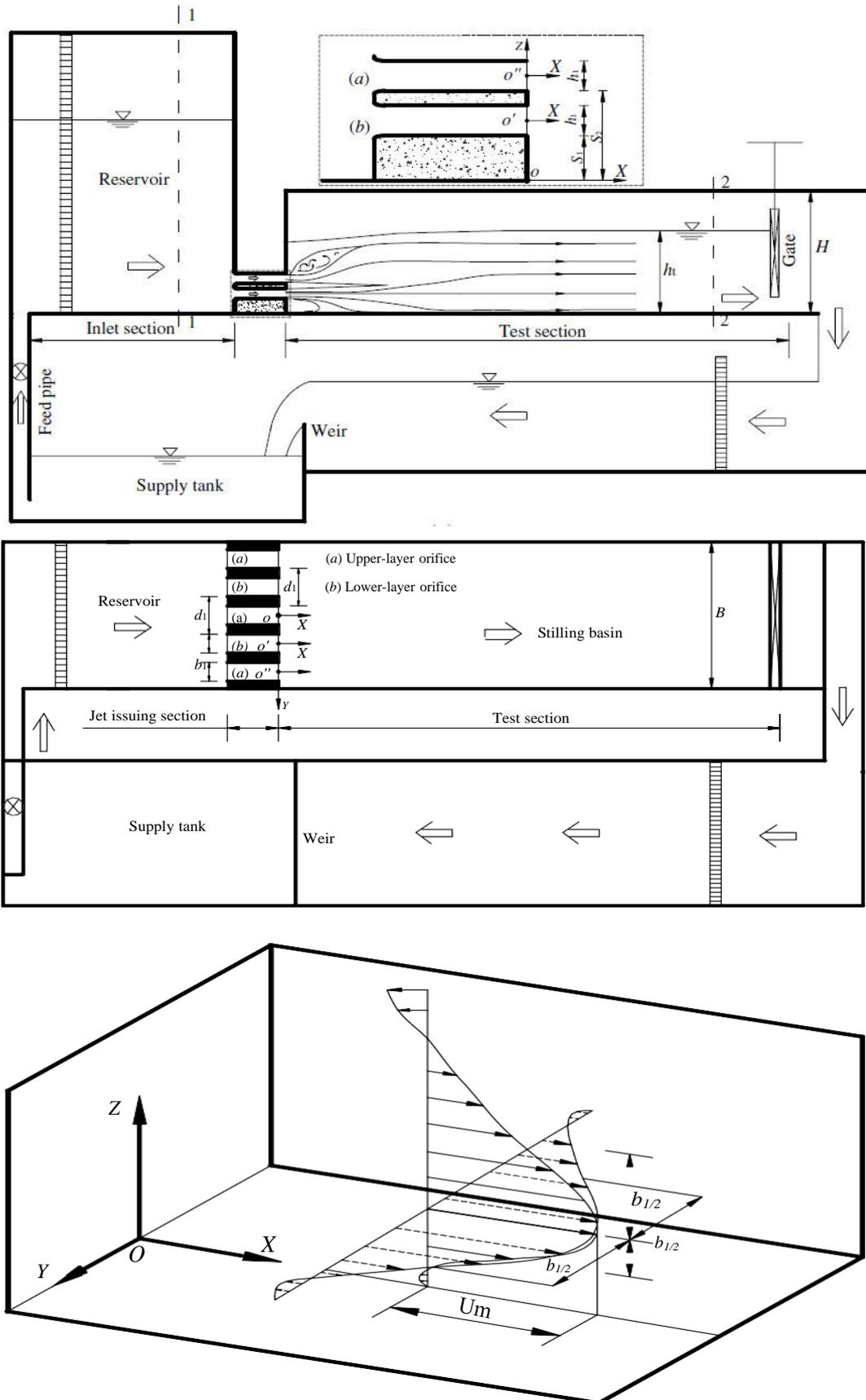


Figure 2.12 : Schéma de principe de l'installation d'essai

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

Tableau 2.1 : conditions hydraulique respectif à 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)

Des remarques importantes à été observés d'après ces chercheurs :

- Les jets dans les orifices de la couche inférieure peuvent être facilement immergés pour la restriction de la hauteur de chute, et le rouleau inférieur sous les jets de la couche inférieure est formé.
- Lorsque la hauteur de chute reste inchangée et que le nombre de Froude entrant augmente progressivement, la profondeur d'eau en aval correspondante de la formation des cinq modèles d'écoulement augmente également.
- Au fur et à mesure que IF augmente, la région du jet submergé, la région de l'impact et la région du jet de paroi ont été observées successivement autour des jets principaux.
- La majeure partie de l'énergie est dissipée à l'avant du bassin de tranquillisation (un tiers de la longueur du bassin de tranquillisation), et le flux est régulier à l'extrémité du bassin de tranquillisation.

II.3.2 Distribution de vitesse sur des plans horizontaux

D'après les auteurs, les résultats obtenus dans ce travail ont été comparés aux résultats d'autres chercheurs du même domaine et aux mêmes conditions menées sur ce type de canal. Pour afficher clairement la structure de l'écoulement, des plans de vitesse dans le sens de l'échelle (X-Y) ont été utilisés le long de la ligne centrale du jet qui mesuraient jusqu'à $x/h=20$ avec différentes décharges.

La distribution de la vitesse sur les plans horizontaux est représentée sur les figures 2.13 et 2.14; tous les plans de vitesse dans le sens de l'envergure sont réduits en une figure pour différentes exécutions. Avec U_m pris comme échelle de vitesse (la vitesse maximale à chaque section de mesure), U représente la vitesse de différents points de mesure, $b_{1/2}$ est l'échelle de longueur (vitesse à mi-hauteur) et y représente la distance de la mesure pointe vers le centre de l'orifice.

II.3.2.1 Analyse des résultats

D'après Chen et al. (2014), des résultats obtenus sur les figures 2.13 et 2.14, nous pouvons fournir les observations suivantes pour les couches supérieure et inférieure:

- La vitesse est à la valeur maximale au début de la formation du ressaut hydraulique dans le premier tiers de la distance totale du bassin de dissipation.
- La vitesse diminue avec une valeur significative, de sorte que la direction avec un pas x est vers le seuil.
- La vitesse diminue avec une faible valeur, à l'approche du seuil, et plus particulièrement à la sortie de la zone de ressaut hydraulique, où la vitesse est à sa valeur minimale.

D'autre part, Chen et al. (2014) ont donné des analyses sur les profils des vitesses relatives (U/U_m) horizontales supérieurs et inférieurs :

- La tendance de la distribution de vitesse sur les profils horizontaux de la couche supérieure et de la couche inférieure était similaire dans la région $y/b_{1/2} < 1,5$ pour tous les orifices, tandis que la distribution de la vitesse présentait des différences notables dans les profils horizontaux entre les profils supérieurs et inférieurs dans la région $y/b_{1/2} > 2,0$.
- Au-dessus des jets principaux des orifices de la couche supérieure, la distribution de vitesse est proche de celle des jets immergés, tandis qu'en dessous des jets principaux, la distribution de vitesse est dirigée loin des jets immergés.
La distribution de vitesse des orifices de la couche inférieure semble contredire celle des orifices de la couche supérieure.
- Les résultats ont indiqué que la distribution de vitesse dans les surfaces horizontales des orifices de la couche inférieure est similaire au jet classique, tandis que la distribution de la vitesse dans la région du noyau potentiel des orifices de la couche supérieure est similaire au jet classique; dans d'autres régions, la distribution de la vitesse est similaire au ressaut hydraulique.

II.3.2.2 Etude comparative

Comme nous l'avons indiqué précédemment, ce travail achevé est une étude comparative des résultats de travaux antérieurs dans le même domaine où Chen et al. (2014) ont donné les analyses suivantes:

Aux plans de vitesse horizontale des orifices de la couche supérieure, les valeurs de U/U_m dans la région $y/b_{1/2} < 1,5$ sont proches des résultats de Görtler (1954) et Law et Herlina (2002). Les valeurs de U/U_m sont proches des résultats de Görtler (1954) dans la région $1,5 < y/b_{1/2} < 2,0$, tandis que les valeurs présentent une grande différence dans la région $y/b_{1/2} > 2,0$ des travaux précédents, ce qui peut être dû au fait que les jets dans le bassin de tranquillisation ont de fortes turbulences, de fortes concentrations dans l'air et une grande vitesse; la forte interaction des jets dans les orifices de la couche supérieure et de la couche inférieure contribue également à la différence.

Aux plans de vitesse horizontale des orifices de la couche inférieure, les valeurs de U/U_m dans la région $y/b_{1/2} < 1,5$ sont proches des résultats de Görtler (1954) et de Law et Herlina (2002), tandis que les valeurs de U/U_m sont proches des résultats de Law et Herlina (2002) dans la région $y/b_{1/2} > 2,0$. En comparant la distribution de vitesse entre les orifices des couches supérieures et inférieures, la distribution de vitesse des orifices des couches inférieures est proche des résultats de Law et Herlina (2002), avec une légère divergence; ainsi, la distribution de vitesse des orifices de couche inférieure satisfait approximativement la distribution de vitesse de jet typique.

La différence dans les distributions de vitesse existe entre les orifices de la couche supérieure et de la couche inférieure car, dans le même parcours, les jets sortant des orifices de la couche supérieure avaient un faible degré d'immersion et étaient facilement affectés par le rouleau de surface du ressaut hydraulique, tandis que les jets sortant des orifices de la couche inférieure avaient un degré d'immersion plus important; ainsi, le rouleau de surface du ressaut hydraulique n'a eu qu'un léger effet sur les jets. La forte interaction des jets entre les orifices de la couche supérieure et de la couche inférieure peut également contribuer à la différence dans les distributions de vitesse.

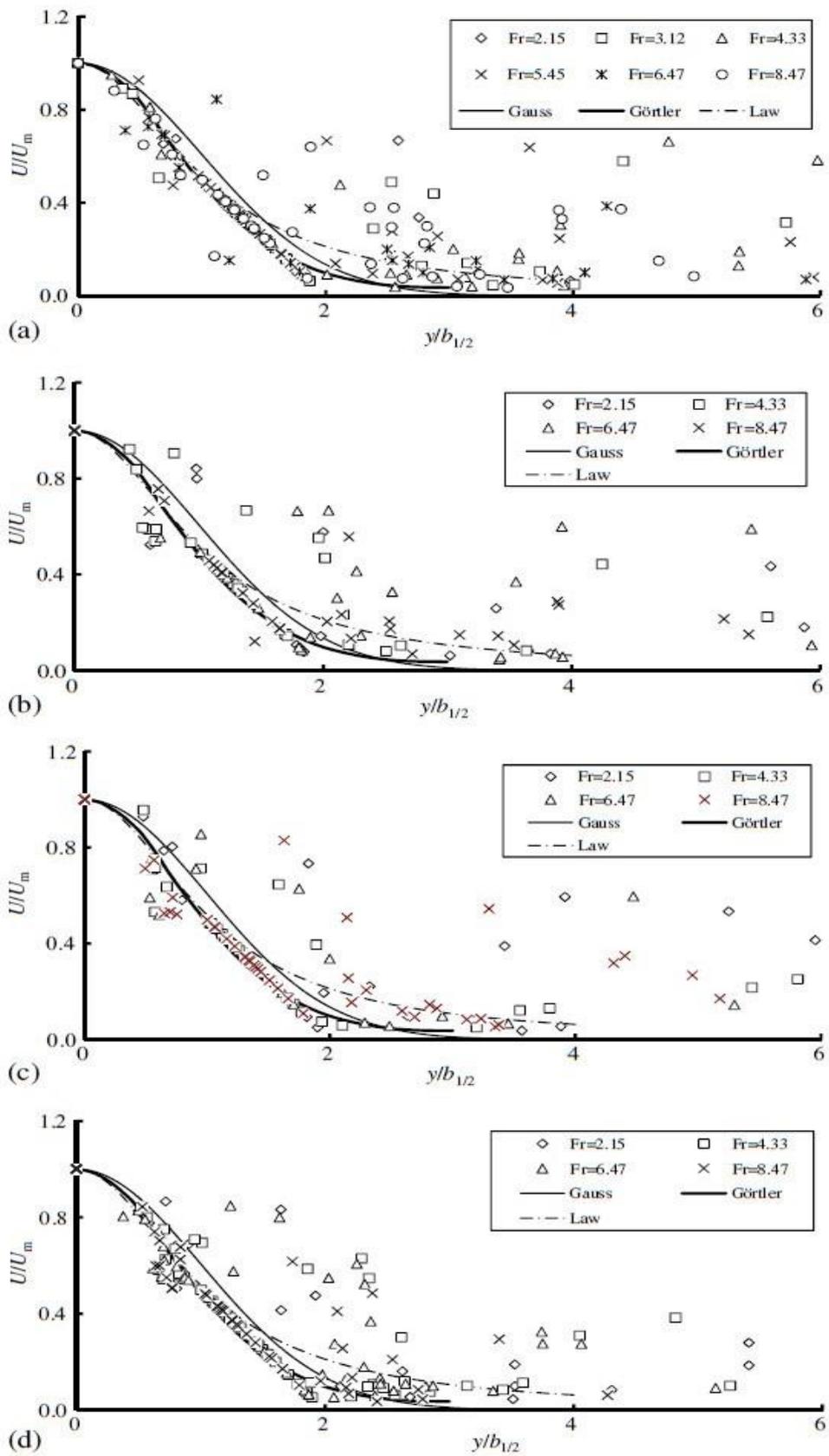


Figure 2.13: Distribution de la vitesse horizontale pour les orifices de la couche supérieure

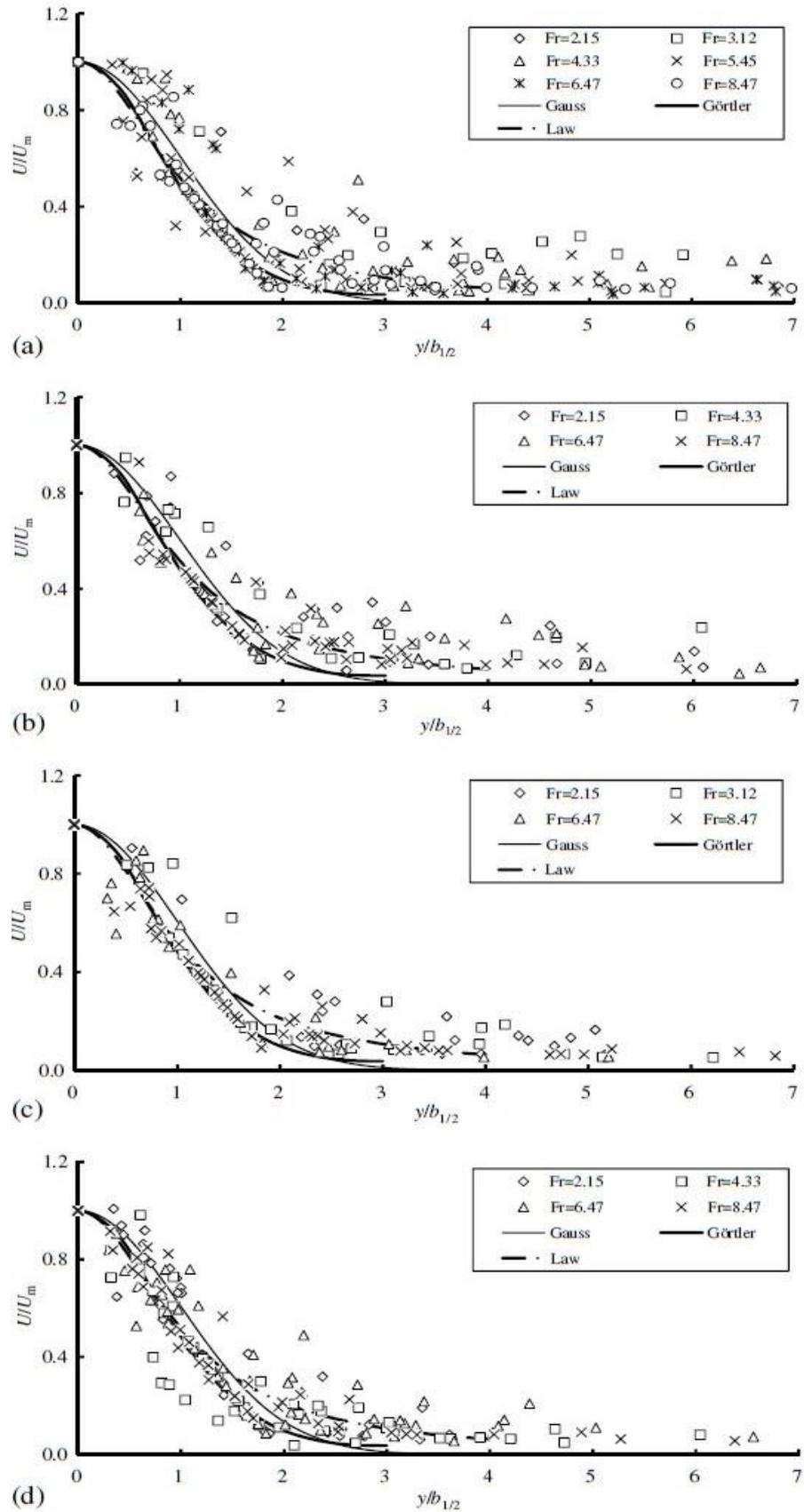


Figure 2.14: Distribution de la vitesse horizontale pour les orifices de la couche inferieur

II.4 Ressaut hydraulique classique profilé en “U”

En 2003, une étude expérimentale sur la distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique classique dans un canal profilé en “U” a été menée par Debabeche (2003). Cette étude est menée sous différentes hauteurs initiales h_1 du ressaut correspondant à une large gamme des valeurs du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident h_1 et IF_1 sont tels que $23 \text{ mm} \leq h_1 \leq 61 \text{ mm}$ et $3,75 \leq IF_1 \leq 12$, l'appareil utilisée est le Micromoulinet.

D'après Debabeche (2003), l'analyse de la variation de la vitesse moyenne horizontale V en fonction de la profondeur h pour les quatre ouvertures choisies, montre que d'une façon générale les vitesses sont maximales au fond et s'amenuisent en allant vers la surface (figure 2.15). A l'approche de la position L_j , où le régime d'écoulement n'est plus torrentiel, le profil des vitesses devient quasi-uniforme. On constate également que d'une section à l'autre les vitesses diminuent progressivement et augmentent avec l'augmentation du nombre de Froude.

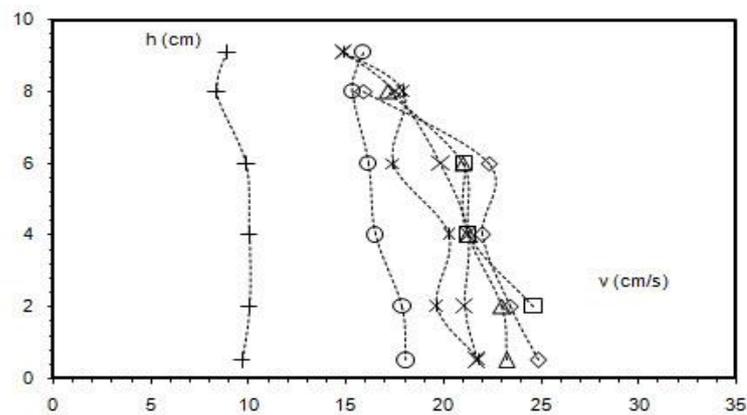


Figure 2.15 : Ressaut classique. Profil des vitesses moyennes horizontales dans l'axe de symétrie du canal, pour différentes positions $x(\text{cm})$: (\square)30, (\diamond)40, (\triangle)50, (x)60, ($*$)70, (o)90, ($+$)110. $h_1=2,3 \text{ cm}$. $IF_1 = 5,35$. $L_j = 100 \text{ cm}$, $h_2=9,6 \text{ cm}$.

Par ailleurs, les mesures expérimentales montrent la présence d'un rouleau de fond. Celui-ci n'apparaît clairement que pour des nombres de Froude relativement importants. A titre d'exemple, pour une hauteur amont $h_1 = 5,2 \text{ cm}$, le rouleau de fond apparaît à partir de $IF_1 = 3,67$. Ce dernier évolue dans un intervalle de position relative : $1/3 \leq x/L_j \leq 3/5$ (Figure 2.16) Debabeche (2003).

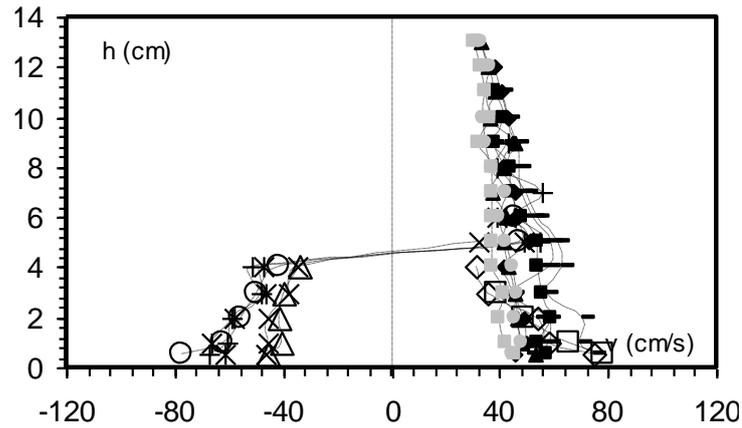


Figure 2.16 : Ressaut classique. Profil des vitesses moyennes horizontales dans l'axe de symétrie du canal, pour différentes positions x (cm) : (\square)30, (\diamond)40, (\triangle)50, (\times)60, ($*$)70, (o)80, ($+$)90, ($-$)100, ($-$)110, (\blacksquare)120, (\blacklozenge)130, (\blacktriangle)140, (\bullet)160. $h_1=5,2$ cm. $IF_1=3,69$. $L_j=150$ cm, $h_2=13,5$ cm.

Debabeche (2003) faire une analyse des relations qui peuvent exister entre la vitesse au fond V_f et les autres caractéristiques du ressaut. L'étude expérimentale a montré, dans un premier temps, qu'une relation peut exister entre la vitesse moyenne horizontale relative au fond V_f/V_1 et le nombre de Froude IF_1 , pour différentes positions x . La vitesse relative V_f/V_1 diminue progressivement avec l'augmentation de IF_1 . (Figure 2.17)

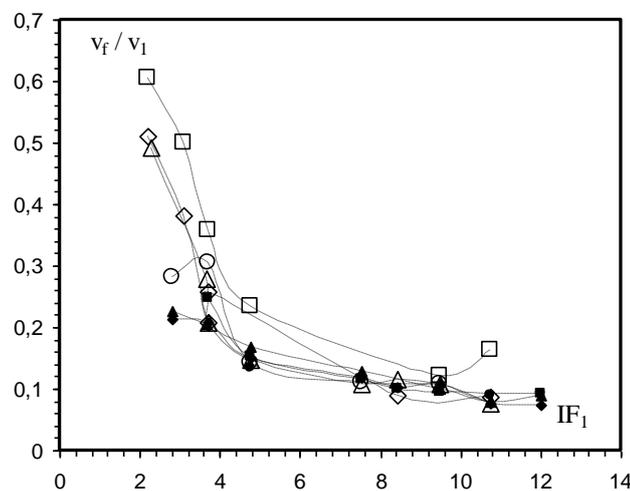


Figure 2.17 : Ressaut classique en canal profilé en "U". Variation de la vitesse moyenne horizontale relative V_f/V_1 en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, pour huit positions x : x (cm) = :(\square)30, (\diamond) 50, (\triangle)70,(o)90, (\blacksquare)110, (\blacklozenge)130, (\blacktriangle)160, (\bullet)180.

II.5 Ressaut hydraulique contrôlé dans un canal triangulaire

II.5.1 Etude de Debabeche (1996)

Le travail de Debabeche (1996) a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince et épaisse, dans un canal de section droite triangulaire à angle d'ouverture de 90°. L'expérimentation a eu pour objectif de donner un aperçu qualitatif sur la répartition des vitesses le long de l'axe longitudinal du canal des mesures, à l'intérieur du ressaut et à l'aval de celui-ci. La mesure des vitesses horizontales est effectuée par le micro moulinet.

Nous donnerons un exemple de ces expériences menées par les conditions du ressaut hydraulique dans le tableau suivant :

Tableau 2.2 : conditions hydraulique respectif à 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

Avec : h_1 la hauteur de la section initiale, et Δx la tranche de l'écoulement précédent le ressaut.

II.5.1.1 Résultats expérimentaux

Les auteurs s'aperçoivent, qu'à la section de l'écoulement de profondeur $h = 9\text{cm}$, située à $x = 20\text{ cm}$ à l'aval de la section initiale du ressaut, que les vitesses sont également très élevées en tout point situé à une distance inférieure ou égale à $h = h_1 = 5\text{cm}$, comptée à partir du fond du canal. La vitesse moyenne de l'écoulement est $V_1 = 380\text{ cm/s}$, chacune des particules liquides constituant l'écoulement initial du ressaut est ainsi animé d'une vitesse moyenne supérieure à 300 cm/s .

D'après Debabeche (1996), cette influence s'amenuise au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'aval, jusqu'à la section située à environ $x = 2.L_r/3$ du pied du ressaut. Les figures 2.18 à 2.21 montrent, pour l'exemple précédemment cité, des profils des vitesses horizontales tracés dans quelques sections verticales à l'intérieur du domaine occupé par le ressaut ; la position de ces sections est définie par la distance relative x/L_r , où L_r désigne la longueur du rouleau. Les lignes horizontales représentées en trait discontinu indiquent la hauteur initiale h_1 du ressaut. La zone située en dessous de ces lignes correspond à la zone d'influence du jet sortant et pour laquelle les vitesses n'ont pu être évaluées en raison de leurs valeurs élevées.

La figure 2.21 indique que la vitesse de cette particule est passée d'une valeur initiale supérieure à 300 cm/s à une valeur finale de l'ordre de 60 cm/s sur une distance $x = 2.L_r/3$.

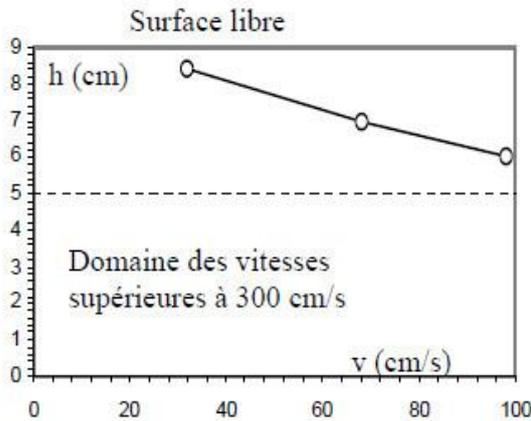


Figure 2.18: profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située à $x/L_r=0,12$.

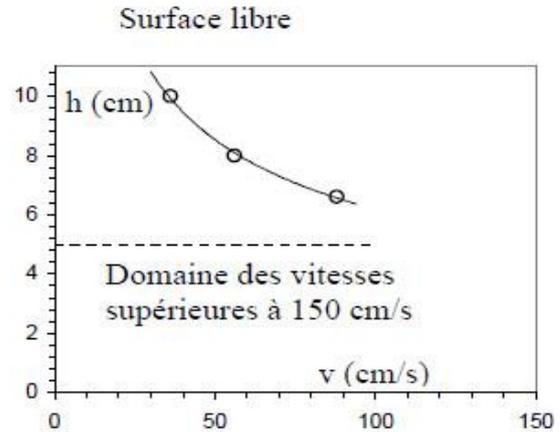


Figure 2.19: profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située à $x/L_r = 0,2$.

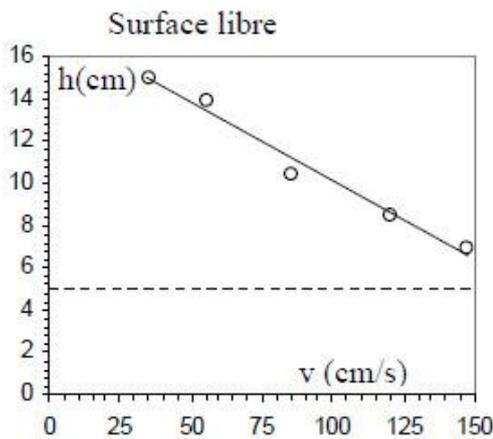


Figure 2.20 : profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située à $x/L_r = 0,41$.

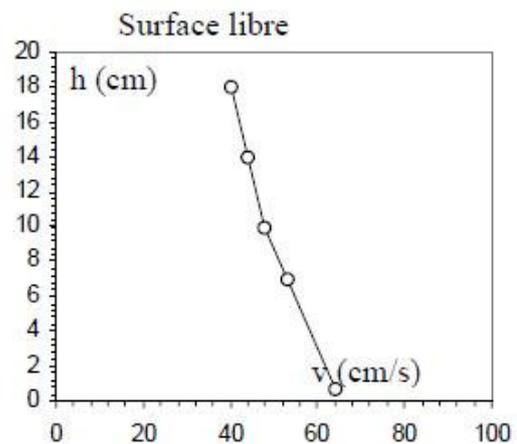


Figure 2.21: profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située à $x/L_r = 0,65$.

Cette réduction notable de la vitesse pourrait s'expliquer par la répartition spatiale du jet caractérisant l'écoulement incident, le long de la distance x . On peut s'apercevoir en effet que le jet, peu noyé à l'origine de l'écoulement, diverge sous une hauteur d'eau de plus en plus importante. A une certaine distance du pied du ressaut, le jet se décolle graduellement du fond du canal en laissant place à une zone d'eau claire d'épaisseur croissante.

Debabeche (1996), pensé que le cas du ressaut en canal de section droite triangulaire, le rouleau qui le caractérise n'est pas un rouleau de surface tel que celui que l'on peut observer du moins dans un canal rectangulaire. Les profils des vitesses représentés dans les

figures 2.18 à 2.21 et qui concernent le domaine occupé par le ressaut, n'indiquent par ailleurs aucune vitesse "négative" dans l'axe longitudinal du canal pouvant traduire l'existence d'un réel rouleau de surface. Les auteurs signalent cependant que les quelques observations effectuées montrent des zones de retour de l'écoulement, situées latéralement de part et d'autre de l'axe longitudinal du canal.

Les auteurs ont représenté dans les figures 2.22 et 2.24, quelques uns d'entre eux définis pour les sections situées respectivement à $x/L_r = 1,1$, $1,2$, $1,3$ et $1,5$. Les sections considérées sont localisées à la distance x comptée à partir du début du ressaut et telles que $L_r < x < L_j$, $x = 1,05.L_j = 210\text{cm}$ et enfin $x = 1,29.L_j = 258\text{cm}$.

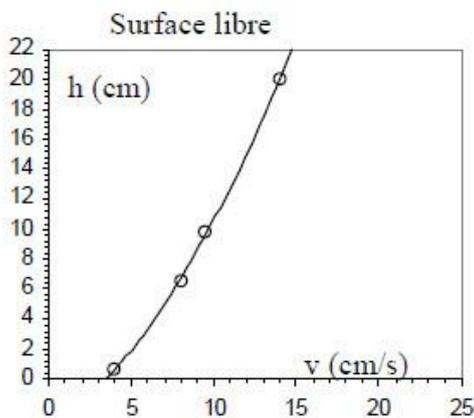


Figure 2.22 : profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située à $x/L_r = 1,10$.

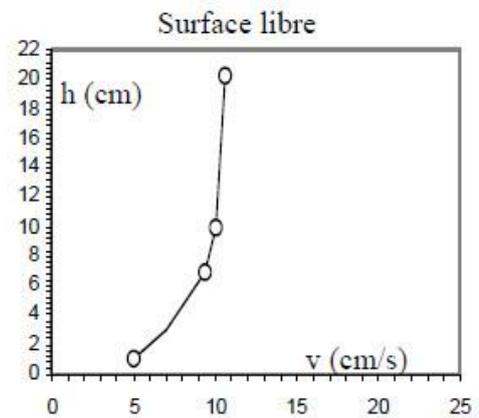


Figure 2.23: profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située à $x/L_r = 1,23$.

Le profil intermédiaire représenté sur la figure 2.24 montre enfin une répartition quasi uniforme de la vitesse sur 70% de la profondeur de l'écoulement.

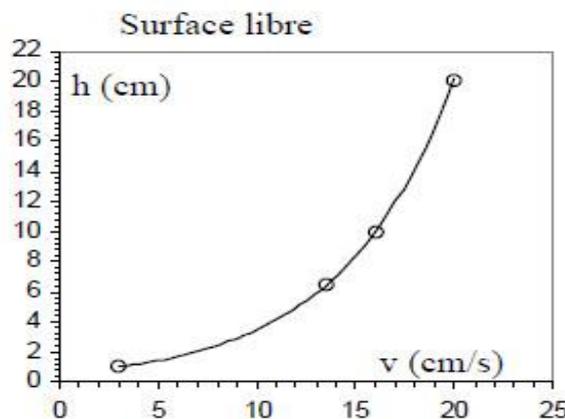


Figure 2.24: profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située $x/L_r = 1,50$.

Les profils obtenus montrent que les vitesses deviennent de plus en plus faibles au fond du canal. Une réduction de la vitesse à la surface libre de l'écoulement est également perceptible à l'exception du cas représenté par la figure 2.24 ; ceci pourrait s'expliquer par la présence du seuil à paroi mince contrôlant le ressaut, placé à proximité de la section de mesure.

II.6 Domaine des canaux composé

Sellin (1964) a conduit un nombre d'essais dans un canal composé et est arrivé à un résultat du mécanisme de transfert d'impulsion dans un canal composé qui est dû à la vitesse relative entre le canal principal et la plaine d'inondation. Il a étudié les tourbillons qui se forment à l'interface du canal principal et de la plaine inondable. Il a analysé le débit et les vitesses pour les conditions composées et simples. Il a observé que la vitesse se trouvait plus grande dans la condition simple que celle de l'état composé.

II.7 Conclusion

Ce dernier chapitre de notre étude bibliographique, a été consacré aux principaux travaux entrepris dans le domaine de la distribution des vitesses dans le ressaut hydraulique.

Dans le premier lieu nous avons présenté quelques travaux dans les types des canaux rectangulaire et profilé en "U". Le cas du ressaut classique, nous avons passé en revue les travaux de Schroder (1963), Rajaratnam et Subramanya dans les années (1968) et (1970), et Hager (1992), leurs études ont permis de trouver des relations fonctionnelles liant les caractéristiques du ressaut à la variation des vitesses. De plus, nous avons présenté une partie des résultats obtenus dans le domaine des vitesses horizontales dans un canal rectangulaire de l'étude de Chen et al (2014). Le deuxième cas, une étude expérimentale sur la distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique classique dans un canal profilé en "U" a été menée par Debabeche (2003).

En deuxième lieu nous avons présenté un travail presque détaillé dans un canal de section triangulaire de Debabeche (1996) s'est intéressée à la distribution des vitesses dans le ressaut hydraulique, quelques profils des vitesses horizontales ont été représentés.

CHAPITRE III
Description du model

Chapitre III

Description du model

III.1 Introduction

Dans ce chapitre de cette partie expérimentale, nous allons d'abord exposer une description détaillée au model expérimental, et faire la description des essais des différents appareillages des mesures utilisées.

III.2 Description du canal

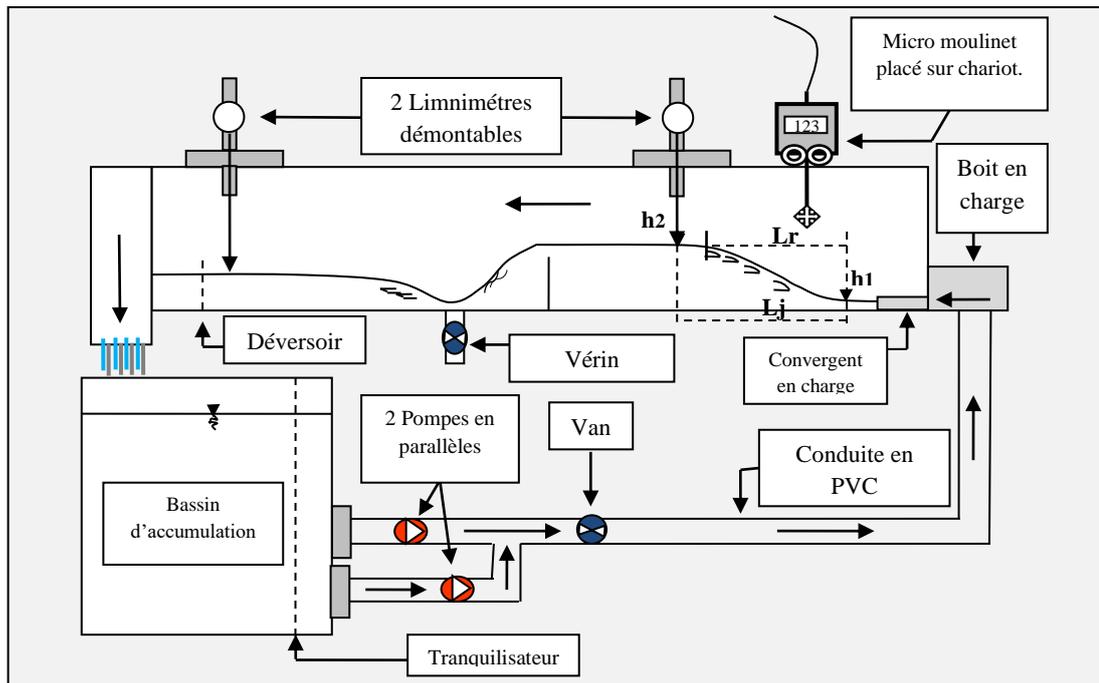


Figure 3.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal, ayant servi à l'expérimentation

Le canal expérimental (figure 3.1) et (figures 3.2.a et 3.2.b) est constitué d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure de section droite trapézoïdale symétrique à base rectangulaire l'angle d'inclinaison des talus de trapèze est de 45° , par une conduite de PVC circulaire de 115 mm de diamètre. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe (figure 3.3) qui alimente un convergent en charge débouchant dans le canal de mesure. La longueur du canal est de 5 m (une distance suffisante pour la formation du ressaut), il est relié dans sa partie aval à un autre canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale (figure 3.6), permettant la mesure directe du débit. Nous avons équipé ce canal d'un chariot attaché à une Micromoulinet pour mesurer les vitesses.



Figure 3.2.a : Photographie du model expérimentale du canal



Figure 3.2.b : Photographie de la forme du canal



Figure 3.3 : Pompe centrifuge axiale

III.3 Appareillages de mesure

III.3.1 Limnimètre

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à l'ouverture due à la section de sortie du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été évaluées par un Limnimètre. L'instrument est formé d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnimétrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau (figure 3.4).

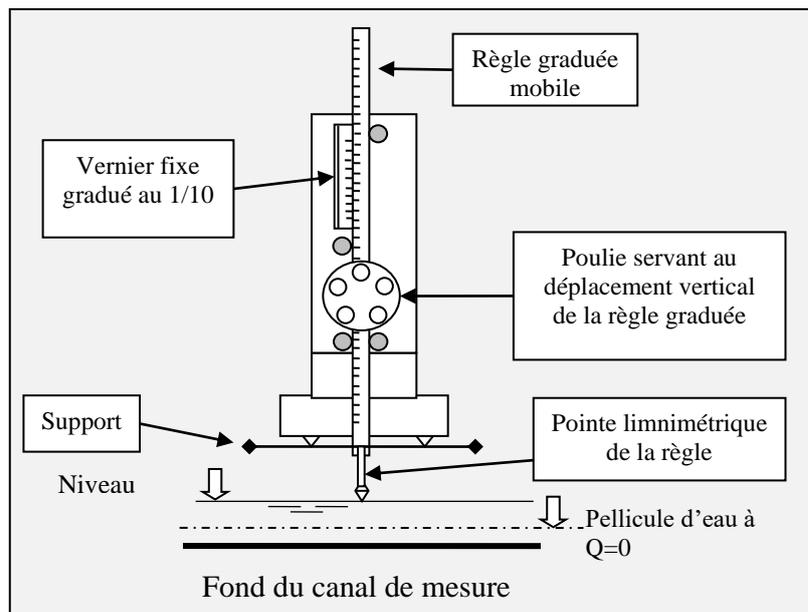


Figure 3.4 : schéma descriptif de Limnimètre

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

III.3.2 Mesure du débit

Le débit volume Q ainsi que la profondeur h_d sont les seules grandeurs qui nécessitent un appareillage spécifique. Mais la position x du seuil mince ainsi que sa hauteur géométrique s sont simplement mesurées à l'aide d'un ruban gradué et la hauteur initiale h_1 du ressaut est assimilée à l'ouverture du convergent en charge générant l'écoulement incident ($h_1=2$ et 3 cm) (figure 3.5), après avoir positionné le pied du ressaut à environ $\Delta x \approx 5$ cm. En mesure la profondeur H_d à l'aide d'un Limnimètre à vernier à double précision.

Chapitre III : Description du model

Les mesures de H_d obtenues seront injectées plus tard dans la formule de Hachemi Rachedi L. (2006), pour le débitmètre à déversoir rectangulaire (figure 3.6).

Le débit volume est obtenu en insérant la hauteur h dans l'équation (3.1) du déversoir.

$$Q = 0,3794B\sqrt{2g}\beta(1 + 0,16496\beta^2,0712)^{(3/2)}H_d^{(3/2)} \quad (17)$$

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 3.5 : Photographie de la série des convergents



Figure 3.6 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit.

III.3.3 Mesure de vitesse

La mesure de vitesse moyenne initiale $V_1 = Q/A_1$ est effectuée par la mesure de débit, mais la mesure des vitesses locales est effectuée au moyen d'un Micromoulinet (figure3.7.a), relié à un appareil s'appelle L'indicateur permettant la lecture de la fréquence du signal émis par la rotation de l'hélice, ce dernier, analyser le signal puis afficher les résultats de vitesse sur leur écran (figure3.7.b), et aussi par l'ordinateur (figure3.7.d) sous la forme d'une valeur numérique et d'une courbe graphique qui exprime la vitesse, le tout affiché via une application logicielle propre à l'appareil de transfert (figure3.7.c)

L'indicateur, un appareil portable de fréquence 50-60 Hz, alimenté par 4 piles chargeable de 4.8V/500mA, peut lire la fréquence dans une seconde ou 10 secondes. Le Micromoulinet est capable de fournir des valeurs de vitesses locales allant jusqu'à 150 cm/s.

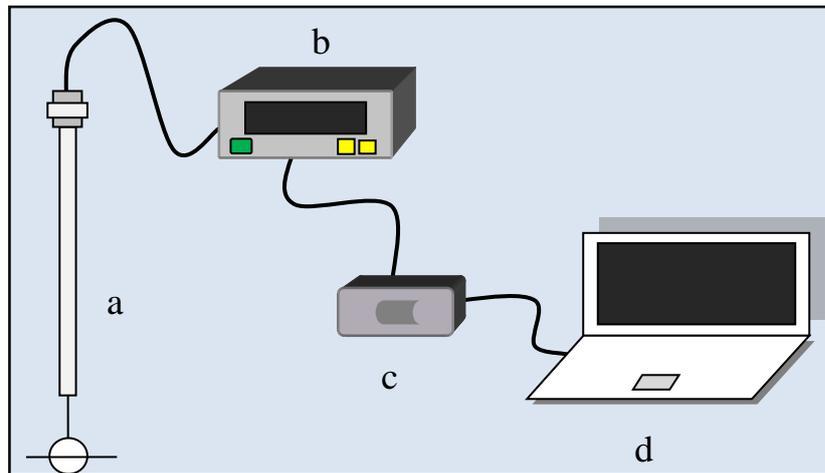


Figure 3.7 : Micromoulinet et ses appareils annexes

a) Micromoulinet b) L'indicateur c) Appareil de transfert d) Ordinateur

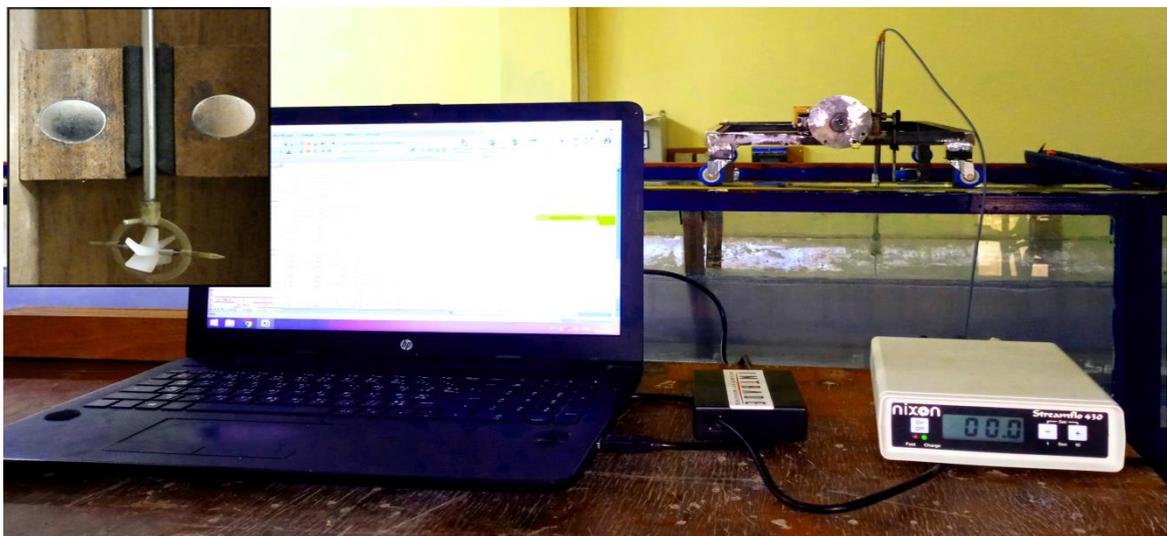


Figure 3.8 : Photographie de la Micromoulinet et ses appareils annexes

III.4 Protocole des essais

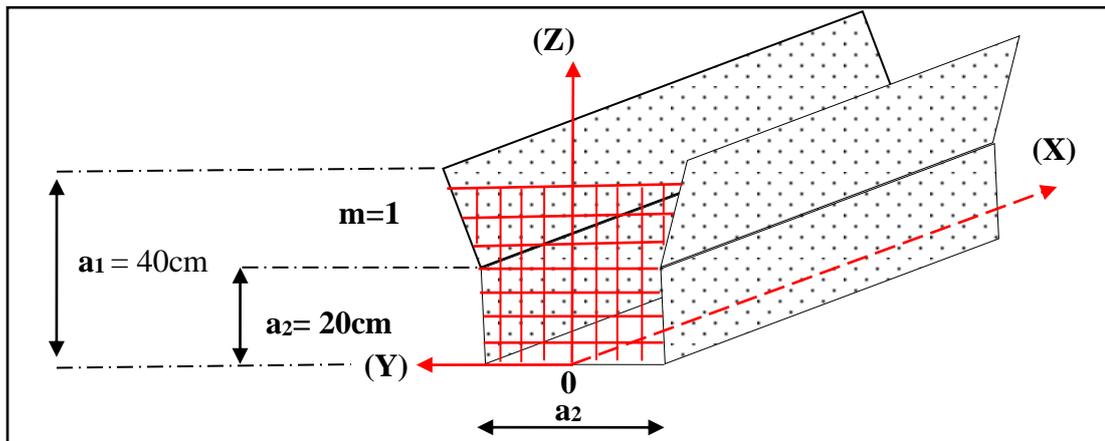


Figure 3. 9: Maillage et système d'axes adoptés pour la mesure des vitesses horizontales.

Les axes de coordonnées sont définis dans la figure 3.9 comme suit :

1. L'axe x - 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.
2. L'axe y - coordonnée transversale - parcourt la largeur du canal ; le zéro est placé dans l'axe du canal.
3. L'axe des z - coordonnées verticales - possède son zéro sur le fond horizontal du canal.

III.4.1 Opération de mesure de la vitesse

Pour chaque essai de ressaut et pour un nombre de Froude incident IF_1 donné, les opérations suivantes sont effectuées :

- 1- On fixe d'abord la position longitudinale x et la position transversale y, puis on fait varier la hauteur z.
- 2- Une fois l'axe des z entamé, on fait alors varier y d'un pas et on varie une seconde fois la hauteur z, tout en maintenant la position x fixe.
- 3- L'axe des Y entamé, on fait varier la coordonnée x d'un pas, on refait ensuite les opérations 1 et 2, et ainsi de suite jusqu'au balayage complet de l'axe des x.

Pour chaque coordonnée (x, y, z) de la position de l'axe de l'hélice de la sonde du Micromoulinet, correspond une mesure de vitesse moyenne horizontale $V(x, y, z)$. Cette mesure est effectuée en 30 secondes de temps environ, représentant la moyenne d'une dizaine de valeurs de vitesses horizontales en un point.

III.5 Seuils

Les seuils utilisés dans notre dispositif expérimental, sont façonnées de fer en forme rectangulaire, nous avons préparé deux seuils de différentes hauteurs ($s=14$ cm ; 15 cm) avec le support du seuil (figure 3.9).

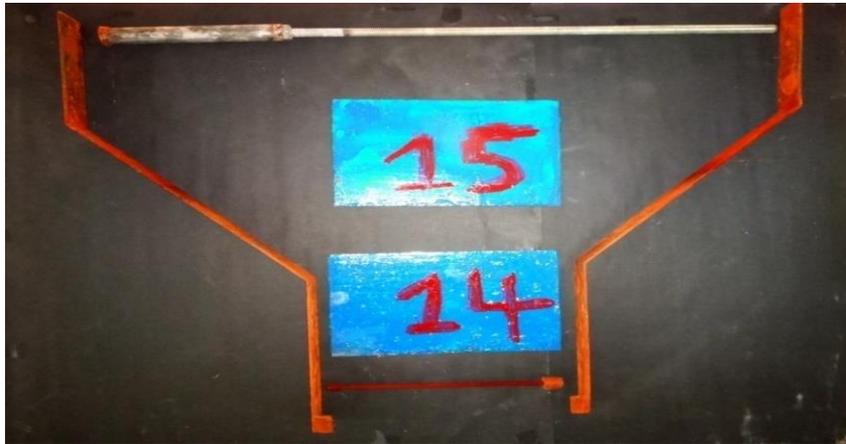


Figure 3.10 : Photographie des seuils minces testés avec le support de fer.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre à l'étude du modèle expérimental, qui a servi de base dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal à section droite trapézoïdal à base rectangulaire. Nous avons abordé les appareils de mesure utilisés dans ce travail de laboratoire nous les avons illustré par des photographies, dans le but de prendre toutes les mesures nécessaires quant aux caractéristiques du ressaut hydraulique.

Pour les mesures des débits, nous avons utilisé le débitmètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de Hachemi Rachedi L. (2006) vu sont efficacité et nous avons abouti à des résultats acceptable. La hauteur H_d a été mesurée à l'aide de limnimètre.

Après nous avons présenté l'appareil de la mesure des vitesses le Micromoulinet et ses appareils annexes. Ensuite, nous avons présenté le protocole des essais et les opérations de mesure de la vitesse.

CHAPITRE IV

Etude expérimentale

Chapitre IV

Etude expérimentale

IV.1 Introduction

À travers ce chapitre nous allons analyser expérimentalement le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince évoluant dans un canal composé (trapézoïdal à base rectangulaire), de pente nulle.

Notre étude se propose d'examiner, la distribution transversale et longitudinale des vitesses dans le ressaut hydraulique, Deux hauteurs initiales ($h_1= 2$ et 3cm) ont été testées chacun correspond un nombre de Froude ($IF_1= 8,22$ et $10,06$) incident a été ainsi obtenue. A la fin de cette étude, nous tenterons de présenter la relation entre les vitesses relatives et la position relative.

IV.2 Description des essais

Dans ces essais, nous avons effectué deux expériences différentes en termes de débit et de nombre de Froude IF_1 . Un seuil à paroi mince placé à une distance L_s du début du ressaut, provoque l'apparition de ce dernier (figures 4.1 et 4.2). L'accroissement du nombre de Froude IF_1 entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation de sa longueur de rouleau L_r . La distance ΔX sur laquelle le ressaut s'étend augmente également et pour ramener celui-ci dans sa position initiale, c'est à dire à environ 5cm de la sortie du convergent, le seuil de hauteur s doit être surélevé tout en le déplaçant vers l'aval.

Pour ces deux expériences de ressaut contrôlé sont présentée la distribution des vitesses moyennes horizontales de 26 sections transversales et de 7 sections longitudinales.

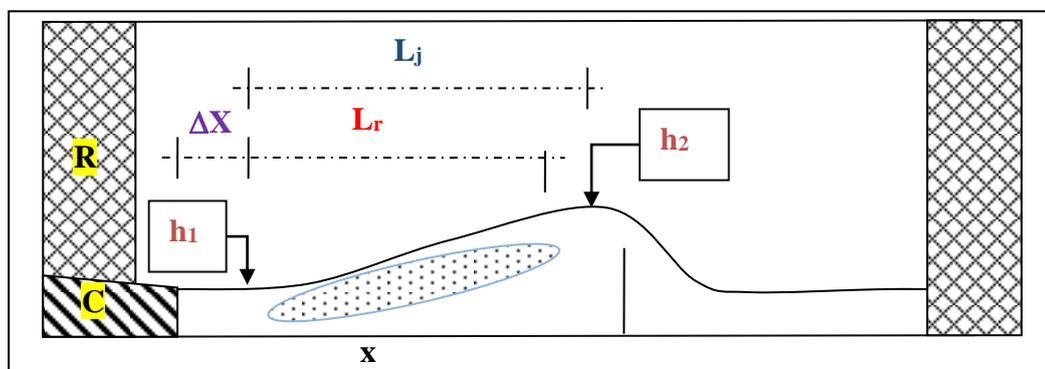


Figure 4.1 : Ressaut contrôlé h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x position du seuil par rapport au pied du ressaut, ΔX distance séparant le convergent du pied du ressaut, C convergent, R réservoir.

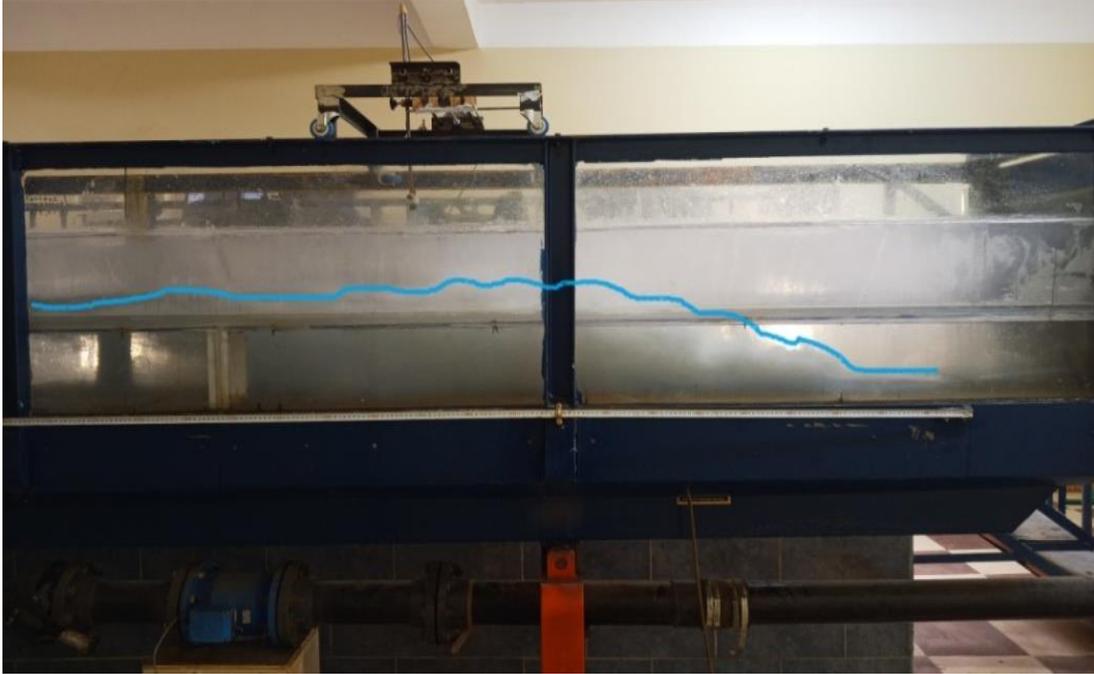


Figure 4. 2: Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé évoluant dans un canal trapézoïdal à base rectangulaire, $IF_1=8,22$, $s=15\text{cm}$, $L_s= 400\text{cm}$, $L_j= 232$, $h_2=28,4\text{cm}$, $h_1=3\text{cm}$.

Dès l'obtention de la forme complète du ressaut, (figure 4.1), nous effectuerons pour chaque hauteur s et position x du seuil les étapes suivantes :

1. Mesure de la hauteur déversant H_d .
2. Calcul du débit volume Q correspondant à H_d , par application de la relation (3.1).
3. Calcule le nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident par l'application de la relation suivante:

$$IF_1^2 = \frac{Q^2}{g \cdot b^2 \cdot h_1^3} \quad (4.1)$$

Nous mesurons également les paramètres suivants:

- ✓ La longueur du rouleau (L_r),
- ✓ La longueur du ressaut (L_j)
- ✓ La hauteur conjuguée aval du ressaut (h_2).
- ✓ Calcule la section initiale de convergent A_1 , où $A_1= a_2 \cdot h_1$.

IV.3 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux sont composés de deux grandes expériences, pour la première, une étude de 648 points de mesure de vitesse, afin de confirmer les résultats obtenus nous avons mené une seconde expérience de 286 points mesuré pour clarifier la répartition générale des vitesses dans le ressaut de notre canal.

Pour connaître le sens de l'écoulement de l'eau en attachant un fil de plastique de 3,5cm de long à 3mm au-dessus d'hélice, où les valeurs de vitesse négatives représentent la direction inverse du l'écoulement dans le canal.

IV.3.1 Première expérience

Les conditions et les paramètres du ressaut hydraulique de la première expérience, sont consignés au tableau 4.1 :

Tableau 4. 1: Conditions et paramètres hydraulique respectif à la première expérience.

IF ₁	Q (l/s)	A ₁ (cm ²)	H _d (cm)	s (cm)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	L _s (cm)	L _r (cm)	L _j (cm)
8,22	26,78	60	16	15	3	28,4	400	189	232

Dans le fond du canal et pendant les premiers 110 cm a partir du convergent, on constate une grande turbulence, qui empêche l'enregistrement des vitesses élevées où l'appareil ne peut pas lire les fréquences de cette partie. La vitesse des particules dans le pied de ressaut hydraulique est supérieure à 300 cm/s, la vitesse moyenne initiale $V_1 \approx 446,26$ cm/s.

La vitesse maximale provoque une perturbation majeure de l'eau, cette perturbation à un grand rôle dans la génération du rouleau et la création des bulles d'aire de tailles différentes. Certaines bulles ont une direction opposée à la direction de l'écoulement de l'eau dans le canal, le rouleau se termine par la disparition de ces bulles d'aire où on constate que l'écoulement d'eau dans le canal est devenu progressivement calme, et les vagues d'eau diminuent, ce qui nous aide à déterminer h₂ hauteur finale de l'écoulement par observation continue, et à cette hauteur nous concluons la longueur approximative du ressaut L_j.

IV.3.1.1 Distribution Longitudinale des vitesses

La répartition des vitesses moyennes horizontales dans les tableaux 4.2 est donnée de sept (07) sections longitudinales réparties sur la largeur du canal, dans les positions Y (cm)= 0, -4, +4, -8, +8, -10, +10 telle que Y= 0 représente l'axe de symétrie du canal.

Les mesures expérimentales des vitesses en fonction de leurs positions sont présentées dans des tableaux, ces résultats sont tracés dans des courbes au-dessous.

Tableau 4.2 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y = 0

Avec :

- h : hauteur comptée à partir du fond du canal (cm).
- x : coordonnée longitudinale du canal (cm).
- y : coordonnée transversale du canal (cm).
- Les vitesses sont mesurées en cm/s.

Y= 0cm										
h \ x	120	130	140	150	160	170	180	190	200	
5	150,5	92,5	34,49	-102,54	25,02	55,96	14,52	21,83	12,36	
15	-148,09	-88,6	130,89	102,17	60,61	63,15	56,34	45,02	16,76	
22	-137,78	-120,6	-103,41	92,75	82,1	68,01	53,91	46,21	38,14	
26	-148,09	127,37	126,36	102,92	79,47	78,5	77,51	73,5	69,43	
	210	220	230	240	250	260	270	280	290	
5	12,7	9,53	21,94	22,38	22,62	9,14	17,06	16,91	16,76	
15	48,43	24,37	31,65	31,01	30,35	25,95	20,17	17,15	14,12	
22	37,01	35,09	31,62	32,06	32,5	28,3	28,99	28,14	27,29	
26	73,77	76,98	72,34	71,04	69,74	62,51	65,07	63,66	62,25	
	300	310	320	330	340	350	360	370	380	
5	17,87	28,2	22,31	16,42	29,86	17,35	26,93	31,18	19,3	
15	19,3	23,32	18,57	13,82	25,258	13,04	22,96	16,13	33,24	
22	26,27	29,02	28,59	28,15	32,26	34,19	36,12	38,87	41,63	
26	62,02	62,18	60,35	58,5	53,6	57,81	52,02	56,32	50,63	

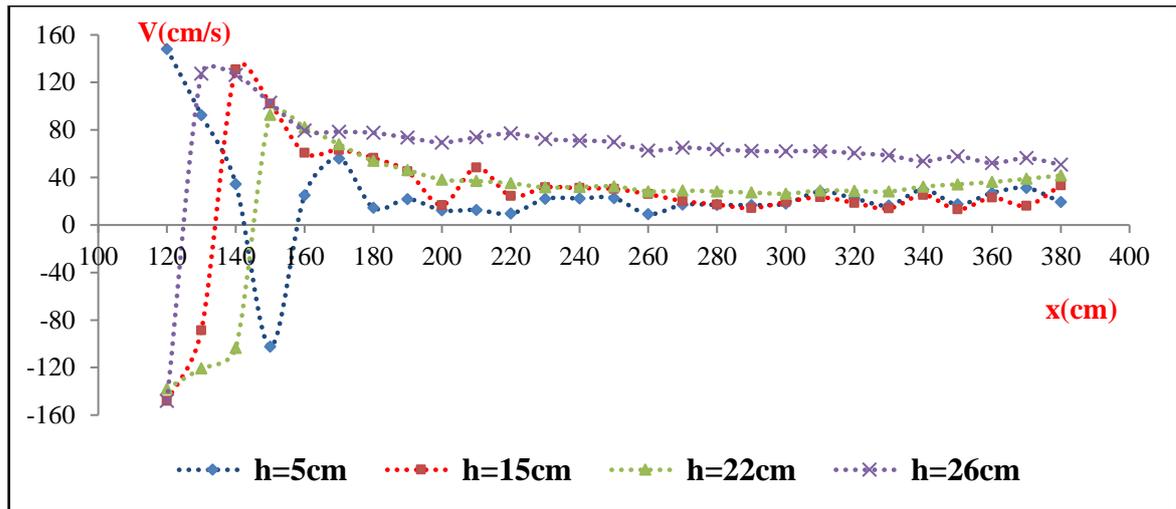


Figure 4. 3: Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=0$, pour différentes positions x (cm), $x < L_s$.

A la position $x < 120$ cm, un jet non perturbé dépassant 150 cm/s est présent, commence à la sortie du convergent et allant en s'amenuisant jusqu'à la section $x < 130$ cm, les valeurs de vitesse maximales au fond du canal se trouvent à l'amont de cette dernière section à cause du jet sortant du convergent. Hager (1992), Debabeche (1996) et Chen et al (2014) ont noté, qu'à la section de l'écoulement de faible profondeur compté à partir du fond du canal et à l'amont de la section initiale du ressaut, que les vitesses sont très élevées en tous les points en se rapprochant à la convergent. A $x = 120$ cm en remarque que la vitesse au fond du canal est très élevée ($V > 148$ cm/s), et à partir la position $x = 130$ cm la vitesse est diminuée en devenant égale environ 90 cm/s. Au-delà de celle-ci et pour la position $x = 140$ la vitesse diminue progressivement jusqu'à $x = 250$ cm, une valeur minimale d'environ 21 cm/s à une hauteur $h = 5$ à 15 cm à partir du fond de canal. Les derniers 150 cm restant avant le seuil, la vitesse moyenne au fond du canal est faible, certains points peuvent atteindre moins de 10 cm/s, cela rend l'écoulement stable (presque semi-uniforme).

Quant à la vitesse moyenne de la surface, on remarque qu'elle diminue de la même manière de la vitesse du fond, les vitesses sont variées entre 148 à 70 cm/s et peut atteindre moins de 50 cm/s, les valeurs négatives et positives indiquent la direction du mouvement des courants d'eau. Hager (1992) a noté qu'il y'a des vitesses opposées à la direction principale de l'écoulement dans la surface du canal. En approchant du seuil de 50 cm, on remarque sur la surface une couche semi-uniforme de l'écoulement parallèle au fond du canal sur cette distance.

La figure 4.4 montre brièvement la distribution générale des vitesses au centre du canal $Y = 0$. Au début du ressaut, nous remarquons la présence des vitesses maximales ainsi que des courants inverses la direction de l'écoulement de l'eau.

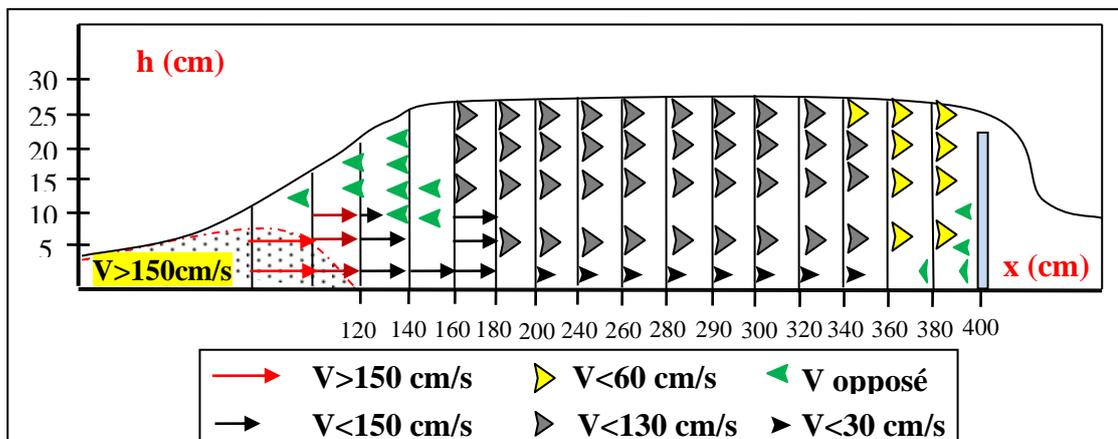


Figure 4.4 : Distribution des vitesses moyennes pour la section longitudinale $Y = 0$.

Les valeurs de la vitesse horizontale moyennes dans chaque pas (x) sont approximativement indiquées sur la figure 4.4, où les vitesses diminuent lorsque la direction se dirige vers le seuil, nous avons évalué cinq valeurs principales qui représentent la base des changements de vitesse dans la section longitudinale $Y = 0$.

Tableau 4.3 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -4$ cm

Y = -4cm											
h \ x	120	130	140	150	160	170	180	190	200		
5	143,69	90,16	-42,32	41,74	31,17	27,29	10,11	12,25	9,77		
15	-146,48	141,61	99,7	78,97	58,65	45,6	30,47	28,91	10,57		
22	-111,58	110,35	114,17	91,02	86,12	70,03	58,89	54,5	39,43		
26	-148,09	125,14	99,65	100,36	103,81	85,5	77,07	66,8	52,64		
	210	220	230	240	250	260	270	280	290		
5	21,21	9,38	22,69	20,56	22,69	17,69	19,75	22,19	22,69		
15	25,7	11,48	23,1	25,7	20,55	23,24	29,38	19,97	23,33		
22	34,16	23,6	28,8	32,02	40,38	24,58	29,47	31,8	32,02		
26	52,97	42,75	44,01	40,7	46,11	48,62	41,07	43,52	45,19		
	300	310	320	330	340	350	360	370	380		
5	20,21	24,58	19,68	19,5	18,72	21,7	26,63	24,17	31,87		
15	22,68	35,08	41,5	29,01	19,35	22,69	25,7	44,2	51,53		
22	24,68	30,64	39,87	33,75	32,02	33,4	28,66	36,91	42,38		
26	51,01	49,18	40,92	43,34	45,19	40,7	45,11	41,07	34,16		

Les figures 4.5 et 4.6 illustrent une symétrie relative dans la distribution générale des vitesses dans le canal d'une section à l'autre pour les axes $Y = -4, +4$ cm.

À la position longitudinale $x = 120$ cm, à la surface du canal, la vitesse a des valeurs presque élevées, et peuvent dépasser 140 cm/s. On peut expliquer cet incident, que les deux axes sont séparés du centre du canal ($Y = 0$) de 4 cm seulement où les vitesses sont très élevées ce qui influe sur les cotés proches de cette axe. On remarque la vitesse de surface sont opposées à la direction de l'écoulement.

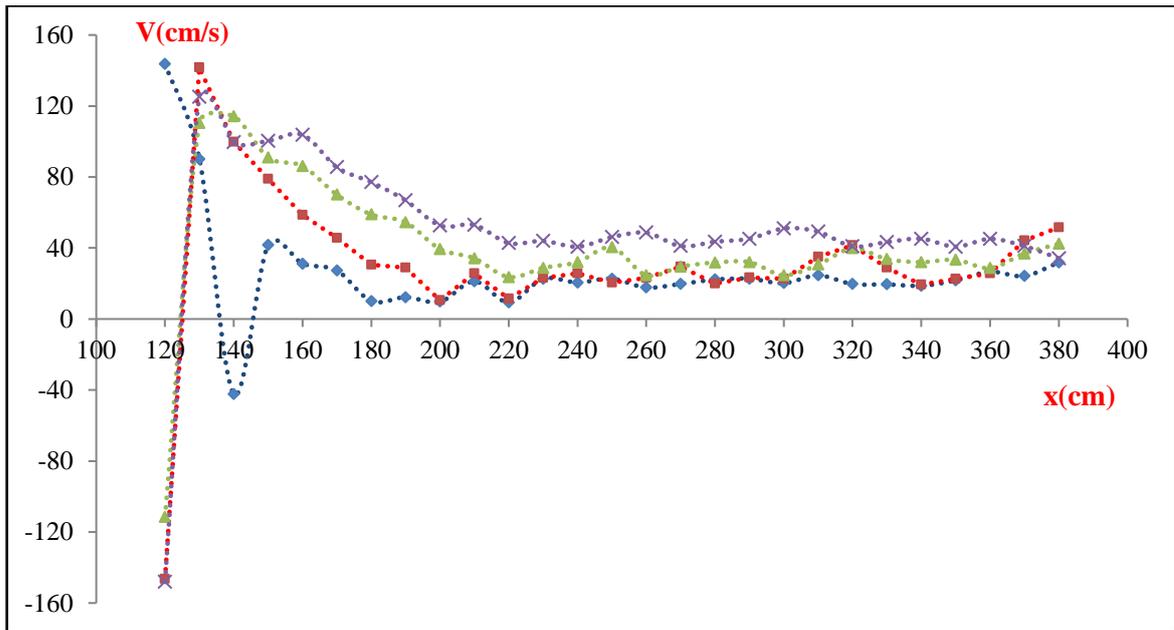


Figure 4.5 : Profil $Y = -4$ cm, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.3

A partir la position $x = 140$ cm la vitesse au fond diminuent lorsque la direction se dirige vers l'aval avec un pas de 20 cm, les valeurs de vitesse vont 38 à 10 cm/s.

A la surface, la même observation de la vitesse du fond s'applique à la vitesse de surface, les vitesses continuent de diminuer d'une section à l'autre presque proportionnellement dans toutes les sections le long du canal. Pour la dernière section avant le seuil, la vitesse atteint sa valeur minimale inférieure à 50 cm/s.

Les résultats présentés dans le tableau 4.4, exprimé à la figure 4.6, sont relativement similaires à ceux observés dans la figure 4.5.

Tableau 4.4 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = +4 \text{ cm}$

Y= +4cm										
h	x	120	130	140	150	160	170	180	190	200
5		-84,55	61,22	-37,53	22,81	-12,38	19,55	15,05	20,02	12,97
15		-108,85	100,4	93,59	79,13	59,59	60,15	44,72	31,9	18,71
22		-112,85	117,95	-105,61	94,41	80,06	82,34	62,42	55,71	34,16
26		-147,66	148,09	148,09	137,6	105,27	100,3	89,68	49,05	23,5
		210	220	230	240	250	260	270	280	290
5		21,05	7,77	20,66	25,14	19,7	17,75	15,39	22,5	8,04
15		29,34	17,01	20,95	28,4	19,54	16,13	25,1	21,76	23,47
22		30,06	24,19	31,46	21,21	27,38	19,45	28,9	33,21	39,14
26		39,47	44,01	40,23	46,11	52,5	53,27	49,89	50,78	49,45
		300	310	320	330	340	350	360	370	380
5		8,74	23,52	12,9	20,47	19,01	22,19	23,31	17,54	14,36
15		16,03	35,5	48,19	55,2	19,35	24,6	25,32	34,13	50,68
22		22,97	29,1	46,3	40,08	39,45	36,71	24,58	38,21	39,73
26		53,96	47,31	49,7	44,85	48,11	45,18	49,74	40,5	42,08

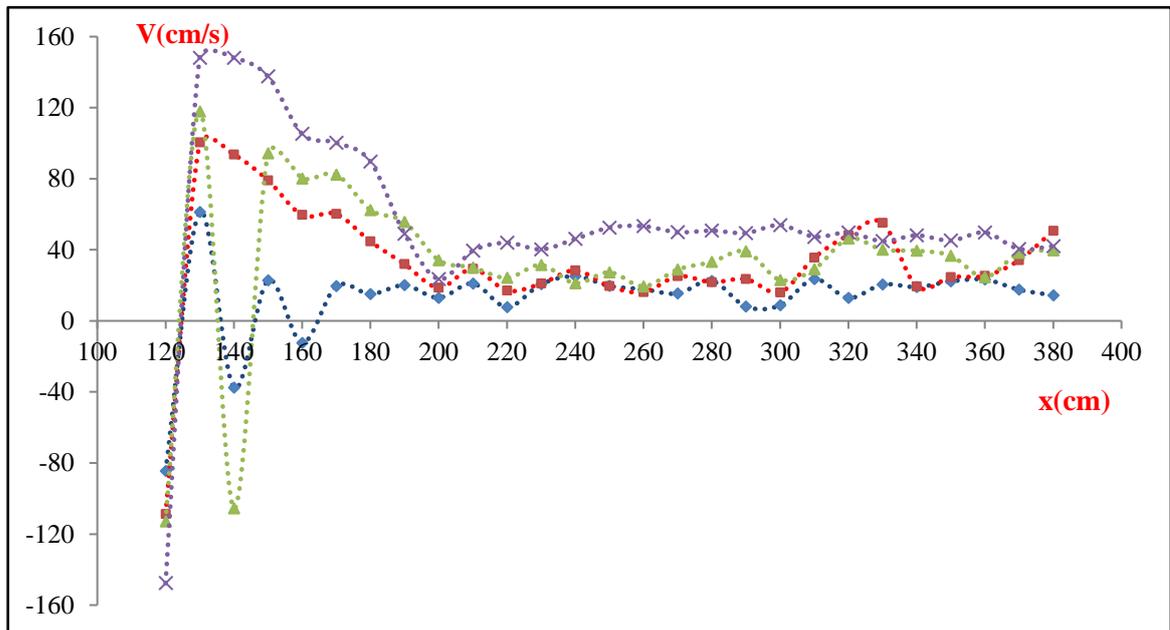


Figure 4.6 : Profil $Y = +4 \text{ cm}$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.3

Les figures 4.7 et 4.8 représentent la distribution de vitesse longitudinale dans les cotés du canal dans les axes $Y = -8, +8 \text{ cm}$, les figures laissent constater que la vitesse moyenne horizontale est légèrement plus faible que la vitesse de centre du canal. Dans les positions $x < 130 \text{ cm}$, la vitesse du rouleau est presque élevée à une hauteur de $h > 5 \text{ cm}$.

Tableau 4.5 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -8 \text{ cm}$

Y= -8cm										
h	x	120	130	140	150	160	170	180	190	200
5		140,98	111,25	81,48	123,4	24,92	21,87	10,41	19,74	7,7
15		148,09	117,1	86,02	64,46	45,99	37,19	46,66	21,11	19,58
22		-114,46	-118,5	-122,43	93,8	65,29	55,18	45,06	34,25	23,95
26		-148,09	136,39	124,68	121,52	118,37	108,44	98,67	72,88	48,33
		210	220	230	240	250	260	270	280	290
5		17,74	7,4	8,16	9,97	11,77	15,25	18,37	18,35	18,32
15		35,19	10,11	24,92	22,61	20,28	25,37	13,73	14,1	14,36
22		27,1	30,24	26,5	26,28	26,44	21,98	24,2	24,16	24,11
26		53,69	58,93	47,07	46,66	46,25	35,19	42,5	41,75	40,98
		300	310	320	330	340	350	360	370	380
5		18,67	12,07	16,28	20,33	17,19	16,95	22,43	27,17	28,88
15		25,95	17,97	17,4	16,82	18,32	11,08	35,23	14,8	29,2
22		20,38	24,11	24,99	25,72	28	29,14	30,27	41,47	40,68
26		43,02	40,05	42,81	44,22	41,33	46,12	44,88	40,48	41,08

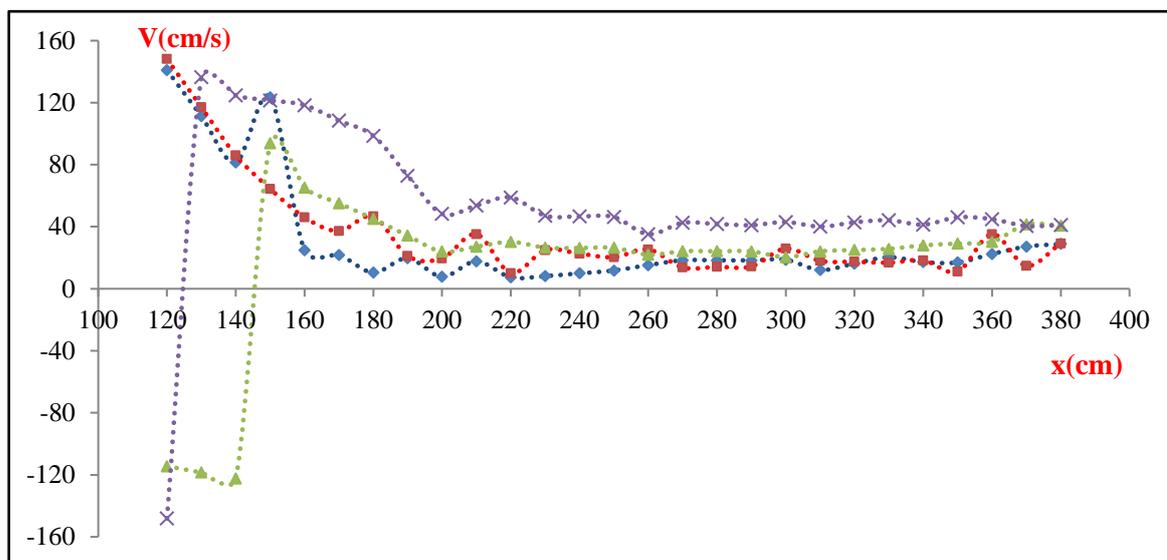


Figure 4.7 : Profil $Y = -8 \text{ cm}$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.3

Les vitesses négatives indiquent que la direction de l'écoulement est opposée à la direction du courant d'eau vers l'aval, nous trouvons cela en plusieurs positions, $x \text{ (cm)} = 120, 130, 140, 150$ et 160 . A partir de la position $x = 180 \text{ cm}$ on constate que la vitesse moyenne horizontale diminue progressivement et la valeur maximale de vitesse au fond de 9 à 38 cm/s . Pour les vingt centimètres avant le seuil, la vitesse au fond du canal atteignent leur vitesse minimale et peuvent atteindre moins de 6 cm/s .

Alors que la vitesse à la surface varie en raison du contact des particules liquides avec les parois du canal. Cette vitesse reste toujours plus élevée que ce qui a été observé au fond du canal.

Tableau 4.6: Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = +8 \text{ cm}$

Y= +8cm		120	130	140	150	160	170	180	190	200
h	x									
5		-56,64	-34,99	-43,34	-40,69	-26,63	27,01	20,1	19,69	10,79
15		-78,24	-68,31	-58,38	96,97	65,49	58,32	26,34	46,14	17,69
22		-75,17	-56,51	-37,85	-48,59	59,33	58,97	58,65	39,98	21,36
26		-148,09	-136,25	-124,43	106,47	88,51	72,52	56,55	72,56	88,57
		210	220	230	240	250	260	270	280	290
5		10,8	6,45	14,36	11,23	8,11	8,7	6,45	7,15	7,86
15		22,29	14,36	18,18	12,68	7,18	23,07	10,2	10,52	10,85
22		20,79	20,28	28,45	27,73	27,01	36,8	24,5	22,85	21,2
26		68,6	48,77	46,45	45,02	43,59	44,13	40,33	39,71	39,11
		300	310	320	330	340	350	360	370	380
5		6,45	9,38	9,08	8,79	10,51	7,4	8,67	6,5	6,45
15		17,05	8,59	8,84	9,08	18,38	8,43	32,57	7,77	48,68
22		17,64	21,2	21,32	21,43	25,22	21,16	17,09	24,8	32,59
26		43,44	38,59	35,01	31,42	32,26	31,43	30,59	35,8	41,05

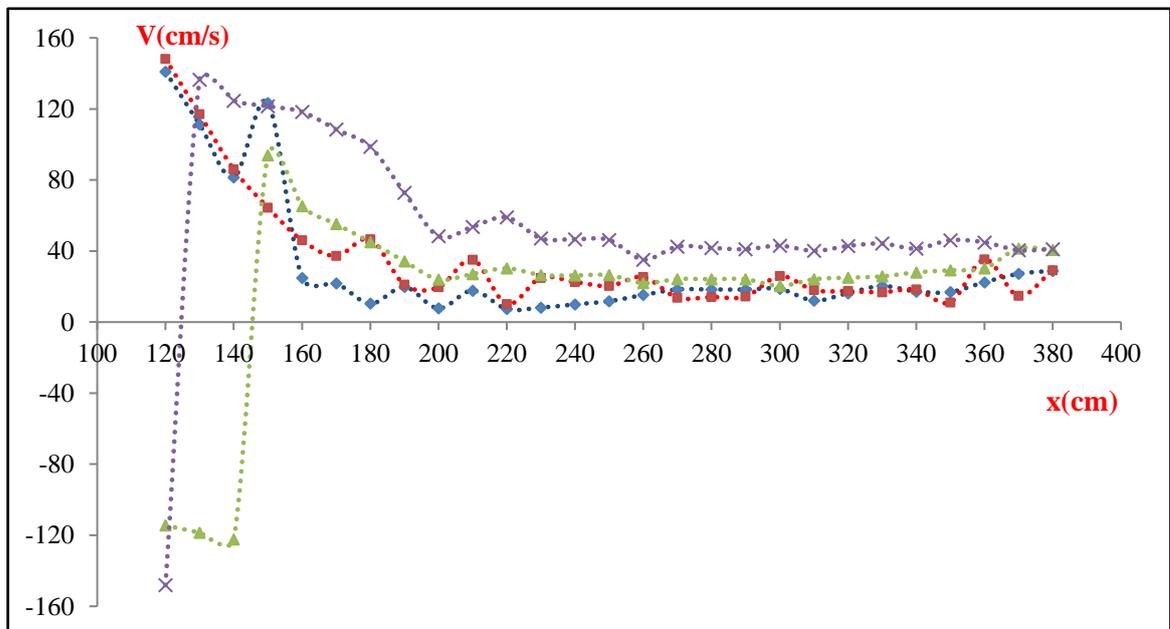


Figure 4.8 : Profil $Y = +8 \text{ cm}$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.3

Tableau 4.7 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -10$ cm.

y= -10cm											
h	x	120	130	140	150	160	170	180	190	200	
22		-99,36	-81,13	62,9	50,67	38,45	33,1	25,66	19,99	14,02	
26		-148,09	-124,56	-105,96	-96,3	86,7	87,55	85,72	65,01	41,2	
		210	220	230	240	250	260	270	280	290	
22		13,22	10,41	14,8	15,02	15,24	19,35	19,89	20,92	22,05	
26		45,6	49,95	51,9	50,71	49,5	53,65	46,46	46,2	45,75	
		300	310	320	330	340	350	360	370	380	
22		24,09	22,22	21,34	22,59	22,99	31,22	39,44	41,84	39,25	
26		40,03	41,36	38,87	36,64	33,28	45,64	40,01	41,62	40,24	

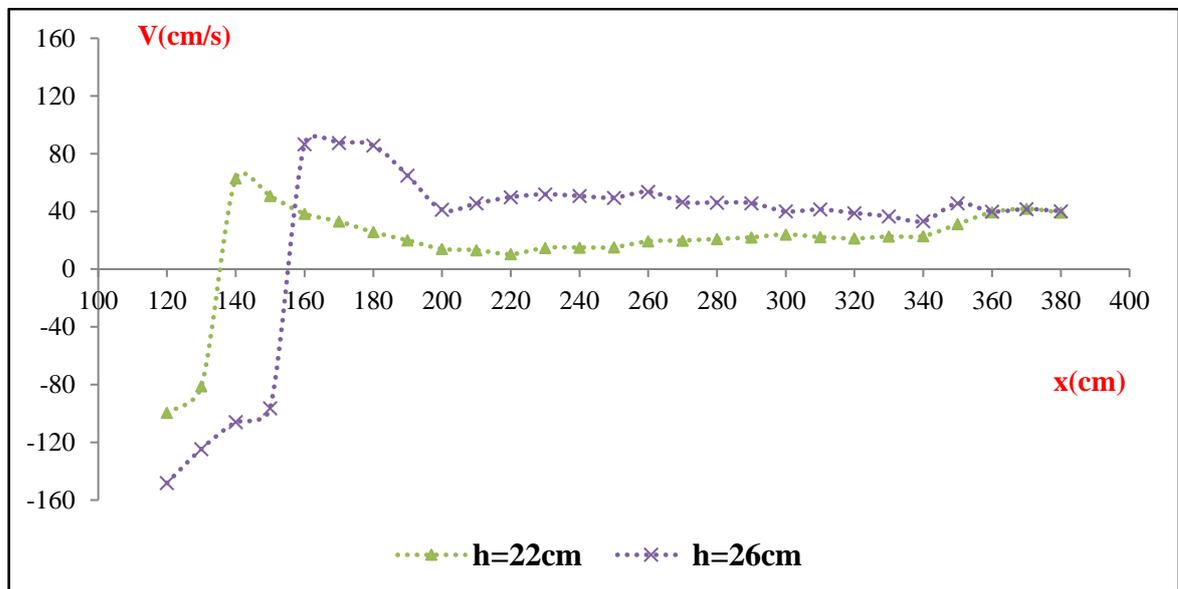


Figure 4.9 : Profil $Y = -10$ cm, $x < L_s$.

Dans les figures 4.9 et 4.10 les axes $Y = -10$ et $Y = +10$ montrent clairement la similitude entre eux en termes de distribution des vitesses le long du canal, où la vitesse maximale apparaît au pied du ressaut, puis diminue le long du canal lorsque la direction se dirige vers le seuil.

Ces deux axes ($Y = -10, +10$ cm) représentent la partie supérieure du canal composé. Les quatre premiers points mesurés aux deux profondeurs $h = 26$ cm et $h = 22$ cm, prennent une valeur négative, c'est ce qui a été observé dans tous les axes précédents lors de l'expérience. Hager (1992) dans ses expériences, a noté qu'il existe des valeurs de vitesse opposées à la direction de l'écoulement.

L'effet des parois du canal est illustré par les faibles valeurs de vitesse que nous observons en nous dirigeant vers le seuil, la distance entre les parois et ces deux axes est très proche, la distance est de un centimètre.

La vitesse à la profondeur $h= 22$ cm est toujours inférieure à celle enregistrée à la profondeur $h= 26$ cm, car cette dernière couche est plus libre avec la surface, mais la chose la plus notable est que l'axe latéral $Y= -10$ cm a une vitesse plus élevée que l'axe $Y= +10$ cm correspondant par rapport au centre du canal.

Tableau 4.8 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = +10$ cm.

y= +10cm										
h	x	120	130	140	150	160	170	180	190	200
22		-50,61	-45,59	-40,56	-37,7	34,93	32,88	30,89	20,05	8,57
26		-148,09	-127,1	-105,96	-93,74	81,52	62,29	43,06	33,57	23,8
		210	220	230	240	250	260	270	280	290
22		10,5	12,82	13,44	15,28	17,11	19,6	14,65	14,35	14,04
26		30,1	36,37	32,85	33,44	34,15	30,94	32,89	32,88	32,47
		300	310	320	330	340	350	360	370	380
22		9,77	16,44	17,27	18,02	23,12	21,71	20,3	18,9	17,3
26		30,21	26,33	25,76	24,97	23,43	22,92	22,43	22,69	23,01

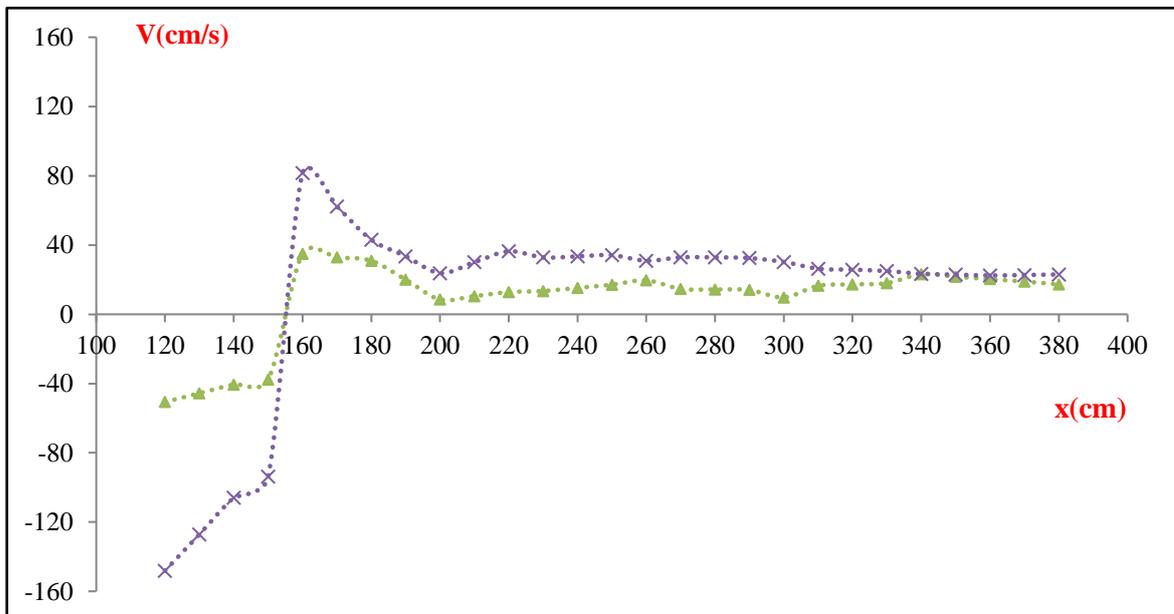


Figure 4.10: Profil $Y= +10$ cm, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.9

IV.3.1.2 Distribution transversale des vitesses

Dans les 26 sections transversales, nous avons présenté quelques profils principales qui sont donnent une répartition générales de vitesse a but d'analyse la vitesse dans les différente points dans le canal.

Soit la section transversale située à $x = 120$ cm proche du pied de ressaut, tel que $x < L_s$ (figure 4.11).

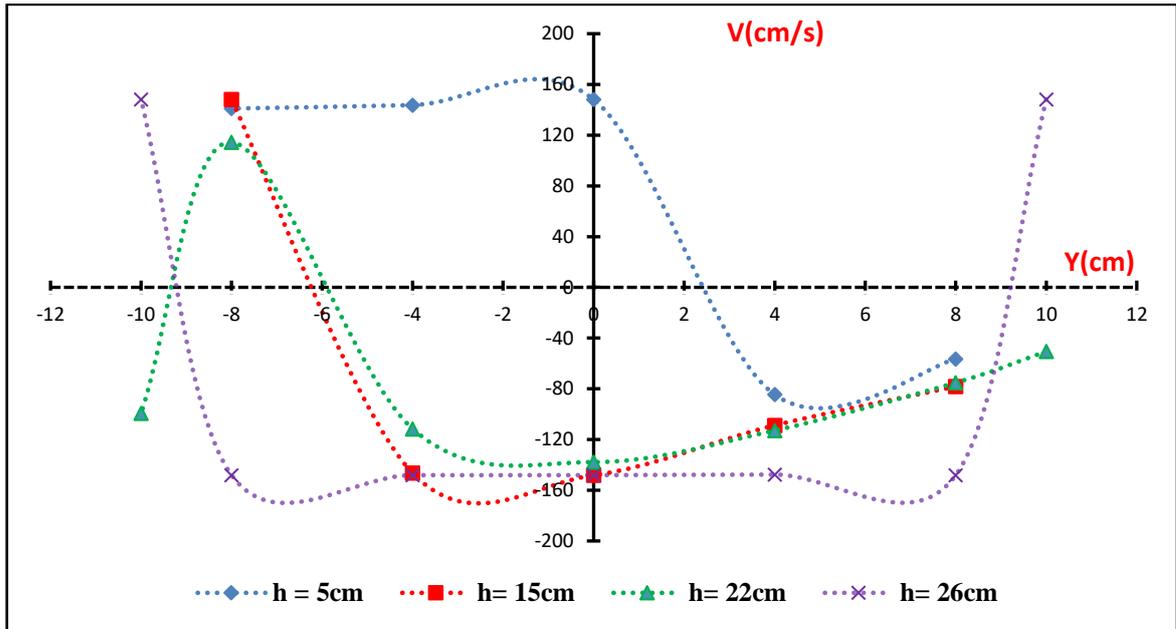


Figure 4.11 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 120$ cm, pour différentes positions Y (cm), $IF=8,22$, $x/L_r = 0,63$, $x < L_s$.

Dans toutes les profondeurs ($h = 5, 15, 22$ et 26 cm) comptées à partir du fond du canal, Les valeurs négatives et positives indiquent la direction du mouvement des courants d'eau. On remarque que les vitesses élevées sont dans le centre du canal et presque supérieures que les autres axes. Ceci est dû au jet sortant du convergent. Parfois, une perturbation des vitesses (augmentations et diminutions) s'étend aux côtés du canal à $h=26$ cm, $h=22$ cm et $h=15$ cm nous les remarquons dans les points Y (cm) = $-8, +10, -10$, mais cette perturbation ce n'est pas entièrement permanente, en raison du jet perturbé qui s'est produit lors de la génération du rouleau environ $x/L_r = 0,63$.

À $Y = 0$ et -4 cm; la vitesse au fond du canal est positives et élevée, mais plus nous dirigeons vers la surface, la vitesse devient négative ce qui explique la génération du rouleau. Alors que nous constatons Y (cm) = $+4, +8$; la vitesse au fond du canal est négative jusqu'à la surface de l'écoulement. À Y (cm) = $+10, -10$; la vitesse enregistrée à chaque côté du canal à la surface de l'écoulement est relativement élevée positive et négative.

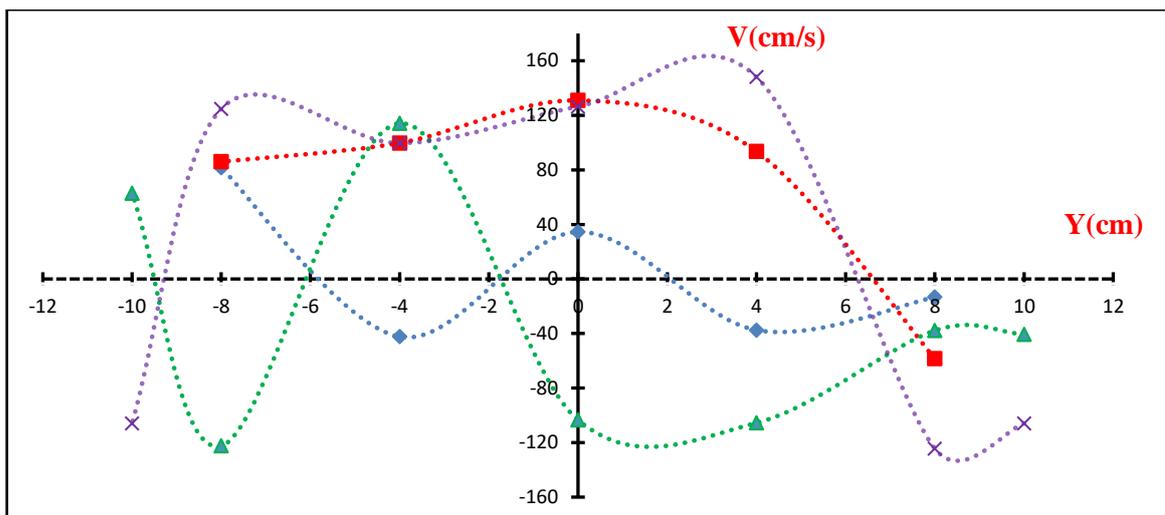


Figure 4.12 : $x = 140 \text{ cm}$, $x/L_r = 0,74$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.11

Dans la figure 4.12, nous remarquons une diminution relative de vitesse dans tout les points Y du canal, avec une certaine perturbation dans les deux côtés du canal du fond vers la surface ($Y = -8, +8$). Cette perturbation se manifeste par des valeurs de vitesse élevée, cela explique que la section transversale actuelle se trouve à la premier partie de l'extrémité du rouleau ; $x/L_r = 0,74$. Certains des valeurs négatives enregistrés dans la section transversale précédente ($x = 120\text{cm}$) sont devenus positives à partir de chaque point de Y de cette section ; $x=140\text{cm}$.

Les figures 4.13 à 4.18 montrent à l'approche de l'extrémité du rouleau, une réduction des vitesses, mais la vitesse au fond plus faible à la surface de canal. La vitesse toujours élevée dans le centre et faibles dans les parois du canal.

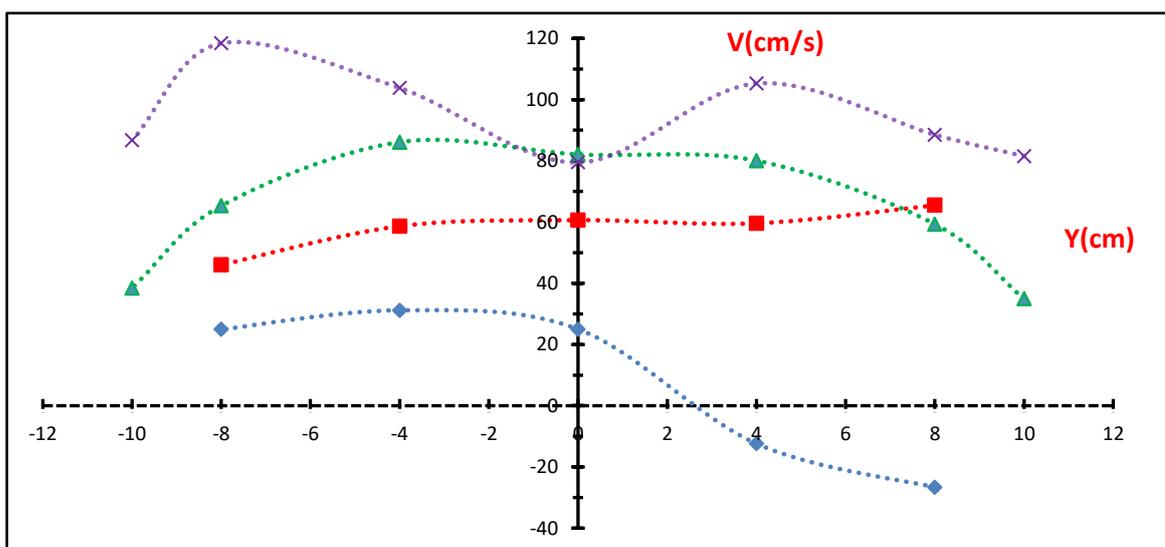


Figure 4.13 : $x = 160 \text{ cm}$, $x/L_r = 0,84$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.11

Dans la figure 4.13, à l'extrémité de rouleau $x/L_r = 0,84$, nous remarquons que les valeurs de vitesse négatives se dirigent vers la disparition. D'autre part, ce qui est également remarqué et différent lors des essais, c'est que la vitesse d'un côté du canal ($Y = -8\text{cm}$) à la surface est supérieure à celle au centre ($Y = 0\text{cm}$), cela est dû à l'effet de certaines vagues successives au cours de la génération du rouleau.

Les figures 4.14 à 4.15 montrent que d'une point Y à l'autre l'allure générale de la distribution des vitesses est semblable; des différences apparaissent quant aux intensités. Les figures confirment dans tous les profondeurs (h) comptées à partir du fond du canal, les valeurs de vitesse sont supérieur dans le centre du canal et faibles dans les autres axes en raison de contact direct de l'écoulement avec les parois du canal.

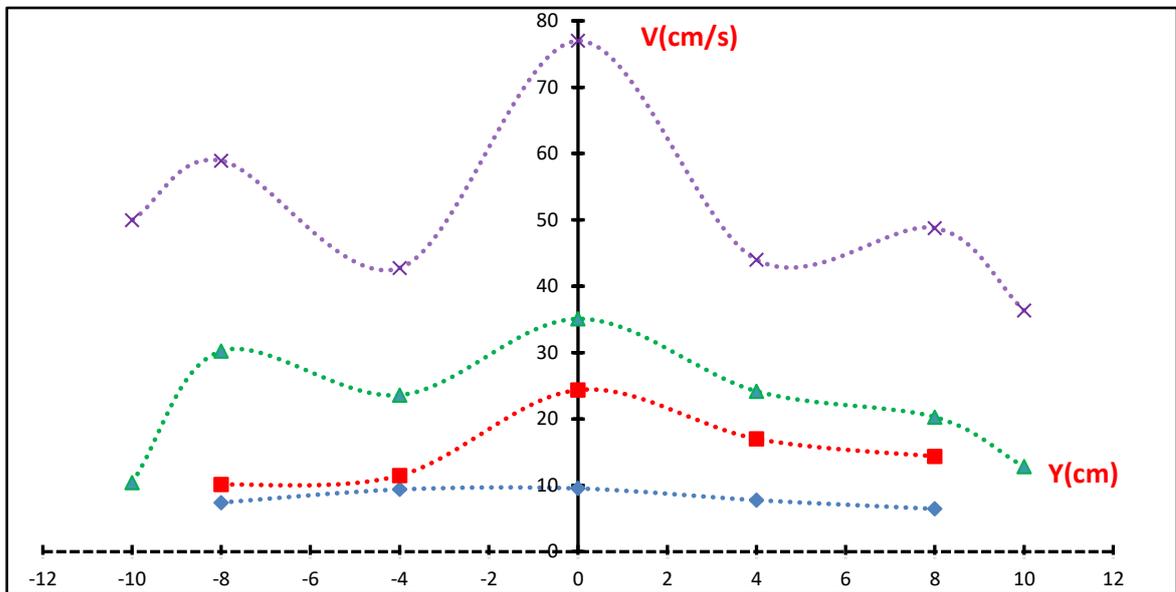


Figure 4.14 : $x = 220 \text{ cm}$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.11

Dans la figure 4.14 est presque mêmes résultats dans les sections précédentes, lorsque nous passons de la plus petite hauteur à la plus grande d'entre elles, nous remarquons une faible augmentation de la valeur de vitesse dans tous les points (Y) ensemble. Lors le déplacement de la hauteur inférieure est vers la hauteur supérieure, la vitesse à chaque point (Y) augmente proportionnellement, nous prenons un exemple de cela, la vitesse dans chaque point (Y) à $h = 26\text{cm}$ sont supérieurs dans chaque point (Y) à $h = 22\text{cm}$.

La valeur de vitesse au fond du canal reste toujours faible et aucun valeur négative enregistré à partir de cette section transversale.

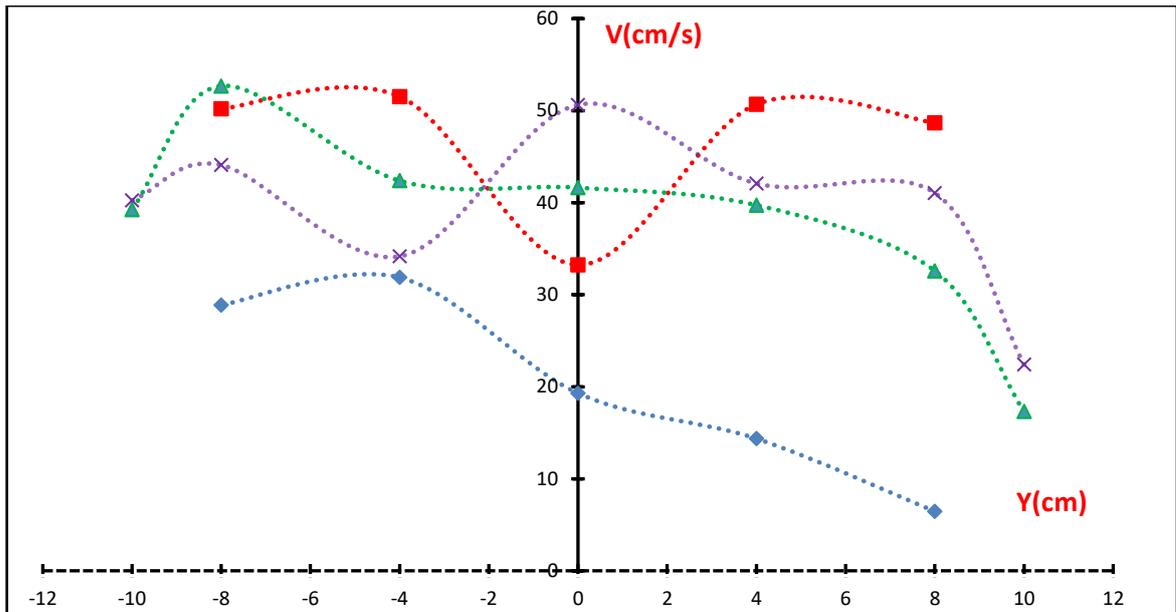


Figure 4.15 : $x = 380$ cm, $x / L_s = 0,95$. Mêmes notations que la figure 4.11

Dans la figure 4.15, toutes les valeurs de vitesse observées dans la surface libre sont relativement supérieures, tandis que les vitesses restent faibles au fond du canal où le rapport relative $x/L_s = 0,95$. Ces vitesses à la surface forment une couche semi-uniforme à cause la vitesse est entre de 35 et 50 cm/s.

On peut dire qu'à l'approche du seuil, les particules liquides se précipitent pour atteindre la surface à cause de la résistance que le seuil impose à l'écoulement où les valeurs de vitesse augmentent légèrement. Par conséquent, l'emplacement de chaque particule liquide se déplace du fond vers la surface libre, le sens d'écoulement est toujours en aval comme indiqué dans les différentes sections transversales.

A la fin des analyses graphiques des figures, au début de la génération du ressaut hydraulique, la chose la plus notable est que le rouleau est formé au fond du canal composé, en particulier de la moitié supérieure du canal rectangulaire à la partie supérieure qui est le canal trapézoïdal.

IV.3.2 Deuxième expérience

Nous avons changé le convergent à une hauteur de $h = 2\text{cm}$, afin d'examiner les résultats donnés dans la première expérience, où nous remarquons que la vitesse initiale très élevée $V_1 = 445\text{cm/s}$ avec un débit de $17,82\text{ l/s}$. Nous n'avons pas pu mesurer la vitesse avant la distance 130 cm du convergent, en raison des grandes valeurs de vitesse au fond du canal que l'appareil n'a pas pu mesurer, mais nous avons mesuré la vitesse vers le seuil afin de réussir l'expérience. L'étude a été réalisée dans les conditions indiquées dans le tableau 4.9.

Tableau 4.9 : Conditions et paramètres hydraulique respectif au deuxième essai.

IF₁	Q (l/s)	A₁ (cm²)	H_d (cm)	s (cm)	h₁ (cm)	h₂ (cm)	L_s (cm)	L_r (cm)	L_j (cm)
10,06	17,82	40	12,2	14	2	26,5	253	153	231

IV.3.2.1 Les vitesses dans les sections longitudinales

Tableau 4.10 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = 0$.

Y=0cm							
h \ x	130	140	150	160	170	180	190
2,5	47,55	-37,72	29,06	42,47	29,06	29,18	21,36
7	-125,60	94,04	78,69	66,85	50,39	49,07	21,00
14,5	147,87	-144,82	-148,24	101,66	148,24	81,42	101,90
22	148,48	147,96	-149,99	148,24	144,09	144,67	142,90
	200	210	220	230	240	250	
2,5	22,92	15,39	18,28	8,45	15,05	7,70	
7	22,69	20,67	19,99	17,59	15,33	11,44	
14,5	87,09	83,33	60,6	43,83	96,97	102,88	
22	141,94	138,89	139,22	129,91	108,4	106,60	

Les figures 4.16 à 4.18 confirment les résultats obtenus lors de l'expérience précédente, en termes de répartition générale des vitesses sur toutes les sections longitudinales, où l'on note la vitesse maximale constatée au début du ressaut dans le fond du canal. La chose la plus notable est la vitesse négative, car elles apparaissent également après quelques distances après le premier jet du convergent, ce qui explique les courants d'eau opposés la direction de l'écoulement le long du canal.

Les valeurs de vitesse diminuent sur toutes les sections longitudinales lorsque la direction se dirige vers le seuil, et diminue fortement lorsque la profondeur est plus faible, ce qui correspond à ce qui a été expliqué dans l'expérience précédente.

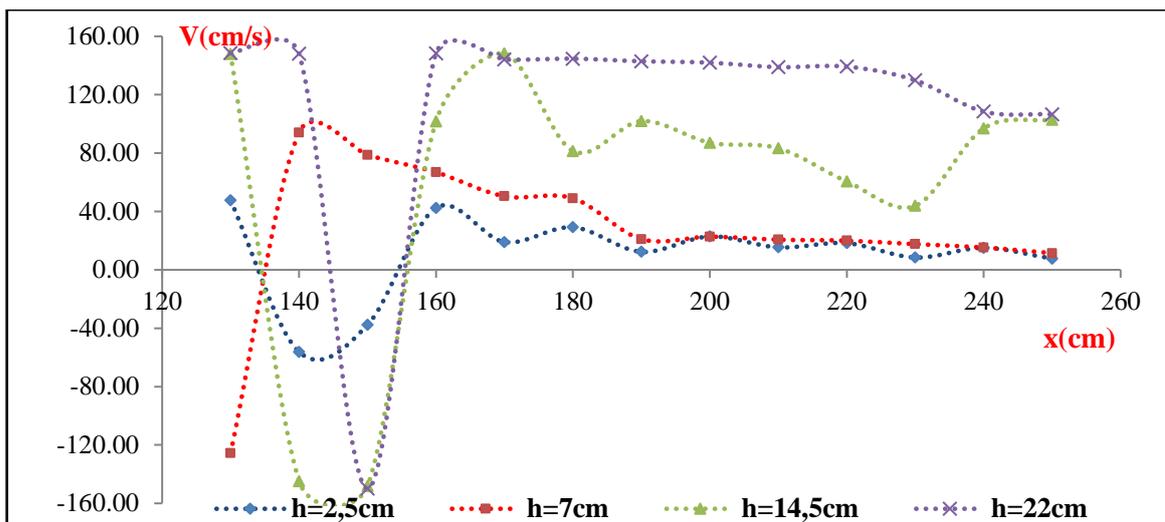


Figure 4.16 : Profil des vitesses moyennes horizontales Y = 0 cm.

Tableau 4.11 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y = -4 cm.

Y= -4cm		130	140	150	160	170	180	190
h \ x								
2,5		47,06	38,10	-23,02	22,17	19,90	16,15	10,41
7		51,35	49,07	-38,80	41,82	55,62	36,45	20,14
14,5		-136,90	140,00	147,80	143,03	141,49	129,37	94,33
22		148,09	148,09	148,24	147,09	147,49	147,09	147,77
		200	210	220	230	240	250	
2,5		10,20	9,71	9,10	6,53	8,24	10,41	
7		15,14	15,32	12,56	11,09	22,49	27,22	
14,5		75,70	68,18	60,69	40,74	66,55	102,01	
22		145,60	145,80	136,95	122,43	117,14	102,63	

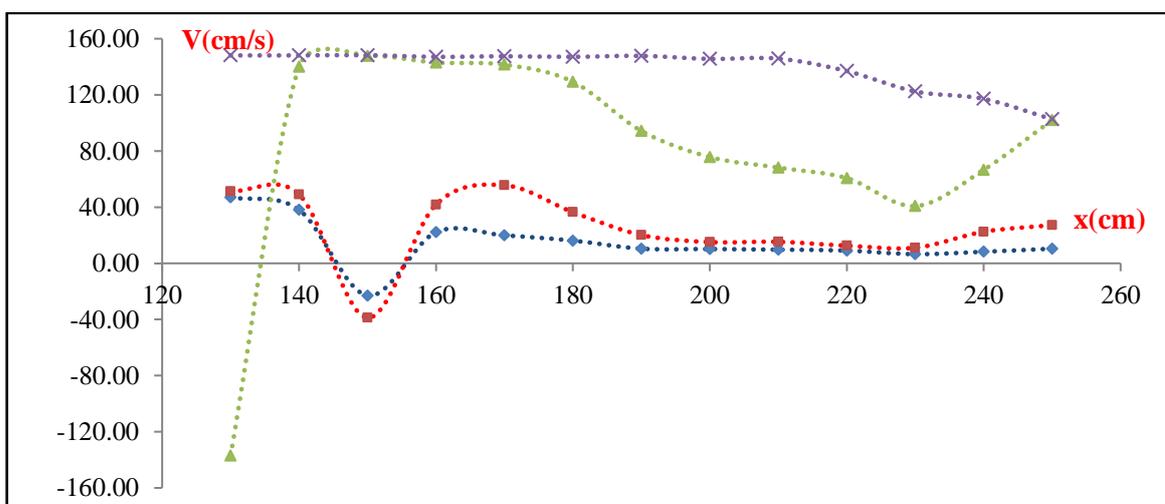


Figure 4.17 : Y = -4 cm. Mêmes notations que la figure 4.16

Tableau 4.12 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour pour la section longitudinale $Y = +4$ cm.

Y=+4cm								
h	x	130	140	150	160	170	180	190
2,5		-76,80	62,04	50,92	41,56	35,77	29,30	13,16
7		124,43	91,07	75,59	77,22	83,08	40,40	25,73
14,5		147,95	148,09	-147,08	139,10	140,05	100,72	66,22
22		-148,09	148,09	-148,24	144,90	140,33	138,27	125,02
		200	210	220	230	240	250	
2,5		14,60	10,06	11,08	9,72	9,44	7,57	
7		20,33	16,96	17,60	18,91	21,09	29,96	
14,5		49,50	52,44	55,12	39,10	40,12	55,81	
22		117,04	114,71	119,66	123,85	82,15	78,49	

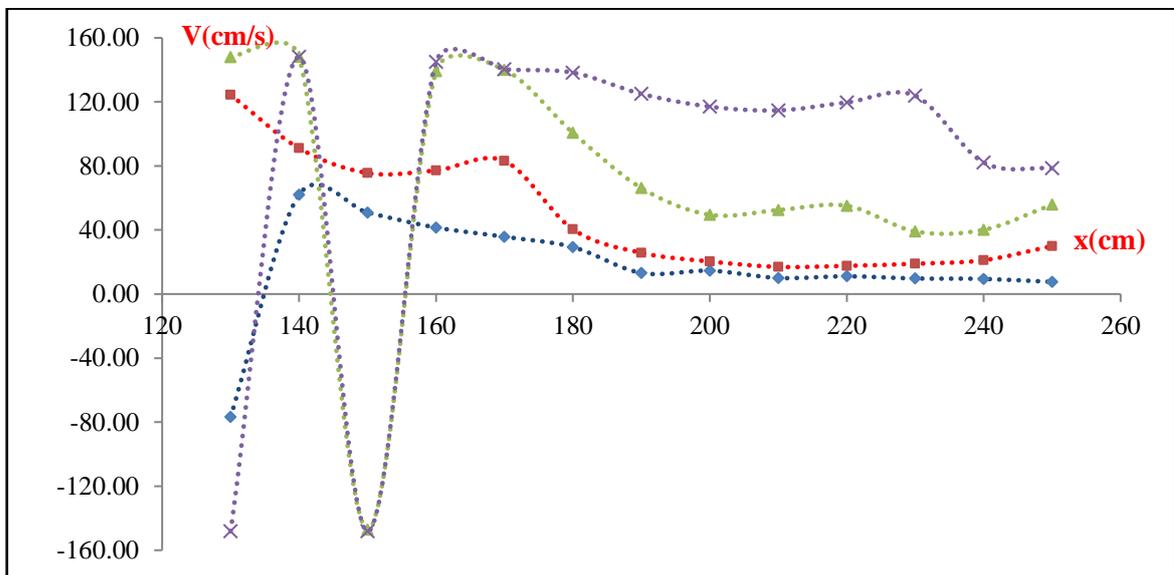


Figure 4.18 : $Y = +4$ cm. Mêmes notations que la figure 4.16

Tableau 4.13 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -8$ cm.

Y= -8cm								
h	x	130	140	150	160	170	180	190
2,5		-47,01	42,42	29,01	24,58	29,99	24,24	22,43
7		-51,82	46,36	-38,46	40,08	30,88	25,25	11,55
14,5		-146,82	-147,95	130,69	83,43	64,17	64,22	59,91
22		-148,24	-148,09	140,96	137,24	140,20	139,12	140,40
		200	210	220	230	240	250	
2,5		16,38	19,06	22,63	17,44	23,70	11,77	
7		16,14	17,40	14,87	10,40	25,36	39,69	
14,5		54,35	60,08	56,01	49,31	68,81	85,29	
22		137,09	130,55	120,38	102,05	105,22	100,14	

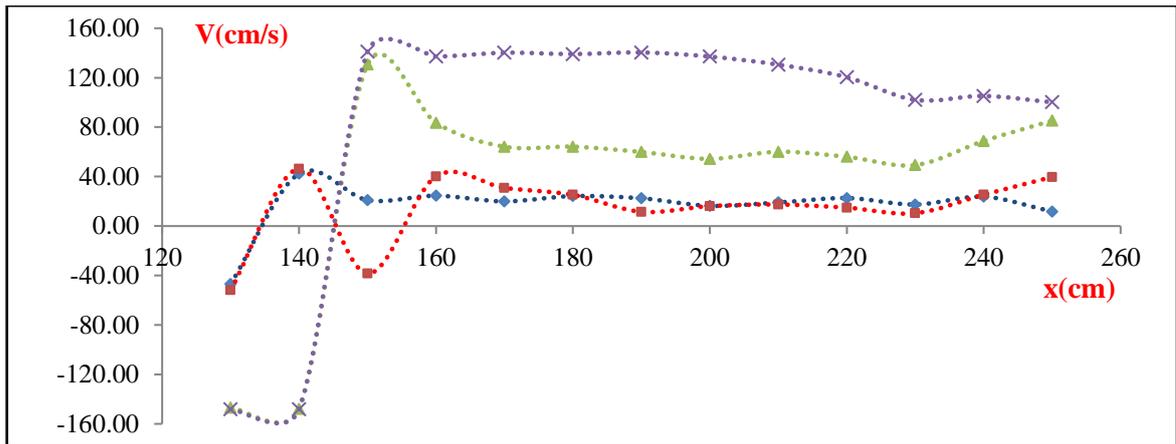


Figure 4.19 : Y = -8 cm. Mêmes notations que la figure 4.16

Tableau 4.14 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y = +8 cm.

Y = +8cm		130	140	150	160	170	180	190
h \ x								
2,5		-74,29	-81,67	-56,25	39,73	18,32	30,28	13,97
7		-134,87	130,31	-88,27	72,18	52,60	42,01	18,34
14,5		-147,09	-135,53	93,30	90,05	106,20	26,88	35,19
22		-146,16	144,26	144,24	140,16	108,16	118,71	68,18
		200	210	220	230	240	250	
2,5		9,82	11,78	20,38	6,37	23,75	7,18	
7		12,28	17,63	18,04	21,16	35,2	43,98	
14,5		46,04	31,52	48,34	25,50	93,64	67,44	
22		62,3	50,04	59,97	51,40	50,04	50,68	

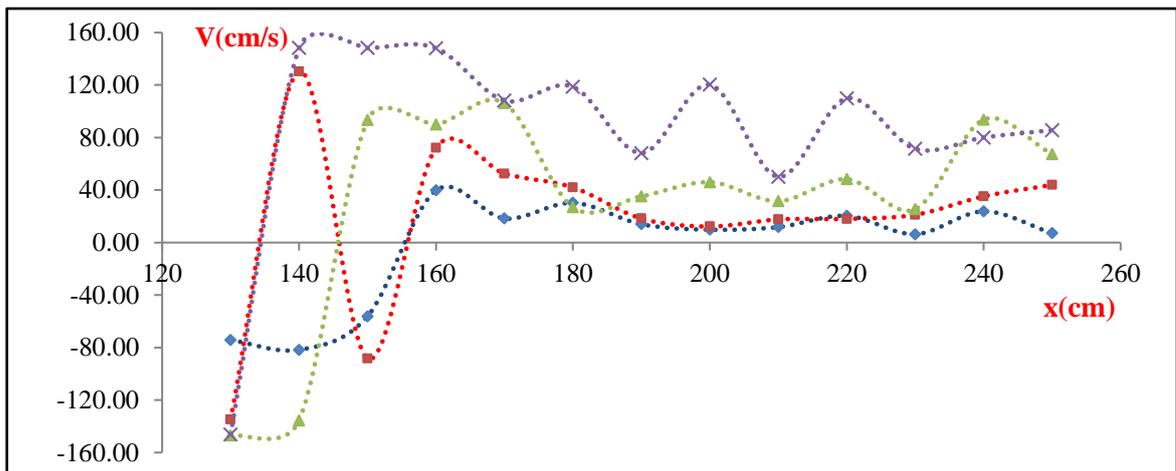


Figure 4.20 : Y= +8 cm. Mêmes notations que la figure 4.16

Sur les figures .419 et .420, nous remarquons la grande fluctuation des valeurs de vitesse près des parois du canal, cette dernière étant relativement élevée en surface et moins au fond du canal. La fluctuation des valeurs de vitesse à la surface dans plusieurs fois causée

par les vagues d'eau formées en raison de la grande quantité d'eau, qui provient de la convergent à une vitesse élevée.

Tableau 4.15 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -10$ cm de hauteur $h = 22$ cm.

Y= -10cm							
x(cm)	130	140	150	160	170	180	190
	147,95	-132,77	-120,33	115,75	77,17	59,57	75,8
	200	210	220	230	240	250	
	82,64	94,67	80,036	79,76	72,82	53,94	

Tableau 4.16 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = +10$ cm de hauteur $h = 22$ cm.

Y= +10cm							
x(cm)	130	140	150	160	170	180	190
	-147,95	140,2	-135,25	107,04	89,4	65,13	77,67
	200	210	220	230	240	250	
	79,11	89,09	92,23	80,37	60,44	32,26	

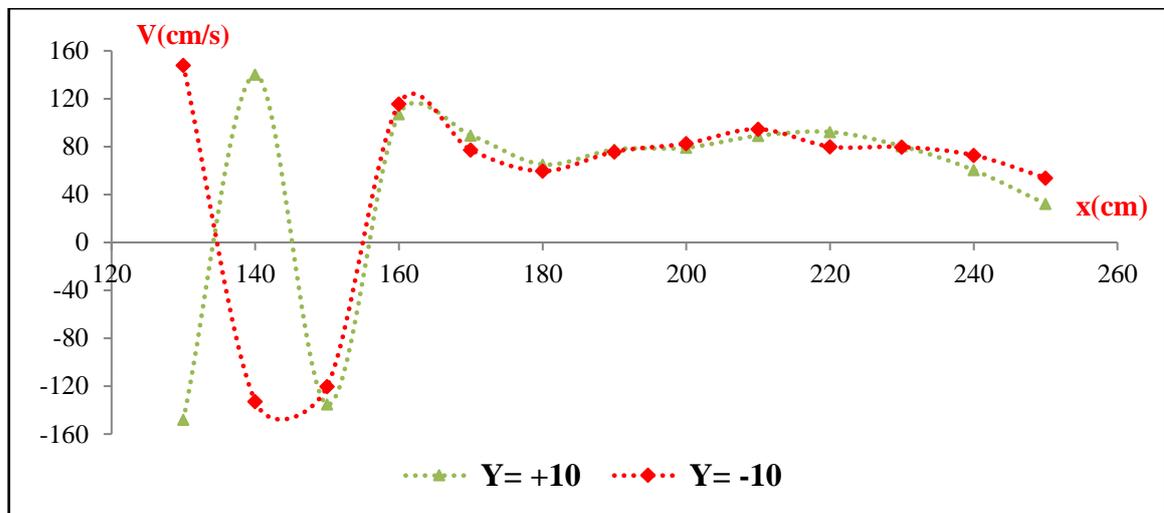


Figure 4.21 : Variation des vitesses pré les parois du canal, $Y = -10, +10$ cm.

La figure 4.21 représente la variation de vitesse pour les axes transversale $Y = -10, +10$ cm dans la surface du canal de hauteur $h = 22$ cm en fonction les coordonnées longitudinale x , ces valeurs de vitesse sont enregistrées dans la partie haute de notre canal composé.

La figure montre des vitesses maximales sont enregistrées dans les premier points $x = 130, 140$ cm, ces vitesses sont diminue lorsque la direction vers l'aval avec un pas de 10 cm.

IV.3.2.2 Les vitesses dans les sections transversales

Soit la section transversale située à $x = 130$ cm à l'approche le pied du ressaut, tel que $x < L_s$ (figure 4.22).

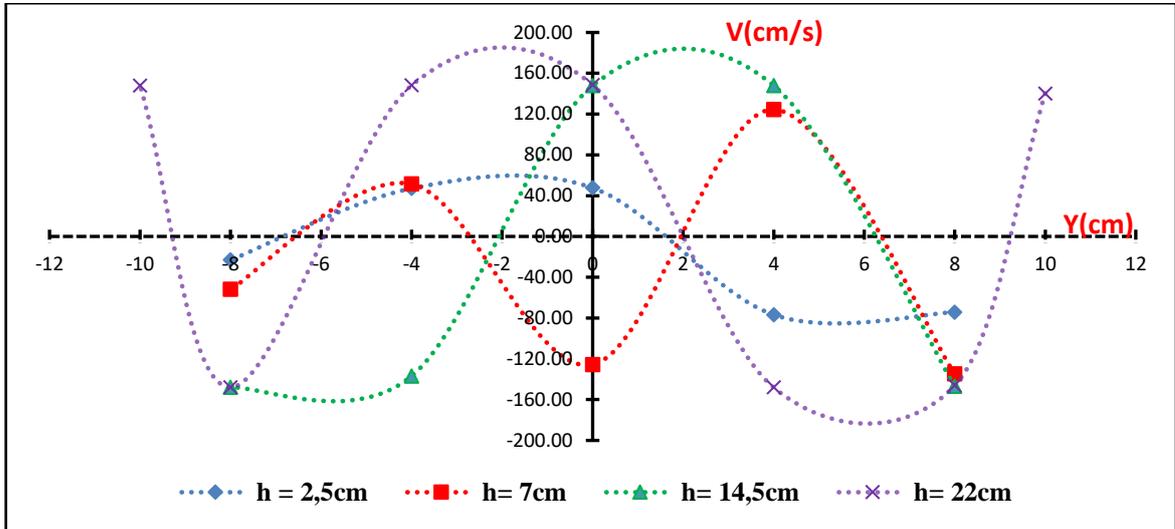


Figure 4.22 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 130$ cm, pour différentes positions Y (cm), $IF=10,06$, $x/L_r = 0,84$ $x < L_s$.

La figure 4.22 illustre, comme nous l'avons indiqué dans les analyses précédentes de la première expérience, il existe une similitude entre les sections transversales le long du canal, là où au début de la formation du rouleau il y aura des courants opposés de la direction de l'écoulement, ce dernier montré sur la figure avec des valeurs négatives. Quant aux côtés du canal, la vitesse diminue en raison du frottement avec les parois du canal. En surface, la vitesse est élevée par rapport au fond du canal, et diminue que nous dirigeons vers l'aval dans toutes les points (Y).

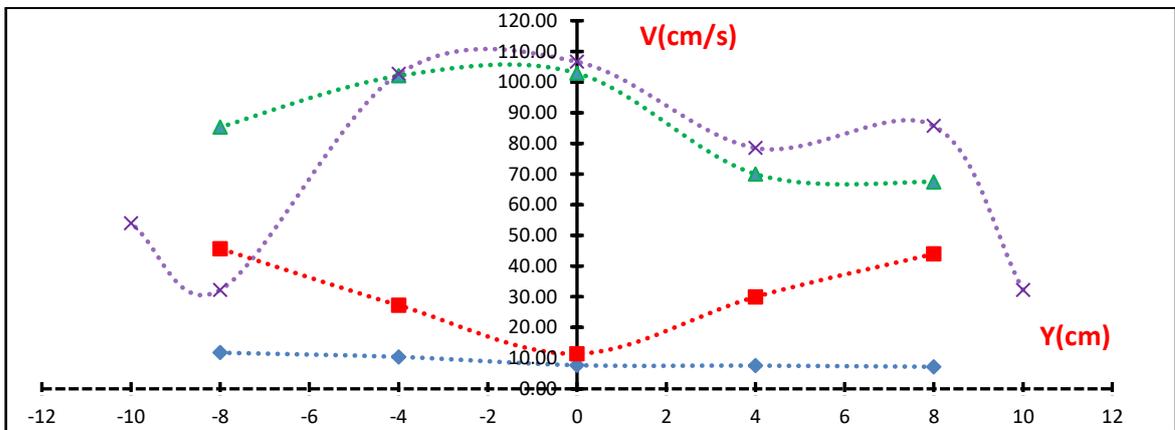


Figure 4.23: Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 250$ cm $x/L_r = 1,63$, $x < L_s$. Même notations que la figure 4.22

Dans la figure 4.23, approche du seuil, la vitesse de la surface augmente légèrement, cela est dû à la course des particules liquides vers la surface où la hauteur de cette dernière est supérieure à la hauteur du seuil. C'est ce qui a été indiqué dans la figure 4.15.

IV.3.3 Récapitulation

Les première et deuxième expériences sont identiques en termes de répartition générale des vitesses. Donc, les résultats des expériences nous a permis de tirer les remarques suivantes :

- ✓ Un Jet à grande vitesse ($V > 300$ cm/s) est présent dans la zone amont du ressaut. Ce jet diminue lorsque la direction de l'écoulement est vers l'aval.
- ✓ La vitesse horizontale moyenne passe d'une valeur maximale au fond à une valeur moins à la surface aux points $x < 130$ cm. Au-delà de ce dernier point, nous assistons à une diminution proportionnelle de deux vitesses (V_s et V_f) le long du canal à environ $x/L_s > 0,32$, et à partir de $x = 130$ cm, les valeurs de vitesse à la surface deviennent plus grandes au fond du canal.
- ✓ La vitesse est élevée au centre et diminue en se rapprochant les parois du canal.
- ✓ Les valeurs de vitesse négatives sont enregistrées dans la première partie de la distance L_s à la surface aux points $x = 120$ à 150 cm où $0,63 < x/L_r < 0,81$.
- ✓ Dans la perspective longitudinale et transversale : le comportement des particules liquides proches du seuil à la surface forme une couche semi-uniforme parallèle au fond du canal à environ $x/L_s > 0,84$.
- ✓ Près du seuil $x/L_s = 0,9$ à $0,95$, les particules liquides au fond du canal tentent de prendre une direction vers la surface afin d'attraper les autres particules au-dessus d'elle montant vers le seuil. Ce phénomène peut être appelé la course de libération des particules vers la surface. Certaines de ces particules liquides entrent en collision avec des courants du fond opposés à partir du seuil, de sorte que leur direction est souvent confuse et pour la valeur de sa vitesse faible, nous les considérons comme une valeur positive.
- ✓ Pré du seuil, parfois la différence de valeur de la vitesse entre les côtés du canal est grande.
- ✓ Dans le pied de ressaut, en remarque que le canal rectangulaire qui représente la base du canal composé, est plus avantageuse que la partie haute de canal, en termes d'importance de vitesse maximale.

IV.4 La relation entre les vitesses moyennes et la position relative x/L_j

La vitesse de l'écoulement dans un canal composé est d'une grande importance lors de l'étude du ressaut hydraulique dans le cours d'eau.

Les premiers chercheurs dans le domaine de la mesure de vitesse ont fourni des observations importantes concernant la vitesse dans différents types des canaux. Prenant un exemple de cela, qu'au début du ressaut, la vitesse au fond du canal est très élevée et danger pour les ouvrages hydraulique et les installations techniques.

Nous allons essayer de présenter la relation entre les vitesses dans les axes Y et le rapport de la position relative x/L_j où :

- L'axe $Y=0$ de centre du canal sa vitesse est souvent la plus grande des autres axes.
- Les axes Y (cm) = -8, +8, -10, +10, représentent la variation de vitesse dans les cotés du canal.
 - V_1 étant la vitesse incidente.
 - V_f étant la vitesse au fond du canal.
 - V_s étant la couche de vitesse à la surface du canal.
 - V_c étant la vitesse approche les parois du canal.

Nous considérons que toutes les vitesses moyennes horizontales sont des valeurs absolues, les valeurs des rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes position x , sont consignées dans les tableaux 4.17 à 4.20.

Avec :

- x : la position longitudinale (cm).
- Y : la position transversale (cm).
- L_j : longueur de ressaut hydraulique (cm).
- V : la vitesse moyenne horizontale en cm/s.

Les résultats expérimentaux utilisés dans les tableaux suivants sont représentées dans le traçage des courbes, divisés en deux volets:

Le premier volet A : nous avons intéressons aux vitesses relatives au centre du canal.

Le deuxième volet B : il se résume aux vitesses relatives sur les axes latéraux.

IV.4.1 Première expérience

Soit la longueur de ressaut (L_j) est de 232cm, avec les conditions hydrauliques suivantes :

- $V_1 = 446.26\text{cm/s}$
- Hauteur au fond du canal $h = 5\text{cm}$.
- Hauteur à la surface du canal $h = 26\text{cm}$.

A. Les vitesses dans le centre du canal

Tableau 4.17 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x , ($Y=0$).

Y=0					
x	x/L_j	V_f	V_f/V_1	V_s	V_s/V_1
120	0,52	150,5	0,337	-148,09	0,332
130	0,56	92,5	0,207	127,37	0,285
140	0,6	84,49	0,189	126,36	0,283
150	0,65	-103	0,23	102,92	0,231
160	0,69	60,44	0,135	79,47	0,178
170	0,73	55,96	0,125	78,5	0,176
180	0,78	40,35	0,09	77,51	0,174
190	0,82	35,83	0,08	73,5	0,165
200	0,86	23,15	0,052	69,43	0,156
210	0,91	22,13	0,05	73,77	0,165
220	0,95	22,6	0,051	76,98	0,173
230	0,99	21,94	0,049	72,34	0,162
240	1,03	22,38	0,05	71,04	0,159
250	1,08	22,62	0,051	69,74	0,156
260	1,12	20,09	0,045	62,51	0,14
270	1,16	18,06	0,04	65,07	0,146
280	1,21	19,44	0,044	63,66	0,143
290	1,25	16,76	0,038	62,25	0,14
300	1,29	17,87	0,04	62,02	0,139
310	1,34	20,2	0,045	62,18	0,139
320	1,38	22,31	0,05	60,35	0,135
330	1,42	23,42	0,052	58,5	0,131
340	1,47	21,86	0,049	53,6	0,12
350	1,51	20,35	0,046	52,81	0,118
360	1,55	21,93	0,049	52,02	0,117
370	1,59	21,18	0,047	51,32	0,115
380	1,64	19,3	0,043	50,63	0,113

La figure 4.24 montre que les deux rapports de vitesse relative V_f/V_1 et V_s/V_1 expriment clairement un nuage de point assez dense. A la position relatives $x/L_j = 0,52$, les vitesses relative au fond son plus élevées que les vitesses relatives de la surface.

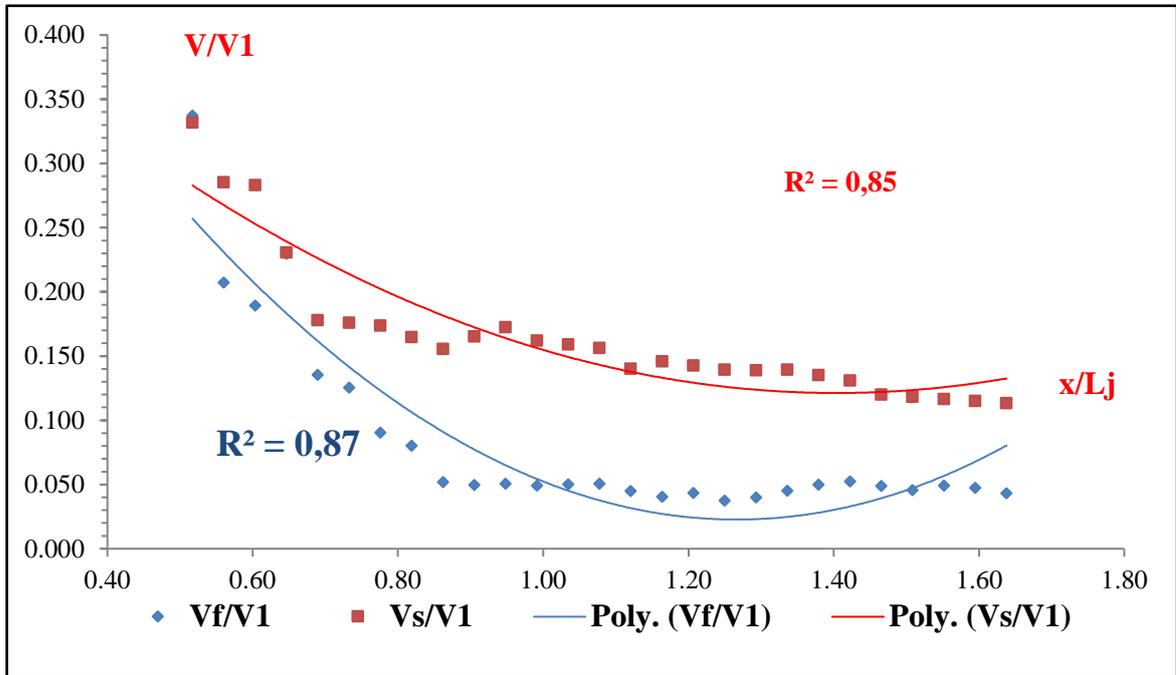


Figure 4.24 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V/V_1) en fonction de la position relative x/L_j pour $Y=0$

Un ajustement de l'ensemble du nuage de points, par la méthode des moindres carrés non linéaire, donne des relations de la forme polynomiale entre V/V_1 et x/L_j :

Pour la vitesse relative au fond V_f/V_1 :

$$y = 0,417x^2 - 1,057x + 0,692 \quad (4.2)$$

Pour la vitesse relative de la surface V_s/V_1 :

$$y = 0,205x^2 - 0,577x + 0,526 \quad (4.3)$$

Les relations (4.2), (4.3) données dans la condition du coefficient de détermination R^2 , respectivement : R^2 (4.2) $\approx 0,87$ et R^2 (4.3) $\approx 0,85$.

B. Les vitesses dans les côtés du canal

Les résultats expérimentaux utilisés dans le tableau 4.18 sont représentées dans le traçage des courbes figures 4.25 et 4.26.

Tableau 4.18 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x , $Y = -8, +8$ cm.

		Y= -8cm				Y= +8cm			
x	x/L _j	V _f	V _f /V ₁	V _s	V _s /V ₁	V _f	V _f /V ₁	V _s /V ₁	V _s
120	0,52	140,98	0,316	-148,09	0,332	-56,64	0,127	0,332	-148,09
130	0,56	111,25	0,249	136,39	0,306	-44,99	0,078	0,305	-136,25
140	0,6	81,48	0,183	124,68	0,279	-43,34	0,03	0,279	-124,43
150	0,65	123,4	0,277	121,52	0,272	-40,69	0,181	0,239	106,47
160	0,69	24,92	0,056	118,37	0,265	-26,63	0,06	0,198	88,51
170	0,73	21,87	0,049	108,44	0,243	27,01	0,061	0,163	72,52
180	0,78	10,41	0,023	98,67	0,221	20,1	0,029	0,127	56,55
190	0,82	19,74	0,044	72,88	0,163	19,69	0,044	0,163	72,56
200	0,86	7,7	0,017	48,33	0,108	10,79	0,02	0,198	88,57
210	0,91	17,74	0,04	53,69	0,12	10,8	0,024	0,154	68,6
220	0,95	7,4	0,017	58,93	0,132	6,45	0,014	0,109	48,77
230	0,99	8,16	0,018	47,07	0,105	14,36	0,032	0,104	46,45
240	1,03	9,97	0,022	46,66	0,105	11,23	0,025	0,101	45,02
250	1,08	11,77	0,026	46,25	0,104	8,11	0,018	0,098	43,59
260	1,12	15,25	0,034	35,19	0,079	8,7	0,019	0,099	44,13
270	1,16	18,37	0,041	42,5	0,095	6,45	0,014	0,09	40,33
280	1,21	18,35	0,041	41,75	0,094	7,15	0,016	0,089	39,71
290	1,25	18,32	0,041	40,98	0,092	7,86	0,018	0,088	39,11
300	1,29	18,67	0,042	43,02	0,096	6,45	0,014	0,097	43,44
310	1,34	12,07	0,027	40,05	0,09	9,38	0,021	0,086	38,59
320	1,38	16,28	0,036	42,81	0,096	9,08	0,02	0,078	35,01
330	1,42	20,33	0,046	44,22	0,099	8,79	0,02	0,07	31,42
340	1,47	17,19	0,039	41,33	0,093	10,51	0,037	0,072	32,26
350	1,51	16,95	0,038	46,12	0,103	7,4	0,017	0,07	31,43
360	1,55	22,43	0,05	44,88	0,101	8,67	0,042	0,069	30,59
370	1,59	27,17	0,061	40,48	0,091	6,5	0,015	0,08	35,8
380	1,64	28,88	0,065	41,08	0,092	6,45	0,014	0,092	41,05

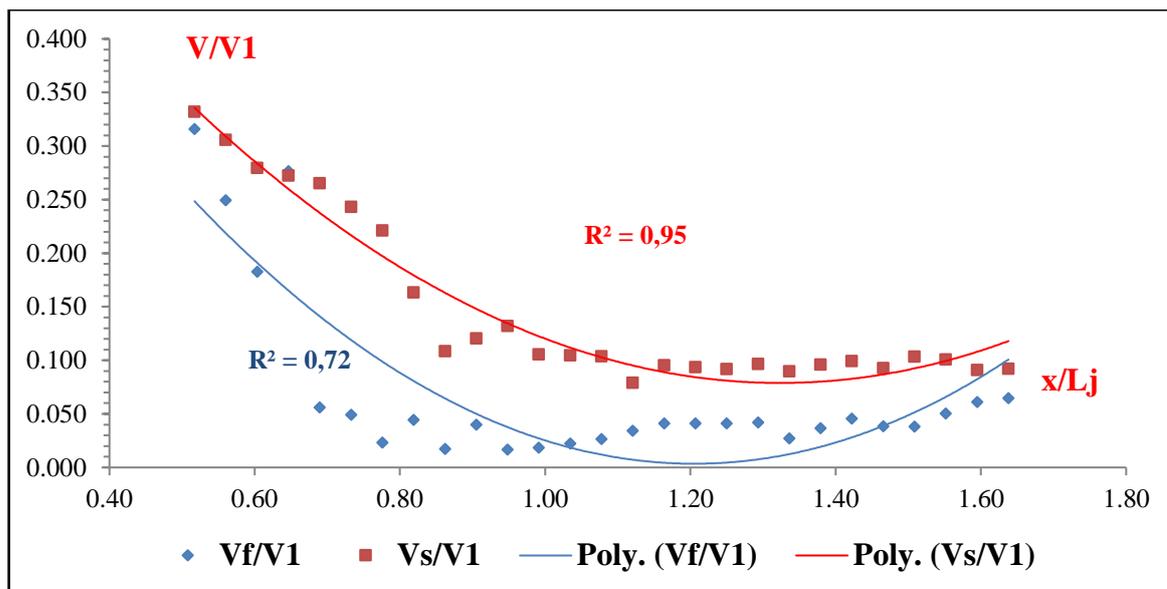


Figure 4.25 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V/V_1) en fonction de la position relative x/L_j pour $Y = -8\text{cm}$

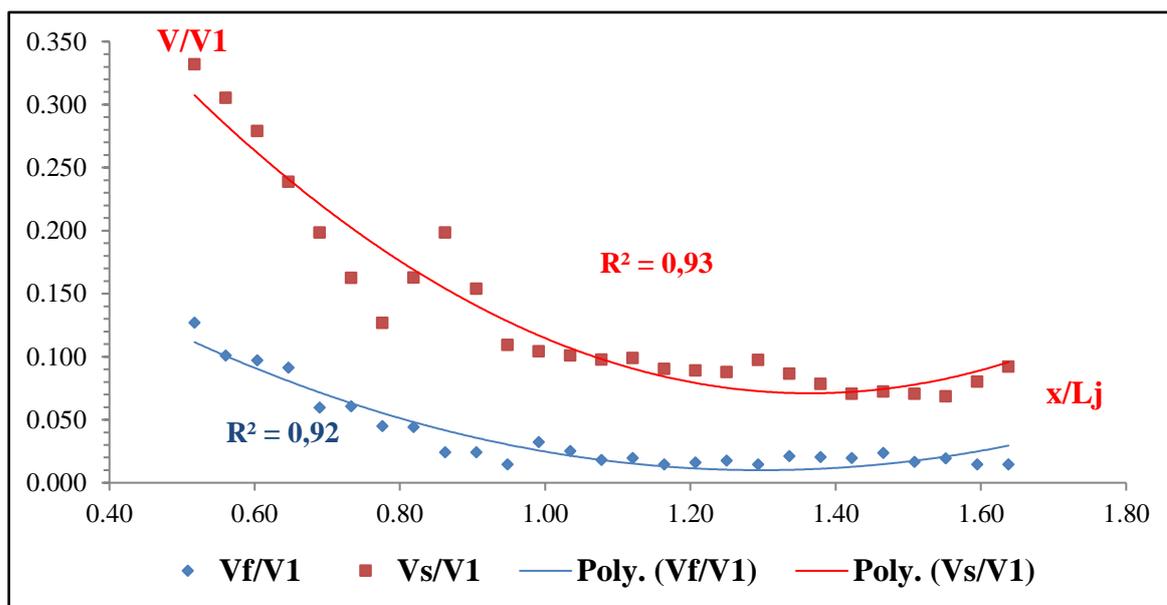


Figure 4.26 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V/V_1) en fonction de la position relative x/L_j pour $Y = +8\text{cm}$

Les figures 4.25 et 4.26 montrent une forte diminution de la valeur de vitesse sur les côtés du canal. Cela montre la différence totale entre le centre du canal et ses côtés, et cela s'explique par le frottement direct avec les parois du canal, c'est-à-dire qu'il y a une transition des vitesses maximales aux vitesses minimales.

L'ajustement de l'ensemble du nuage de points donne des relations de la forme polynomiale entre V/V_1 et x/L_j :

Y= -8cm :

La vitesse relative au fond V_f/V_1 : $y = 0,518x^2 - 1,249x + 0,755$ (4.4)

La vitesse relative de la surface V_s/V_1 : $y = 0,395x^2 - 1,045x + 0,770$ (4.5)

Y= +8cm :

La vitesse relative au fond V_f/V_1 : $y = 0,167x^2 - 0,433x + 0,290$ (4.6)

La vitesse relative de la surface V_s/V_1 : $y = 0,329x^2 - 0,899x + 0,684$ (4.7)

Les coefficients de détermination R^2 , respectivement : $R^2(4.4) \approx 0,72$ et $R^2(4.5) \approx 0,95$
 $R^2(4.6) \approx 0,92$ et $R^2(4.7) \approx 0,93$.

IV.4.2 Deuxième expérience

On considère la hauteur pré le fond du canal est de $h = 2,5\text{cm}$, la hauteur de la couche supérieur d'eau à la surface est à $h=22\text{cm}$. La vitesse dans la section initiale est de $V_1=445\text{cm/s}$, la longueur de ressaut $L_j = 231\text{cm}$.

A. Les vitesses dans le centre du canal

Tableau 4.19 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x , ($Y=0$).

Y=0					
x	x/L _j	V _f	V _s	V _f /V ₁	V _s /V ₁
130	0,56	47,55	148,48	0,107	0,333
140	0,61	-37,72	-149,99	0,085	0,336
150	0,65	29,06	144,09	0,065	0,323
160	0,69	42,47	148,24	0,095	0,332
170	0,74	29,06	144,09	0,065	0,323
180	0,78	29,18	144,67	0,065	0,324
190	0,82	21,36	142,90	0,048	0,320
200	0,87	22,92	141,94	0,051	0,318
210	0,91	15,39	138,89	0,034	0,311
220	0,95	18,28	139,22	0,041	0,312
230	1,00	8,45	129,91	0,019	0,291
240	1,04	15,05	108,4	0,034	0,243
250	1,08	7,70	106,60	0,017	0,239

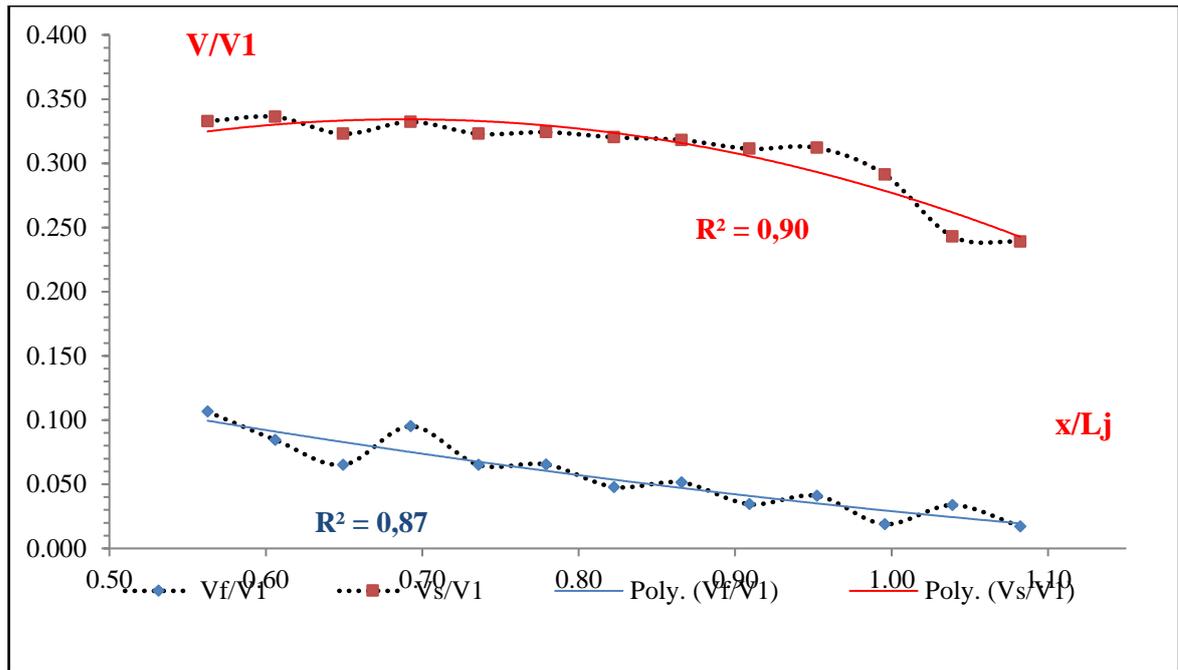


Figure 4.27 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V/V_1) en fonction de la position relative x/L_j pour $Y=0$

Comme nous l'avons mentionné précédemment sur le fait de ne pas pouvoir mesurer la vitesse au fond du canal, ces résultats ne diffèrent pas de ceux obtenus dans la première expérience en ce qui concerne les vitesses relatives au centre du canal, car elles diminuent chaque fois que la direction est vers le seuil, ce dernier varie parfois en fonction de la relation avec la position relative le long du canal. La même observation s'applique aux vitesses relatives de la surface (figure 4.27).

Un ajustement de l'ensemble du nuage de points, par la méthode des moindres carrés non linéaire, donne des relations de la forme polynomiale entre V/V_1 et x/L_j :

Pour la vitesse relative au fond V_f/V_1 :

$$y = 0,087x^2 - 0,297x + 0,239 ; R^2 \approx 0,87 \quad (4.8)$$

Pour la vitesse relative de la surface V_s/V_1 :

$$y = -0,592x^2 + 0,816x + 0,053 ; R^2 \approx 0,90 \quad (4.9)$$

B. Les vitesses dans les côtés du canal

Tableau 4.20 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x , $Y = -8, +8\text{cm}$.

x	x/L _j	Y= -8cm				Y= +8cm			
		V _f	V _s	V _f /V ₁	V _s /V ₁	V _f	V _s	V _f /V ₁	V _s /V ₁
130	0,56	-47,01	-148,24	0,105	0,332	-74,29	-146,16	0,166	0,328
140	0,61	42,42	-148,09	0,095	0,332	-81,67	144,26	0,183	0,323
150	0,65	29,01	140,96	0,065	0,316	-56,25	144,24	0,126	0,323
160	0,69	24,58	137,24	0,055	0,308	39,73	140,16	0,089	0,314
170	0,74	29,99	140,2	0,067	0,314	18,32	108,16	0,041	0,242
180	0,78	24,24	139,12	0,054	0,312	30,28	118,71	0,068	0,266
190	0,82	22,43	140,4	0,05	0,315	13,97	68,18	0,031	0,153
200	0,87	16,38	137,09	0,037	0,307	9,82	62,3	0,022	0,14
210	0,91	19,06	130,55	0,043	0,293	11,78	50,04	0,026	0,112
220	0,95	22,63	120,38	0,051	0,27	20,38	59,97	0,046	0,134
230	1	17,44	102,05	0,039	0,229	6,37	51,4	0,014	0,115
240	1,04	23,7	105,22	0,053	0,236	23,75	50,04	0,053	0,112
250	1,08	11,77	100,14	0,026	0,224	7,18	50,68	0,016	0,114

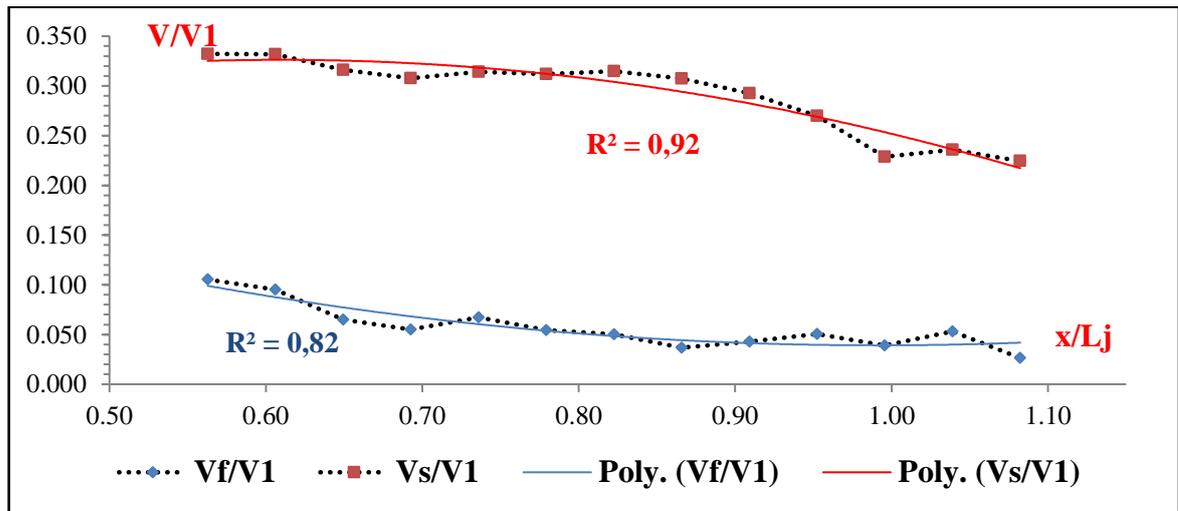


Figure 4.28 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V/V_1) en fonction de la position relative x/L_j pour $Y = -8\text{cm}$

Le contact direct avec les parois du canal a donné les résultats indiqués sur les figures 4.28 et .429, la forte diminution de vitesse qui a été enregistrée est inévitablement due au frottement imposé aux particules liquides qui prennent une direction en aval. Ces résultats confirment toutes les observations mentionnées dans l'expérience précédente concernant les vitesses relatives à surface et au fond du canal.

Par conséquent, la relation entre les vitesses relatives et les positions relatives est une relation directe, chaque fois qu'il y a un pas vers l'aval, il s'accompagne d'une vitesse relative inférieure à la précédente.

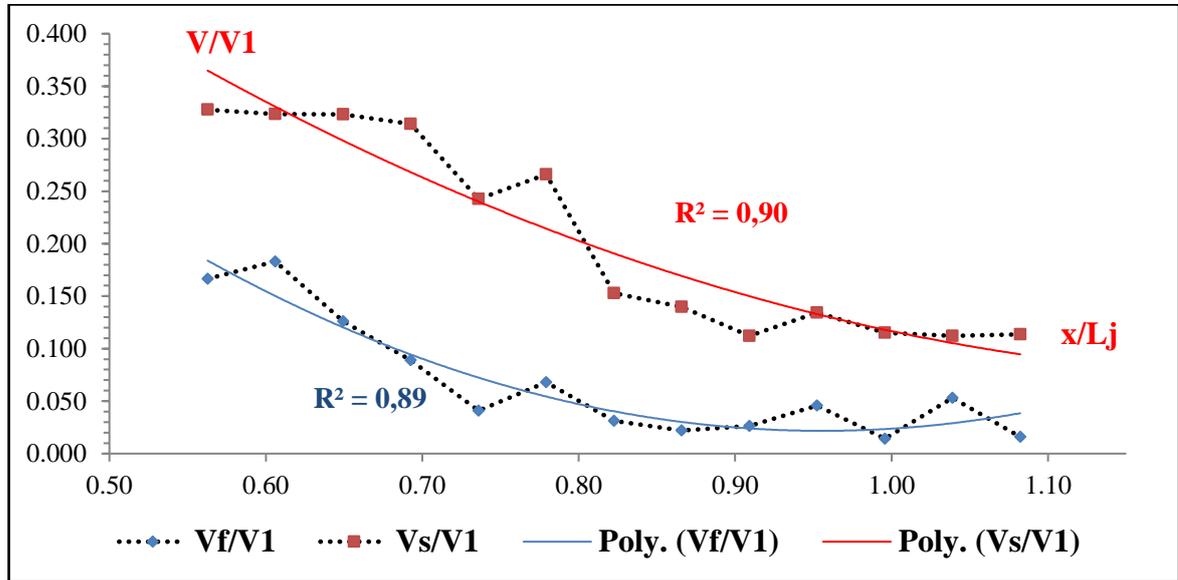


Figure 4.29 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V/V_1) en fonction de la position relative x/L_j pour $Y = +8\text{cm}$

L'ajustement de l'ensemble du nuage de points donne des relations de la forme polynomiale entre V/V_1 et x/L_j :

Y = -8cm :

La vitesse relative au fond V_f/V_1 :

$$y = 0,325x^2 - 0,645x + 0,359 ; R^2 \approx 0,82 \quad (4.10)$$

La vitesse relative de la surface V_s/V_1 :

$$y = -0,486x^2 + 0,593x + 0,145 ; R^2 \approx 0,92. \quad (4.11)$$

Y = +8cm :

La vitesse relative au fond V_f/V_1 :

$$y = 1,050x^2 - 2,008x + 0,981 ; R^2 \approx 0,89 \quad (4.12)$$

La vitesse relative de la surface V_s/V_1 :

$$y = 0,578x^2 - 1,472x + 1,01 ; R^2 \approx 0,90 \quad (4.13)$$

IV.4.2.1 Récapitulation

Nous pouvons tirer quelques récapitulations sur l'effet de la valeur de vitesse maximale au fond V_f et à la surface V_s du canal à la position relative $x/L_j < 0,6$:

Dans le fond du canal ; la section longitudinale au centre du canal représente un lit mineur. Nous appelons cette section au centre le cœur de l'écoulement, de sorte que l'effet de vitesse maximale de fond V_f se manifeste par une érosion.

Concernant la vitesse maximale à la surface V_s , s'il y'a des objets solides flottant à la surface du canal peuvent endommager considérablement les installations techniques et hydrauliques.

IV.5 Conclusion

Ce dernier chapitre de notre étude, consiste à illustrer notre propre contribution dans la distribution des vitesses, ce travail a été réparti dans deux volets.

Dans le premier volet, nous avons présentée les résultats expérimentaux. La perspective longitudinale des vitesses en fonction la position x de chaque profondeur h , s'avère qu'il y a deux parties, la première partie où la vitesse au fond du canal près du convergent sont plus grandes que la surface, et la deuxième partie, les vitesses à la surface sont supérieures à celles du fond du canal, toutes les vitesses diminuant lorsque la direction est vers l'aval. La perspective transversale confirme que la vitesse au centre sont à leur valeur maximale et diminuent sur les côtés du canal.

Le deuxième volet, concerne l'utilisation des résultats obtenus pour montrer la relation entre les vitesses relative (V_f / V_1 et V_s / V_1) et le rapport de position relative (x/L_j). Cette relation a été exprimé par une fonction polynomiale ($y = a.x^2 + b.x + c$) après un ajustement de l'ensemble des points du nuage cette analyse des données donne des bons coefficients de détermination R^2 entre 0,72 et 0,96.

[CONCLUSION GENERALE]

CONCLUSION GENERALE

La présente étude s'intéresse à développer, théoriquement et expérimentalement, le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince évoluant dans un canal trapézoïdal à base rectangulaire. Quatre chapitres ont été proposés; le premier et le deuxième chapitre sont consacrés à l'étude bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine. Le troisième et quatrième chapitre consiste au développement de notre propre contribution dans le domaine de la distribution des vitesses horizontales.

Dans le premier palier de notre étude expérimentale, nous avons présenté nos résultats de la distribution des vitesses longitudinales et transversale dans des tableaux exprimés sur des graphes. La répartition générale des vitesses longitudinales a donné une variation de vitesse (V) en fonction des coordonnées longitudinales (x) pour chaque axe (Y) de chaque hauteur (h) le long du canal, où nous avons conclu qu'il y a une diminution des vitesses sur tous les axes lorsque nous nous dirigeons vers l'aval. La vitesse au centre du canal (l'axe $Y=0$) étant souvent la plus grande. La répartition générale des vitesses transversales a montré la différence de vitesse d'une section à une autre et confirme que la vitesse au centre est toujours plus grande et diminue sur les côtés du canal, on a présenté les résultats des vitesses (V) en fonction des coordonnées transversales sur l'axe des Y de chaque hauteur (h).

Le deuxième palier de la partie expérimentale, a été consacré de montré la relation relative entre les vitesses de fond et de surface de l'écoulement dans le ressaut (V_f/V_1 et V_s/V_1) et le rapport de position relative (x/L_j). Des bonne résultats confirme les remarques précédentes et montre que les vitesses maximales au fond du canal de la partie amont du rouleau sont très importantes. De la même façon, les vitesses à la surface qui représentent la couche superficielle de l'écoulement, ont des valeurs importantes.

PRINCIPALES NOTATIONS

A_1	L'aire de la section mouillée initiale	$[m^2]$
A_2	L'aire de la section mouillée finale	$[m^2]$
B	La grande base du canal trapézoïdal	$[m]$
b	La petite base du canal trapézoïdal	$[m]$
IF_1	Nombre de Froude incident	$[-]$
F	Force de frottement	$[N/ m^2]$
g	Accélération de la pesanteur	$[m/s^2]$
G	Poids de la tranche liquide	$[N]$
H	Hauteur du ressaut	$[m]$
h_1	Hauteur initiale du ressaut	$[m]$
h_2	Hauteur finale du ressaut	$[m]$
\bar{h}	Distance entre le centre de gravité de la section transversale et la surface libre de l'écoulement	$[m]$
$h(x)$	Profondeur d'eau à la distance x du pied du ressaut	$[m]$
H	Charge totale	$[m]$
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	$[m]$
M	La hauteur relative initiale du ressaut $M = (m.h_1)/b$	$[-]$
m	Cotangente de l'angle d'inclinaison d'un talus	$[-]$
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	$[-]$
V_1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	$[m/s]$
V_2	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	$[m/s]$
W	Rapport d'aspect $W = h_1/b$	$[-]$

x	Position de seuil	[m]
X	Position relative de seuil	[-]
Y	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	[-]
Y^*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
α	Facteur de correction de l'énergie cinétique	[-]
β	Facteur de correction de la quantité de mouvement	[-]
Θ	Angle d'inclinaison du canal	[-]
$\bar{\omega}$	Poids spécifique du liquide	[-]
η	Rendement du ressaut	[-]
τ	Rapport des hauteurs	[-]
β	Rapport de l'élargissement	[-]
x_{rf}	Position de la fin du rouleau de fond à l'aval	[m]
V_f	Vitesse moyenne au fond du canal	[m ² /s]
V_s	Vitesse moyenne de la surface du canal	[m ² /s]
V_c	Vitesse moyenne dans les cotés du canal	[m ² /s]
V/V_1	Vitesse relative	[-]
V_f/V_1	Vitesse relative au fond du canal	[-]
V_s/V_1	Vitesse relative de la surface du canal	[-]
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 forme $\beta = b/B$	[-]
U	Représente la vitesse de différents points de mesure	[cm/s]
U_m	La vitesse maximale	[cm/s]
U / U_m	Rapport de la vitesse relative	[-]

[LISTE DES FIGURES]

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure 1.1 : Schématisation d'un ressaut hydraulique.	2
Figure 1.2 : Forme du ressaut classique.	3
Figure 1.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut.	4
Figure 1.4 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger (1828).	6
Figure 1.5 : Hauteur du ressaut.	6
Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique : a) Rouleau développé, b) Rouleau non développé.	7
Figure 1.7 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique.	8
Figure 1.8 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude. (---) Courbe tracée selon la relation (1.25). (---) Courbe tracée selon la relation (1.26).	10
Figure 1.9 : Schéma du ressaut contrôlé par un seuil continu à mince paroi.	11
Figure 1.10 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de x/h_2 .	11
Figure 1.11 : Schéma de définition pour le ressaut hydraulique.	12
Figure 1.12 : Dissipation de l'énergie relative, $\varepsilon = \Delta H / H_1$ en fonction de IF_1 et de M pour un canal rectangulaire ($M = 0$) et triangulaire ($1/M = 0$).	13
Figure 1.13 : Vue schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut en canal trapézoïdal. (—>) courants de surface, (--->) courants de fond.	15
Figure 1.14: Variation du rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ pour différents valeurs de M . (—) Courbe lié à l'équation théorique (4). (...) Courbe pour $M = 0$ (canal rectangulaire), (\blacktriangledown) $M = 0.1$, (\blacksquare) $M = 0.2$, (\blacktriangle) $M = 0.3$, (\bullet) $M = 0.4$. (\cdot — \cdot) Courbe pour $M = \infty$ (canal triangulaire).	16

Figure 1.15: Caractéristiques principales du rouleau de fond: a) distance d'approche. b) longueur maximale. c) hauteur maximale adimensionnelle h_b/h_2 en fonction de IF_1 , et de M . Les notations sont celles de la Figure 15. d) croquis de définition.	17
Figure 1.16 : Longueur relative du ressaut $\lambda_j = L_j/h_2$ en fonction de IF_1 et M . Les notations sont conformes à la Figure 1.13. (.....) Courbe du ressaut hydraulique en canal rectangulaire.	18
Figure 1.17 : Structure tridimensionnelle de l'écoulement en lit composé droit, d'après Shiono et Knight (1991).	19
Figure 1.17.a : Définition des paramètres géométriques d'un canal de section rectangulaire composée.	20
Figure 1.17.b : Définition des paramètres géométriques d'un canal de section trapézoïdal composée.	20
Figure 1.18: Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit Khattaoui et Achour (2012).	21
Figure 1.19 Variation de Y , calculé par (1.34), en fonction de IF_1 , (---) : $\beta = 1$ Khattaoui et Achour (2012).	23
Figure 1.20 : Variation de Y en fonction de IF_1 . (o) : équation (1.34), (+) : équation (1.35), Khattaoui et Achour (2012).	24
Figure 1.21 : Variation de η en fonction de IF_1 . (---) : $\beta = 1$. Y est calculé par l'équation (1.37), (Khattaoui et Achour 2012).	25
Figure 1.22 : Variation de η en fonction de IF_1 . (o) : équation (1.35), (+) : équation (1.34), Khattaoui et Achour (2012).	25

Chapitre II

Figure 2.1 : Notation pour l'écoulement interne du ressaut hydraulique	28
Figure 2.2 : Représentation adimensionnelle de la répartition de vitesse V en fonction de Z , Selon Schroder (1963).	28
Figure 2.3 : Distribution des vitesses $u(z)$ dans la partie inférieure du ressaut	28
Figure 2.4 : Distribution des vitesses $U(Z)$, pour différentes longueurs relatives $X = x/L$. $IF_1 = 5,50$. $X = (\blacksquare) 0,2; (\blacktriangleright) 0,3; (\blacktriangleleft) 0,4; (\triangle) 0,5; (\blacktriangle) 0,6; (\nabla) 0,7; (\blacktriangledown) 0,8; (o) 0,9; (\bullet) 1$.	30
Figure 2.5 : Distribution des vitesses $U(Z)$, pour différentes longueurs relatives $X = x/L$. $IF_1 = 6,85$. Même notation que la figure 2.4.	30
Figure 2.6 : Ressaut hydraulique classique, vitesse maximale inférieure relative U_m en fonction de la longueur relative X . (—) Courbe tracée selon l'équation.1.7. $IF_1 = (o) 4,3, (\blacktriangle) 4,95, 5,5, (\triangle) 6,85, (\blacksquare) 8,9. (\square)$	31
Figure 2.7 : Ressaut hydraulique classique, 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.	31
Figure 2.8 : 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.	32
Figure 2.9 : Vitesse de surface adimensionnelle pour $0 < x < L_r$ et $x > L_r$ d'après les définitions 2.9 et 2.10.	33
Figure 2.10: 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 .	33
Figure 2.11 : barrage de Xiangjiaba et ses annexes principales	34
Figure 2.12 : Schéma de principe de l'installation d'essai	35
Figure 2.13: Distribution de la vitesse horizontale pour les orifices de la couche supérieure	39
Figure 2.14: Distribution de la vitesse horizontale pour les orifices de la couche inférieure	40

Figure 2.15 : Ressaut classique. Profil des vitesses moyennes horizontales dans l'axe de symétrie du canal, pour différentes positions x (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. 41

Figure 2.16 : Ressaut classique. Profil des vitesses moyennes horizontales dans l'axe de symétrie du canal, pour différentes positions x (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. 42

Figure 2.17 : 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) = :(\square)30, (\diamond) 50, (\triangle)70,(o)90, (\blacksquare)110, (\blacklozenge)130, (\blacktriangle)160, (\bullet)180. 42

Figure 2.18: profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située à $x/L_r=0,12$. 44

Figure 2.19: profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située à $x/L_r = 0,2$. 44

Figure 2.20 : profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située à $x/L_r = 0,41$. 44

Figure 2.21: profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située à $x/L_r = 0,65$. 44

Figure 2.22 : profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située à $x/L_r = 1,10$. 45

Figure 2.23: profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située à $x/L_r = 1,23$. 45

Figure 2.24: profils des vitesses horizontales dans la section du ressaut triangulaire située $x/L_r = 1,50$. 45

Chapitre III

Figure 3.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal, ayant servi à l'expérimentation.	47
Figure 3.2.a : Photographie du model expérimentale du canal.	48
Figure 3.2.b : Photographie de la forme du canal.	48
Figure 3.3 : Pompe centrifuge axiale.	48
Figure 3.4 : Schéma descriptif de Limnimètre.	49
Figure 3.5 : Photographie du série des convergents.	50
Figure 3.6 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit.	50
Figure 3.7 : Micromoulinet et ses appareils annexes : a) Micromoulinet b) L'indicateur c) Appareil de transfert d) Ordinateur.	51
Figure 3.8 : Photographie de la Micromoulinet et ses appareils annexes.	51
Figure 3.9 : Maillage et système d'axes adoptés pour la mesure des vitesses horizontales.	52
Figure 3.10: Photographie des seuils minces testés avec le support de fer.	53

Chapitre IV

Figure 4.1 : Ressaut contrôlé h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x : position du seuil par rapport au pied du ressaut, ΔX distance séparant le convergent du pied du ressaut, C convergent, R réservoir.	54
Figure 4.2 : Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé évoluant dans un canal trapézoïdal à base rectangulaire, $IF_1=6,85$, $s=15\text{cm}$, $L_s= 400\text{cm}$, $L_j = 232$, $h_2=28,4\text{cm}$, $h_1=3\text{cm}$.	55
Figure 4.3 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=0$, pour différentes positions x (cm), $x < L_s$.	58

Figure 4.4 : Distribution des vitesses moyennes pour la section longitudinale $Y = 0$.	59
Figure 4.5 : Profil $Y = -4\text{cm}$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.3	60
Figure 4.6 : Profil $Y = +4\text{cm}$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.3	61
Figure 4.7 : Profil $Y = -8\text{cm}$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.3	62
Figure 4.8 : Profil $Y = +8\text{cm}$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.3	63
Figure 4.9 : Profil $Y = -10\text{cm}$, $x < L_s$.	64
Figure 4.10 : Profil $Y = +10\text{cm}$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.9	65
Figure 4.11 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 120\text{cm}$, pour différentes positions Y (cm), $IF=6,85$, $x/L_r = 0,63$, $x < L_s$.	66
Figure 4.12 : $x = 140\text{cm}$, $x/L_r = 0,74$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.11	67
Figure 4.13 : $x = 160\text{cm}$, $x/L_r = 0,84$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.11	67
Figure 4.14 : $x = 220\text{cm}$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.11	68
Figure 4.15 : $x = 380\text{cm}$, $x / L_s=0,95$. Mêmes notations que la figure 4.11	69
Figure 4.16 : Profil des vitesses moyennes horizontales $Y = 0\text{cm}$.	71
Figure 4.17 : $Y = -4\text{cm}$. Mêmes notations que la figure 4.16	71
Figure 4.18 : $Y = +4\text{cm}$. Mêmes notations que la figure 4.16	72
Figure 4.19 : $Y = -8\text{cm}$. Mêmes notations que la figure 4.16	73
Figure 4.20 : $Y = +8\text{cm}$. Mêmes notations que la figure 4.16	73
Figure 4.21 : Variation des vitesses près les parois du canal, $Y = -10, +10\text{cm}$.	74
Figure 4.22 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 130\text{cm}$, pour différentes positions Y (cm), $IF=8.38$, $x/L_r = 0,84$ $x < L_s$.	75
Figure 4.23 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 250\text{cm}$ $x/L_r = 1,63$, $x < L_s$. Mêmes notations que la figure 4.21	76
Figure 4.24 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V/V_1) en fonction de la position relative x/L_j pour $Y=0$.	79

Figure 4.25 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V/V_1) en fonction de la position relative x/L_j pour $Y = -8\text{cm}$.	81
Figure 4.26 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V/V_1) en fonction de la position relative x/L_j pour $Y = +8\text{cm}$.	81
Figure 4.27 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V/V_1) en fonction de la position relative x/L_j pour $Y = 0$.	83
Figure 4.28 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V/V_1) en fonction de la position relative x/L_j pour $Y = -8\text{cm}$.	84
Figure 4.29 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V/V_1) en fonction de la position relative x/L_j pour $Y = +8\text{cm}$.	85

[LISTE DES TABLEAUX]

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II

Tableau 2.1 : conditions hydraulique respectif à l'expérience de Chen et al (2014).	36
Tableau 2.2 : Conditions hydraulique respectif à l'expérience de DEBABECHE (1996).	43

Chapitre IV

Tableau 4.1 : Conditions et paramètres hydraulique respectif à la première expérience.	56
Tableau 4.2 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = 0$.	57
Tableau 4.3 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -4\text{cm}$.	59
Tableau 4.4 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = +4\text{cm}$.	61
Tableau 4.5 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -8\text{cm}$.	62
Tableau 4.6: Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = +8\text{cm}$.	63
Tableau 4.7 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -10\text{cm}$.	64
Tableau 4.8 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = +10\text{cm}$.	65
Tableau 4.9 : Conditions et paramètres hydraulique respectif au deuxième essai.	70
Tableau 4.10 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = 0$.	70
Tableau 4.11 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la	

section longitudinale $Y = -4\text{cm}$.	71
Tableau 4.12 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = +4\text{cm}$.	72
Tableau 4.13 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -8\text{cm}$.	72
Tableau 4.14 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = +8\text{cm}$.	73
Tableau 4.15 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -10\text{cm}$ de hauteur $h = 22\text{cm}$.	74
Tableau 4.16 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = +10\text{cm}$ de hauteur $h = 22\text{cm}$.	74
Tableau 4.17 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x , ($Y=0$).	78
Tableau 4.18 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x , $Y = -8, +8\text{cm}$.	80
Tableau 4.19 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x , ($Y=0$).	82
Tableau 4.20 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x , $Y = -8, +8\text{cm}$.	84

{ REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES }

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achour, B., Debabeche, M., Khattaoui, M., Bedjaoui, A., (2002) Ressaut Hydraulique Classique et Contrôlé dans quelques profils de canaux (première partie), 'LARHYSS JOURNAL' – Journal du Laboratoire de recherches en Hydraulique Souterraine et de Surface, Université de Biskra, N° 1, pp. 37-72.
- Andersen J, V. M., (1978) Undular hydraulic jump, Proc, ASCE, J, Hydraulics Division, Vol. 104, pp. 1185-1188.
- Argyropoulos, P. A., (1962) General solution of the Hydraulic Jump in Sloping Channels, Proc. ASCE, J; Hydraulics Division, Vol.88, pp.61-75.
- Bakhmeteff, B. A., Matzke, A. E., (1936) The hydraulic jump in terms of dynamic similarity, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol,101, pp, 630-647.
- Bidone, G., (1819). "Observations on the Height of the Hydraulic Jump", a Report Presented in Meeting of Royal Academy of Science of Turin, pp. 21-80, 1819.
- Bousmar D, Rivière N, Proust S, Paquier A, Morel R, Zech Y. (2005) Upstream discharge distribution in compound-channel flumes. J H Eng 2005, ASCE; 131(5): 408-412.
- Bradley, J. N., Peterka, A. J., (1957) The hydraulic design of stilling basins, Hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I), paper 1401; High dams, earth dams, and large canal structures (Basins II), paper 1402; short stilling basins for canal structures, small outlet works, and small spillways (Basin III), paper 1403; stilling basin and wave suppressors for canal structures, outlet works and diversion dams (Basin IV), paper 1404; stilling basin with sloping ; apron (Basin V), paper 1405; small basins for pipe or open channel outlets no tailwater required (Basin VI), paper 1406, Proceedings, American Society of Civil Engineers, J. Hydraulics division, vol.83, No. HY5.
- Carlier, M., (1980). Hydraulique Générale et Appliquée 1er édition.
- Chen, J. G., Zhang, J. M., Xu, W. L., et 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, American Society of Civil Engineers.

Debabeche, M., (1996) Contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, Thèse de Magistère, Université de Biskra, Algérie.

Debabeche, M., (2003) Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques, Thèse de Doctorat d'état, Université de Biskra, Algérie.

Forster, J. W., Skrinde, R. A., (1950) Control of hydraulic jump by sills, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 115, pp. 973-987.

Görtler, H. (1954). "Decay of swirl in an axially symmetrical jet far from the orifice." *Revi. matematica hispano Americanas*, 14(4-5), 143-178

Hachemi Rachedi, L., (2006). Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, mémoire de magistère en science hydrauliques, Département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

Hager, W. H., Sinniger, R., (1986) Flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise, *J. Hydraulic Research*, vol.23, 1985, No.2 pp.101-113; Vol.24, No.3, pp. 207-215.

Hager, W. H., (1992) Energy Dissipators and Hydraulic Jump, Water Science and Technology Library, Vol.8, Laboratory of Hydraulic, VAW, ETH, Zurich, Switzerland.

Khattaoui. Achour, B (2012). Ressaut hydraulique en lit compose. *Revue scientifique et technique*, LJEE N°20. Juin 2012.

Law, A. W. K., et Herlina. (2002). "An experimental study on turbulent circular wall jets." *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002) 128:2(161), 161-174.

Moore, W. L., (1943), Energy loss at the base of a free overfall. *Trans. ASCE* 108, 1343-1392.

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

Proust, S (2005). Ecoulements non-uniformes en lits composés effet de la variation de la largeur du lit majeur, thèse de doctorat, INSA Lyon, France.

Rajaratnam, N., Subramanya, K., (1968) Profile of the Hydraulic Jump, Proc. ASCE J. Hydraulic Division, 94, HY3, 663-676 ; Vol. 95, HY1, 546-557 ; HY2, 725-727, Vol. 96, 1970, HY2, 579-580.

Safranez, K., (1933) Länge des Wechselsprunges, Wasserkraft, und Wasserwirtschaft, Munich, Vol.28, No24, 99.27-282, 1933.

Safranez, K., Untersuchungen über de Wechselsprung, Der Bauingenieur, Berlin, Vol.10, No37,pp.649-651,1955.

Schroder, R., (1963) Die turbulent Strömung im freien Eckseelsprung, Habilitationsschrift, Mitteilung 59, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin, ed. H. Press, Berlin.

Sellin, R. H. J. (1964)." A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel Ofa river and that over its flood plain" La Houille Blanche (7): 793-802.

Shiono, K., and Knight, D. W. (1991). "Turbulent open channel flows with variable depth across the channel." Journal of Fluid Mechanics, 222, 617-646.

Wanoschek, R., Hager, W. H., "hydraulic jump in trapezoidal channel", j. hydr. Research, Vol. 27, 1989, 429-446.

