

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 :2019/2020



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع 2020/2019

Mémoire de Master

Filière : : Urban Hydrauliques

Spécialité :: Hydraulique

Thème

**Distribution des vitesses dans le ressaut hydraulique forcé de type
A en canal composé**

Nom et Prénom de l'étudiant :
Chergui Mohammed Amine

Encadreur : :Fouzi Bouriche

Année universitaire : 2019 - 2020

Remerciements

Pour ce travail, j'ai bénéficié des orientations, encouragements et précieux conseils de mon encadreur, Dr. BOURICHE FOUZI, 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. Aussi tous les enseignants de

notre département d'hydraulique.

Je tiens également à remercier Tous les professeurs distingués pour toute l'aide qu'il m'a prodigué au cours de l'élaboration de cette étude, qui m'ont permis de réaliser cette recherche et m'ont fait bénéficier de leur

aide, conseils et encouragements.

Dédicace

*Tout d'abord, je voudrais dédier cet humble acte à la mémoire de mon
père*

*Chergui Taher, que Dieu ait pitié de lui. Et ma chère mère doit être
fière de moi le*

*Succès, avec son amour, sa tendresse, son soutien, toute son aide
Et sa présence dans ma vie. Vous le garderez toujours à l'esprit.*

Et leurs sacrifices et leur patience avec ouverture

*Leurs bras traversent des moments difficiles et m'aident à avancer, à
Meilleur futur.*

À mes frères Abdel-Haq, Abdel-Hamid, Abdel-Hakim.

À ma sœur, Karima, Hanan

*À l'ami, collègue et frère de Bin Salem DHirar, pour son soutien, son
aide et ses encouragements dans la réalisation de la recherche, et je lui
souhaite plein succès dans sa vie professionnelle, ainsi qu'à tous les
amis.*

à tous mes amis.

Résumé

Ce mémoire a pour but d'explorer théoriquement et expérimentalement le comportement des vitesses horizontales dans un ressaut hydraulique forcé de type A par seuil à parois mince évoluant dans un canal composé du trapèze à base rectangulaire. Nos essais ont été réalisés dans un modèle réduit conçu au laboratoire d'hydraulique de l'Université de Biskra.

Nous avons exposé et analysé nos résultats primaires des mesures des vitesses dans des profils longitudinaux et transversaux c'est pour décrire le comportement de notre configuration du ressaut. Nous avons utilisé notre résultat de mesure de la couche superficielle et profonde de l'écoulement dans notre configuration de ressaut, pour montrer la relation entre les vitesses relatives de surface et de fonds (V_f/V_1 et V_s/V_1) avec la position relative (x/L_b).

المخلص

تهدف هذه الأطروحة إلى استكشاف سلوك السرعات الأفقية نظرياً وتجريبياً في قفزة هيدروليكية إجبارية من النوع "أ" بواسطة عتبة رقيقة الجدران تتطور في قناة مكونة من شبه منحرف بقاعدة مستطيلة. تم إجراء اختباراتنا في نموذج مصغر تم تصميمه في المختبر الهيدروليكي بجامعة بسكرة.

لقد قمنا بعرض وتحليل نتائج أولية لقياسات السرعة في المقاطع الطولية والعرضية التي تصف سلوك القفزة كما قمنا باستعمال نتائج القياسات الخاصة بالطبقة السطحية والعميقة للجريان في تكوين القفزة وهذا لي اظهر العلاقة بين السرعات النسبية السطحية والعميقة مع الموضع النسبي.

Mots clés : Ressaut forcé de type A, Canal composé, Vitesse relative de fond, Vitesse relative de surface, Position relative.

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION GENERALE..... | I |
| I.1 Introduction..... | 1 |
| I.2 Ressaut hydraulique force dans un canal rectangulaire | 1 |
| I.2.1 Le nombre de Froude..... | 1 |
| I.2.2 Ressaut hydraulique classique | 2 |
| I.2.3 Classification du ressaut classique | 3 |
| I.2.4 Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut | 5 |
| I.2.5 Caractéristiques géométriques du ressaut..... | 8 |
| I.2.5.1 Hauteurs du ressaut..... | 8 |
| I.2.5.2 Longueur du rouleau | 9 |
| I.2.5.3 Longueur du ressaut..... | 10 |
| I.2.5.4 Rendement du ressaut | 11 |
| I.2.6 Ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire | 14 |
| I.2.6.1 Approche de Rand | 14 |
| I.2.6.2 8Approche de Bretz | 16 |
| I.3 Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal..... | 19 |
| I.3.1 Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal..... | 19 |
| I.3.2 Rapport des hauteurs conjuguées | 19 |
| I.3.2.1 Cas particulier du canal rectangulaire..... | 20 |
| I.3.2.2 Cas particulier du canal triangulaire | 21 |
| I.3.3 Longueurs caractéristiques du ressaut | 22 |
| I.3.4 Rendement du ressaut hydraulique..... | 23 |
| I.3.4.1 Cas particulier du canal rectangulaire..... | 24 |
| I.3.4.2 Cas du canal triangulaire..... | 24 |

| | | |
|---------|---|----|
| I.4 | Ressaut hydraulique dans les canaux composes (Approche de Khattaoui et Achour 2012) | 25 |
| I.4.1 | La géométrie du canal..... | 25 |
| I.4.2 | L'avantage des canaux de type composé..... | 26 |
| I.4.3 | Caractéristique des écoulements en lit composé | 27 |
| I.4.4 | Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé..... | 28 |
| I.4.4.1 | Rapport des hauteurs conjuguées..... | 28 |
| I.4.4.2 | Rendement du ressaut | 32 |

Chapitre II :

DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

| | | |
|--------|---|----|
| I.5 | Conclusion | 34 |
| II.1 | Introduction..... | 37 |
| II.2 | Ressaut hydraulique classique | 37 |
| II.2.1 | Ressaut hydraulique classique profilé en ‘U’ | 38 |
| II.2.2 | APPROCHE RAJARATNAM et SUBRAMANYA (1968, 1970)..... | 40 |
| II.2.3 | APPROCHE DE HAGER (1992)..... | 41 |
| II.3 | Ressaut hydraulique force type A..... | 46 |
| II.4 | Conclusion | 50 |

Chapitre III :

Description des essais

| | | |
|---------|----------------------------|----|
| III.1 | Introduction..... | 51 |
| III.2 | Description du canal | 51 |
| III.3 | Limnimétrie | 53 |
| III.4 | Mesure du débit | 54 |
| III.5 | Mesure de la vitesse..... | 56 |
| III.6 | Les seuils..... | 58 |
| III.7 | Protocole des essais | 58 |
| III.7.1 | Opérations de mesures..... | 59 |

| | | |
|-------|------------------|----|
| III.8 | Conclusion | 60 |
|-------|------------------|----|

Chapitre IV :

Étude Expérimentale

| | | |
|----------|--|-----|
| IV.1 | Introduction..... | 62 |
| IV.2 | Description des essais | 62 |
| IV.3 | Résultats expérimentaux | 63 |
| IV.3.1 | Premier essai..... | 64 |
| IV.3.1.1 | Distribution Longitudinale des vitesses | 64 |
| IV.3.1.2 | Distribution transversale des vitesses..... | 74 |
| IV.3.1.1 | | 79 |
| IV.3.2 | Deuxième essai..... | 79 |
| IV.3.2.1 | Distribution Longitudinale des vitesses | 79 |
| IV.3.2.2 | Distribution transversale des vitesses..... | 87 |
| IV.3.3 | Récapitulation..... | 90 |
| IV.4 | La relation entre les vitesses relatives et la position relative x/L_b | 91 |
| IV.4.1.1 | | 91 |
| IV.4.2 | Premier essai..... | 91 |
| IV.4.3 | Deuxième essai..... | 98 |
| IV.4.4 | Récapitulation..... | 103 |
| IV.5 | Conclusion | 103 |

INTRODUCTION GENERALE

Les barrages hydrauliques sont soumis à de graves inondations pendant les périodes de fortes précipitations, lorsque le réservoir est plein, l'excès d'eau est évacué par une voie navigable vers la rivière. Cela conduit à un écoulement massif avec une énergie cinétique élevée, par conséquent une génération des forces de tirage nuisibles par leur nature corrosive. Afin d'éviter des dommages importants du lit de la rivière en aval du barrage, l'énergie cinétique de l'écoulement devra être gaspillée. Le moyen le moins cher et le plus pratique est le ressaut hydraulique. Le principe consiste à convertir le débit abondant en un débit fluvial qui conduit à une diminution des forces de tirage.

En premier lieu, c'est *Bidone (1781-1839)* qui a donné la mesure et la description du phénomène du ressaut hydraulique. Plus tard, *Bélangier (1928)* a, pour la première fois, présenté une expression mathématique quant au rapport des hauteurs conjuguées du ressaut ; pour cela, il a appliqué le principe de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de lit horizontal.

Safranez (1927) 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 par ailleurs, le ressaut hydraulique évoluant dans un canal composé n'a pas fait l'objet de beaucoup d'études. Les travaux les plus intéressants sur le ressaut hydraulique dans ce type de canaux sont ceux effectués par *Khattaoui et Achour (2012)*.

Notre présent mémoire comporte quatre chapitres, le premier chapitre, il sera divisé en trois parties importantes :

- À travers la première partie nous allons donner un bref aperçu sur le ressaut hydraulique forcé 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)*, *Rand (1957)* et ceux de *Bretz (1988)*.
- La deuxième partie sera consacré aux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal, à savoir, ceux de *Silvester (1964)*, *Wanoschek et Hager (1989)*.
- Enfin, la troisième partie, nous allons donner un aperçu général 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 consacré à l'étude bibliographique sur la distribution des vitesses dans quel que type de canaux. Notre attention sera portée sur les travaux de *RAJARATNAM et SUBRAMANYA (1968, 1970)*, *Hager (1992)* et *DEBABECHE (1996, 2003)*.

Le troisième chapitre sera consacré à la description détaillée du model expérimental utilisé, notre modèle est mené d'un canal prismatique composé de forme trapézoïdal à base rectangulaire et un système d'eau (réservoir et pompes dans un système fermé) et un micro-moulinet a écran digital pour mesurer les vitesses moyennes dans des points de notre maillage. Le présent chapitre consiste aussi a montré le protocole expérimental suivi dans notre travail empirique.

Le quatrième chapitre est divisé en deux parties, la première, il vise à présenter et analysé les résultats expérimentaux de la distribution des vitesses moyennes horizontales en profil longitudinal et transversal. La deuxième partie consiste à trouver la relation des vitesses relatives de surface (V_s/V_1) et de fond du canal (V_f/V_1) avec la distance relative (X/L_b).

Notre étude expérimentale a un but principal dont il est ; la mesure des vitesses horizontales et leurs comportements dans le ressaut hydraulique forcé par un seuil mince dans un canal composé trapézoïdal à base rectangulaire.

Chapitre I :

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

Chapitre I RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

I.1 Introduction

Les premières recherches dans ce domaine reposent sur le ressaut classique (dans un canal linéaire droit sans obstacles). Le ressaut hydraulique est caractérisé par la longueur du rouleau L_r et la longueur du ressaut L_j , ces propriétés ne peuvent être connues qu'empiriquement. Les travaux présentés par Rand et al (1957) fait l'objet de notre revue de la littérature. Nous passerons aussi en revue les travaux de Hager et Singer (1986).

Dans la deuxième partie, nous étudierons certains travaux effectués sur les caractéristiques de ressaut hydraulique du canal trapézoïdal fourni par Sylvester (1964), Wanoschek et Hajar (1989) dans le ressaut classique.

Dans la troisième partie, nous parlerons du petit lit et du grand lit du canal à deux étages. Ce type de canal existe dans les rivières, ainsi que dans les réseaux d'entretien des égouts, et nous étudierons les travaux de Achour et Khatawi (2012) sur les caractéristiques du ressaut hydraulique en canal composé.

I.2 Ressaut hydraulique force dans un canal rectangulaire

I.2.1 Le nombre de Froude

Le nombre de Froude pour les écoulements à surface libers' écrit ;

$$F_1 = \frac{u}{\sqrt{g \cdot h}}$$

Certains auteurs adoptent le carré de cette valeur pour caractériser la dynamique da l'écoulement, un écoulement est fluvial si le nombre de Froude $F_1 < 1$, critique si $F_1 = 1$ et torrentiel si $F_1 > 1$.

Chapitre I : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

$$F1 = \frac{Q^2 * \partial A}{g * A^3 * \partial h}$$

Où :

Q : débit (m^3/s)

G : l'accélération gravitationnelle (s/m^2)

A= (x, h) est la section mouillée (m^2), x est la coordonnée longitudinale et h la hauteur d'eau (m)

I.2.2 Ressaut hydraulique classique

Le ressaut hydraulique est un phénomène défini comme le passage de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial (Figure 1.1).

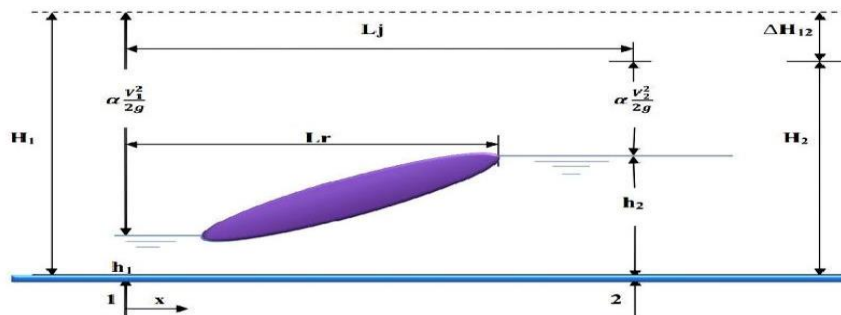


Figure 1.1: Ressaut Hydraulique.

Ce phénomène dépend de la vitesse initiale du fluide, donc si cette vitesse est inférieure à la vitesse critique, c'est-à-dire que le nombre de Froude est inférieur à < 1 , il n'y aura pas de ressaut possible. Lorsque la vitesse du fluide n'est pas beaucoup plus élevée que la vitesse critique, c'est-à-dire que le nombre de Froude est supérieur à > 1 , la transition apparaît comme un système de vagues. Si la vitesse d'écoulement devient plus élevée, la transition devient de plus en plus

Chapitre I : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

Soudaine, jusqu'à ce que la zone de transition soit brisée et enroulée autour d'elle. Lorsque ce phénomène se produit.

H_1 et H_2 représentent les profondeurs élevées. La distance L_j entre les sections 1 et 2 est appelée longueur de projection et la distance L_r est appelée longueur de rouleau. Il représente une chute de pression de ΔH_{1-2} .

La capacité de dissipation par projection est généralement évaluée par le rapport de la chute de pression qu'elle provoque entre ces première et dernière section sur la charge totale dans la première section.

I.2.3 Classification du ressaut classique

Le ressaut classique est noté Froude F_1 qui marque le flux amont du ressaut. Pour $F_1 = 1$, le système est lent ou critique et il n'y a pas de saut. Pour Froude des valeurs comprises entre 1 et 1,7 et cela selon Andersen (1978).

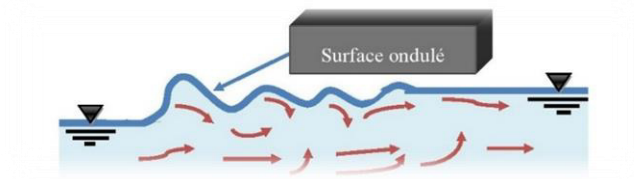


Figure 1.2.a : Ressaut ondulé

Bradly et Peter ka (1957) après plusieurs expériences ont classé le ressaut hydraulique classique en quatre types :

- LE PRE-RESSAUT avec $1.7 < F_1 < 2.5$ (figure 1.2, b) : La surface de projection est constituée d'une série de petits rouleaux de $F_1 = 1.7$; ces rouleaux se condensent à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente.

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

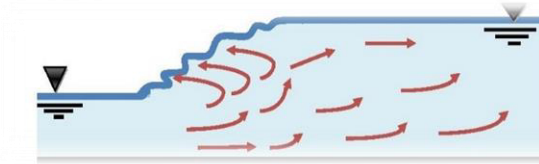


Figure 1.2.b : Le pré-ressaut

- LE RESSAUT DE TRANSITION avec $2,5 < F_1 < 4,5$ (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.

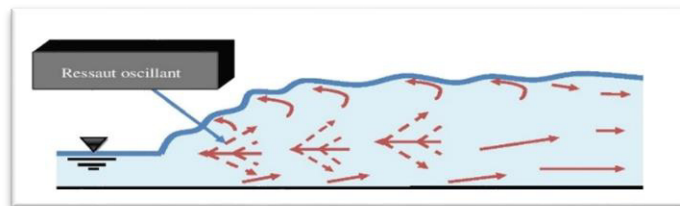
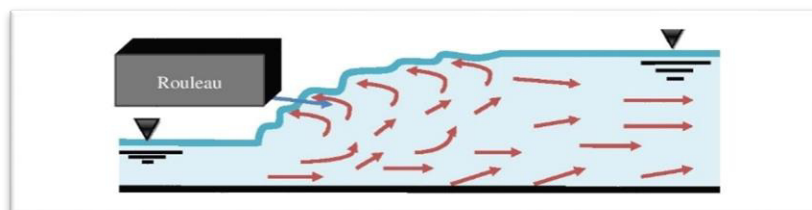


Figure 1.2.c : Le ressaut de transition

-LE RESSAUT STABLE obtenu pour la gamme $4,5 < F_1 < 9$ (figure 1.2.d) : C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans le bassin de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.



Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

Figure 1.2.d : Le ressaut stable.

- LE RESSAUT AGITE OU CLAPOTEUX obtenu pour $F_1 > 9$ (figure 1.e) : Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très élevée. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal.

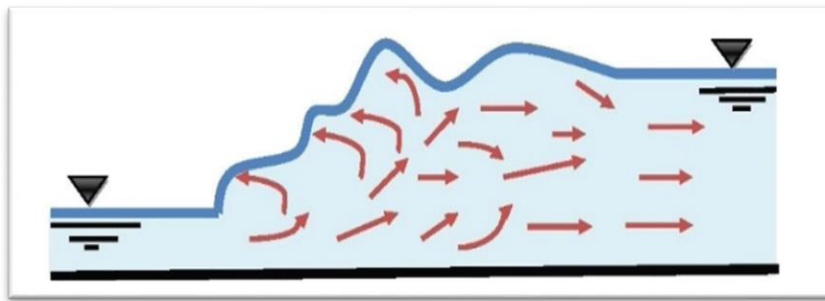


Figure 1.2.e : Le ressaut clapoteux

I.2.4 Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut

Nous ne pouvons pas appliquer la théorie de Bernoulli entre les sections 1 et 2 pour déterminer les profondeurs combinées de la projection, car le terme ΔH_{1-2} , qui représente la pression, est inconnu et ne s'applique pas au système commun. La théorie d'Euler peut être appliquée respectivement entre la section initiale et la section finale pour résoudre le problème (Figure .1.3)

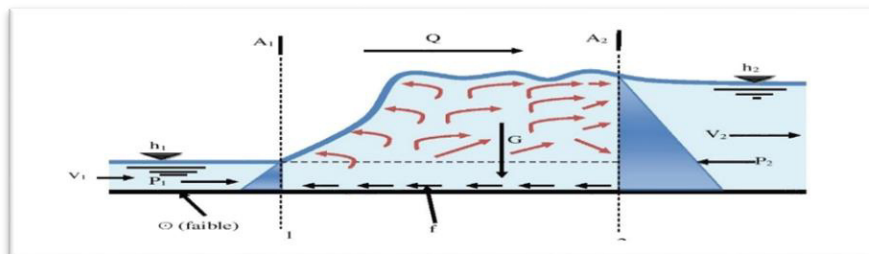


Figure 1.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut

Nous pouvons donc écrire l'équation de continuité :

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

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

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

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

Basé sur le résultat classique de Bélanger (1828) qui sera obtenu en appliquant la théorie d'Euler. L'auteur a appliqué cette théorie à la masse liquide présente entre les sections (A_1) et (A_2) et à l'hypothèse :

- Distribution des pressions dans les sections (A_1) et (A_2) hydrostatiques. Frottement sur les parois et le bas du canal le long de la distance entre (A_1) et (A_2), tout en négligeant la chute de pression due à la perturbation provoquée par le ressaut.
- Les différentes vitesses d'écoulement du liquide dans chacune des sections (A_1) et (A_2) sont parallèles à la vitesse moyenne V et sont considérées comme uniformes.
- La résistance à la zone est négligeable.

Donc Où :

$$((\beta_2 * \rho * Q * V_2) - (\beta_1 * \rho * Q * V_1)) = p_1 - p_2 - f + (G * \sin \theta) \quad (1.3)$$

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.

, appliquer la deuxième loi de Newton nous donne :

Chapitre I : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

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 :

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

ω : ($\rho * g$) désigne le poids spécifique du liquide

Le nombre de Froude F_1 , qui décrit la projection qui se chevauchent dans un canal rectangulaire, s'écrit comme suit :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{g * b^2} * \frac{1}{h_1^3} \quad (1.5)$$

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

$$Y = \frac{h_1}{h_2} = \frac{1}{2} [\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1] \quad (1.6)$$

Nous obtenons l'équation de Bélanger (1828), qui relie le rapport total des hauteurs projetées au nombre de Froude F_1 , en fait c'est une équation pour une ligne représentée par la figure (1.4).

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

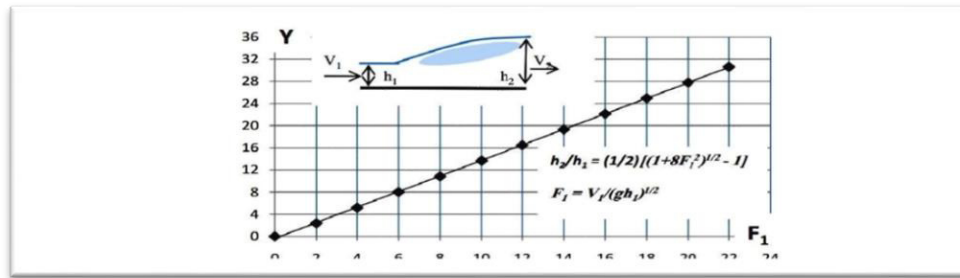


Figure 1.4 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger (1828)

Hager et Singer (1986), ont donné une relation plus simple que la relation (1.6), et applicable pour un nombre de Froude $F_1 > 3$.

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

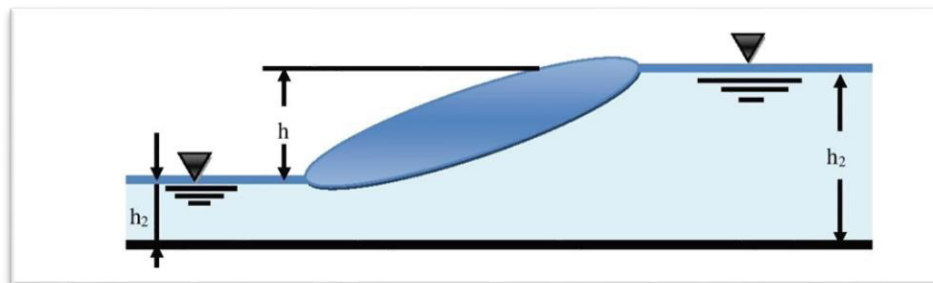
I.2.5 Caractéristiques géométriques du ressaut

En étudiant certaines des caractéristiques de la géométrie de projection ci-dessus, il est devenu très difficile de déterminer la hauteur de h et les longueurs de L_r et L_j , les auteurs ont utilisé des méthodes expérimentales pour évaluer ces quantités.

I.2.5.1 Hauteurs du ressaut

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

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



Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

Figure 1.5 : Hauteur du ressaut

I.2.5.2 Longueur du rouleau

En 1990 Hager et al (1990) définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisant ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé. La figure 1.6 montre ces deux types de ressaut et les longueurs L_r qui leur correspondent.

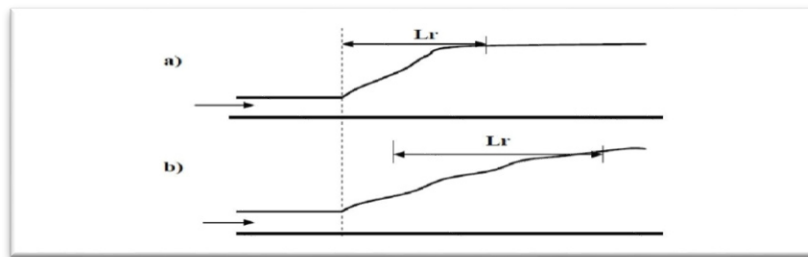


Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique : a) Rouleau développé, b) Rouleau non développé

Le rouleau non développé a une longueur plus courte que le rouleau amélioré et la surface de l'estuaire apparaît comme des vagues. Au fond de la masse liquide en mouvement, on distingue ce qu'on appelle la zone du rouleau de séparation qui forme un tourbillon inférieur. Puisque cette région existe, le plan entrant dans la section initiale de la projection est dévié vers la surface libre.

Le tambour développé a une surface relativement lisse et est semi-stable. Le plan entrant dans la section initiale de la projection se fixe à une certaine distance au fond du canal, puis diverge, orienté vers le bas. Les tests effectués par Hager et al. (1990) montre que pour un saut conventionnel, le rapport $\lambda_r = \frac{L_r}{h_1}$ dépend du nombre de Froude F_1 et du rapport d'aspect

$w = \frac{h_1}{b}$. Les auteurs suggèrent les relations suivantes :

$$\lambda_r = -12 + 160 \operatorname{Tgh} (F_1 / 20) \text{ Pour } W = \left(\frac{h_1}{b_1} \right) < 0.1 \quad (1.9)$$

$$\lambda_r = -12 + 100 \operatorname{Tgh} (F_1 / 12,5) \text{ pour } 0,1 < w < 0,7 \quad (1.10)$$

«Tgh» désigne l'ombre hyperbolique.

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

Les auteurs notent que dans le cas de $F_1 < 8$, les relations (1.9) et (1.10) peuvent être remplacées par une ligne de pente 8, pour l'équation :

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

I.2.5.3 Longueur du ressaut

Le recul se produit toujours pendant la transition d'un système prolifique à un système fluvial. La longueur L_j est la propriété de projection la plus difficile, mais on estime que cela n'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 :

$$\frac{L_j}{h_1} = 220 * Tgh \left[\frac{(F_1 - 1)}{22} \right] \quad (1.12)$$

Selon Hager et Carlier et d'autres. (1990), la différence de longueur relative $\frac{L_j}{h_2}$ Le nombre Froude F_1 montre que ce dernier rapport prend une valeur moyenne de 6 pour une plage pratique de $4 < F_1 < 12$.

$$\frac{L_j}{h_2} = 6 \quad (1.13)$$

Il existe également d'autres formats suggérés pour un canal sectionnel rectangulaire, selon Carrier (1980) :

- . Formule de Smetana (1933)

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

$$L_j = 6(h_2 - h_1) \quad (1.14)$$

Pour un nombre de Froude au-delà de $F_1 = 3$ selon Singer et Hager (1985), on peut également appliquer la formule empirique suivante.

$$\frac{L_j}{h_2} = \frac{35 * \sqrt{F_1}}{(8 + F_1)} \quad (1.15)$$

I.2.5.4 Rendement du ressaut

La (figure 1.7) montre la ligne de charge totale le long du L_j le long de laquelle le ressaut classique s'étire.

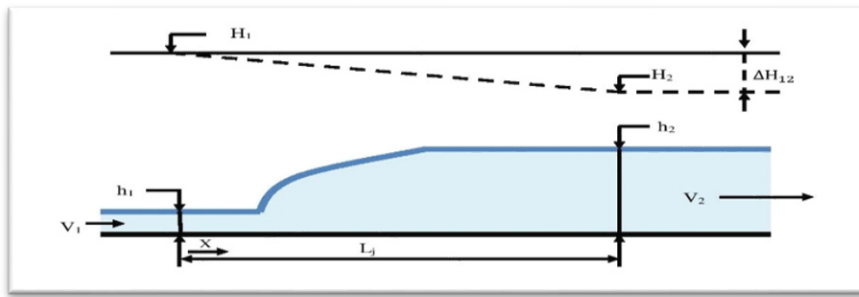


Figure 1.7 : Ligne de charge totale le long du ressaut classique.

La projection conduit à une grande dissipation de l'énergie mécanique. En appliquant la théorie de Bernoulli (1738), la perte d'énergie peut être déterminée, $\Delta E_{1-2} = \Delta H_{1-2}$ résultant du saut, en supposant que $Z_1 = Z_2$ (le canal horizontal), on obtient :

$$\Delta E_{12} = \Delta H_{12} = \left(\alpha_1 * \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \right) - \left(\alpha_2 * \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \right) \quad (1.16)$$

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

$$H_1 = \left(\alpha_1 * \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \right) \quad (1.17)$$

Et la charge totale dans la section aval est :

$$H_2 = \left(\alpha_2 * \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \right) \quad (1.18)$$

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

V_1 et V_2 représentent les vitesses moyennes correspondant aux sections amont et aval de la projection et le facteur de correction cinétique α autorisé également avec l'unité.

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

Où : $A_1 = b * h_1$; $A_2 = b * h_2$

Selon la relation (1.19) dans (1.16), nous obtenons tous les calculs terminés, l'expression classique de l'hypotension due au saut dans un canal rectangulaire avec une pente faible ou nulle.

$$\Delta H_{12} = (h_1 + h_2) + \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) * \frac{q^2}{2g} \quad (1.20)$$

Où : $q = \frac{Q}{b}$

Le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'expression de la quantité de mouvement définie par la relation (1.4).

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

En remplaçant la relation (1.20) dans (1.19) on obtient :

$$\Delta H_{1-2} = \frac{(h_2 - h_1)^3}{(4h_2 * h_1)} \quad (1.22)$$

Selon la relation (1.21), on peut calculer la chute de pression due au saut classique et ne dépend que des hauteurs combinées. La force de dissipation par projection est η :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = \frac{(H_1 - H_2)}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (1.23)$$

Le rapport $\frac{H_2}{H_1}$ est appelé efficacité du ressaut. Donc pour déterminer les charges totales dans les sections amont et aval on utilise les relations (1.17) et (1.18) et en tenant compte de la relation (1.5) du nombre de Froude on obtiendra :

$$H_1 = b_l * \left[1 + \frac{F_1^2}{2} \right] \quad (1.24)$$

$$H_2 = b_l * \left[Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right] \quad (1.25)$$

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

Où $8Y$ est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par la relation (1.6) de Bélanger (1828). En remplaçant (1.22) et (1.23) dans l'expression du rendement du ressaut (1.22) on obtiendra :

$$\eta = 1 - \left[\frac{\left[Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right]}{\left[1 + \frac{F_1^2}{2} \right]} \right] \quad (1.26)$$

Hager et Sinniger (1986) ont proposé une expression approchée qui nous permet de calculer simplement le rendement du ressaut est cela pour un nombre de Froude $F_1 > 2$.

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2 \quad (1.27)$$

Les relations (1.27) et (1.28) sont représentées graphiquement sur un système des coordonnées cartésiennes, illustrés par la figure (1.8).

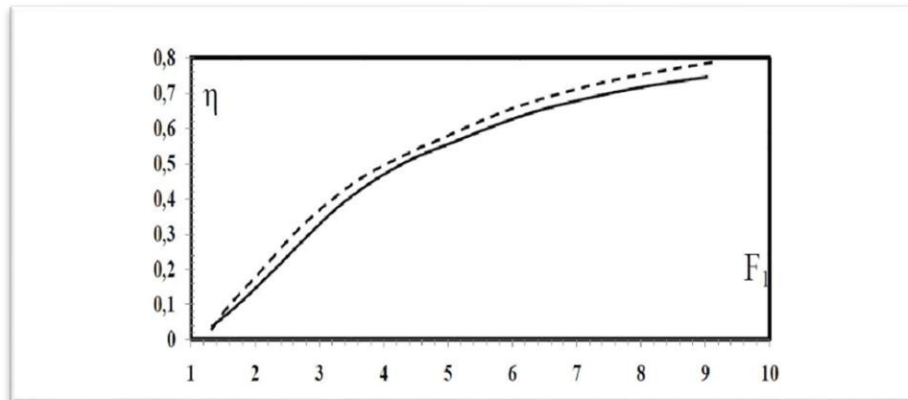


Figure 1.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 Courbe tracée selon la relation (1.25), courbe tracée Selon la relation (1.26)

D'après l'analyse de la courbe $\eta = f(F_1)$ nous constatons que le rendement η du ressaut classique est supérieur à 50 % pour une valeur de nombre de Froude $F_1 \geq 5.1$ et que les rendements calculés par l'application de la relation (1.26) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.25) d'autre part ; l'écart maximum observé peut atteindre les 2 %.

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

I.2.6 Ressaut hydraulique forcé par seuil dans un canal rectangulaire

I.2.6.1 Approche de Rand

En 1957, Rand a proposé d'établir une certaine classification pour le bassin avec seuil continu à son extrémité. Il était le premier qui a classifié le ressaut forcé par seuil en 10 cas typiques, se rapportant aux effets de la hauteur du seuil et de sa position, le ressaut classique servant du cas de référence. Ces cas peuvent être groupés en trois classes se distinguant par la position du seuil par rapport au pied du ressaut (figure 1.9) :

1. Position minimale en amont L_s, min .
2. Position intermédiaire L_s .
3. Position maximale L_s, max .

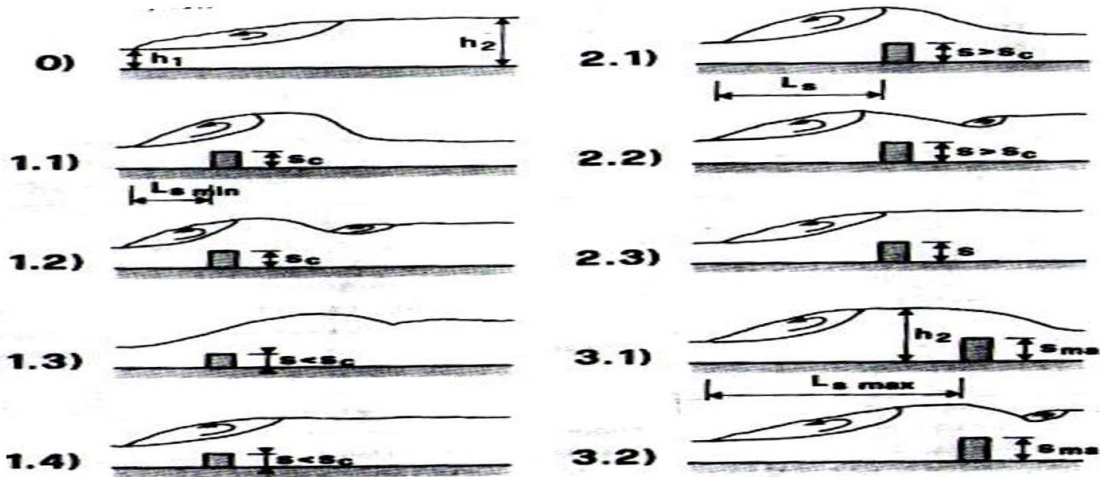


Figure 1.9 : Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes selon Rand (1957): 0) Ressaut classique avec hauteurs conjuguées h_1 et h_2 ; 1) class 1, longueur L_s, min ; 2) class 2, longueur intermédiaire L_s ; 3) class 3, longueur L_s, max ; s :

Afin de décrire tous les cas, Rand (1957) a défini un facteur de position :

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

$$K = \frac{\left(\frac{Ls}{h_1}\right)_{min} - \left(\frac{Ls}{h_1}\right)_{min}}{\left(\frac{Ls}{h_1}\right)_{mx} - \left(\frac{Ls}{h_1}\right)_{min}} \quad (1.27)$$

Variante entre $K = 0$ pour le ressaut dans la position minimale et $K = 1$ pour la position maximale. Rand (1957) ainsi a établi des diagrammes exprimant le rapport des hauteurs conjuguées YF en fonction de F_1 pour différentes hauteurs relatives du seuil $S = \frac{s}{h_1}$ et ceci pour 5 valeurs de K . il a démontré que la diminution des hauteurs conjuguées est d'autant plus importante que S est élevé et que l'effet du seuil tend à disparaître lorsque F_1 augmente, ce qui pourrait signifier que pour F_1 très grand, le seuil est inutile ! La hauteur du seuil nécessaire à la formation d'un ressaut peut être tirée de ces diagrammes.

Rand (1957) a proposé pour la première fois une classification des divers cas possibles du ressaut forcé par seuil et des diagrammes permettant le dimensionnement des bassins.

Rand a repris ces projets en 1965 et les a présentés sous une autre forme. La fixation expérimentale utilisée ensuite est un canal de valve plat : h_1 est donc recommandé dans ce cas. Un graphique de la valeur de F_1 est tracé en $YF = \frac{h_2}{h_1}$ en fonction de $S = \frac{s}{h_1}$ de différentes valeurs de K , un arrangement plus pratique pour son utilisation dans les dimensions (figure 1.10), mais avec l'inconvénient qu'il est nécessaire de tracer un diagramme pour chaque nombre de Froude.

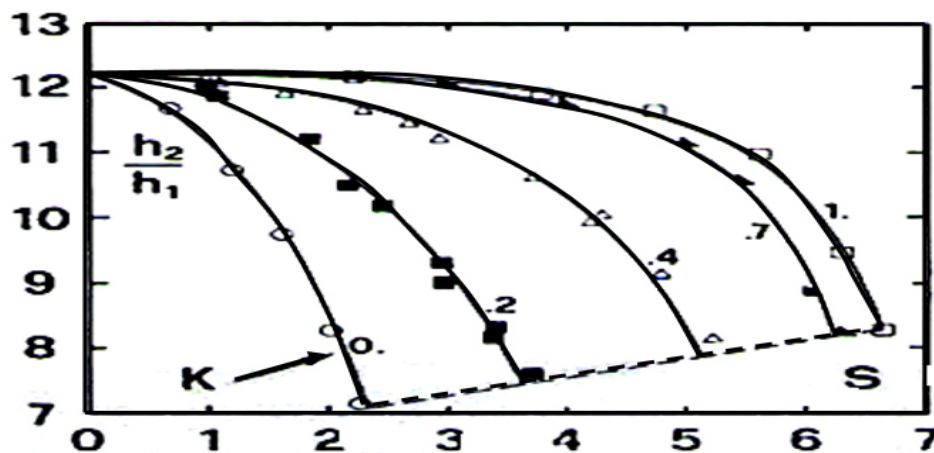


Figure 1.10 : Hauteurs conjuguées $\frac{h_2}{h_1} = f(S, K)$ pour $F_1 = 9$. Valeurs et courbes expérimentales : (----) limite d'influence de l'aval sur l'amont.

I.2.6.2 8Approche de Bretz

En 1988, le scientifique Bretz a mené une étude expérimentale de l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique. Les résultats ont été confirmés par Hager, Bretz (1988), Hager, Siniger (1989), Hager et Li (1991).

Une description et une classification détaillées des différents types de ressauts forcés par débit seuil sont présentées (figure 1.11).

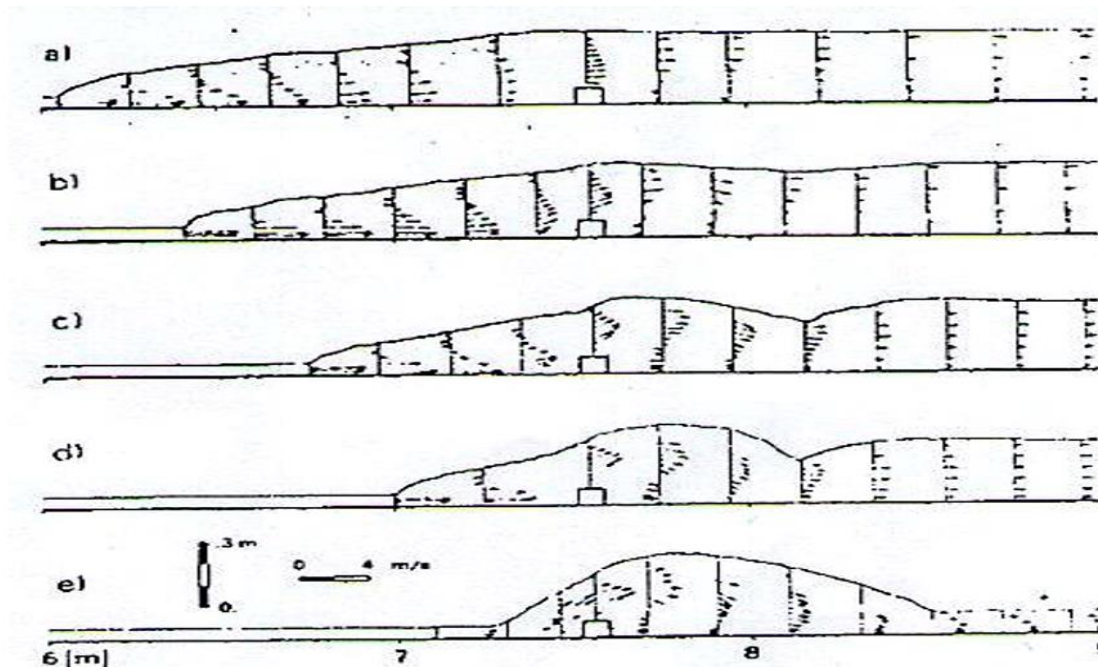


Figure 1.11 : Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $F_1 = 5,23$ et $S = 1,42$. a) Ressaut type A ; b) Ressaut type B ; c) Ressaut type B min ; d) Ressaut type C et e) onde. (Bretz, 1987).

Trois types de ressauts forcés sont classés par seuil et analysés en quatre sections longitudinales. Trois paramètres sont étudiés, d'abord indépendamment les uns des autres. Puis dans la formule : Froude nombre F_1 , le niveau aval h_2 est la hauteur relative S du seuil. Une attention particulière est portée aux élévations compactes qui caractérisent le ressaut forcé en fonction des seuils et des caractéristiques de surface.

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

➤ Procédure expérimentale

Afin d'augmenter le nombre de Froude F_1 et pour nous de contrôler simultanément la hauteur de l'eau à la source, une vanne plate est installée dans la partie horizontale du canal. La procédure de test est la même que pour le saut traditionnel. Les quantités suivantes sont observées : la charge amont de la vanne H_0 , la hauteur de l'eau en dessous de la piste -2, la position du pied de projection x_0 et la position du rouleau inférieur x_{rf} . Les tests sont répétés pour les parents plus âgés du seuil $S = 1, 2, 3$ et 4 mm, dont l'emplacement a été déterminé. Le pied tombant est positionné le plus près possible de la valve pour éviter l'effet de frottement sur cette marge d'écoulement.

Le flux commence à effectuer un ressaut forcé (type A, B ou B min). Donc 45 tests ont été testés pour chaque type de ressaut.

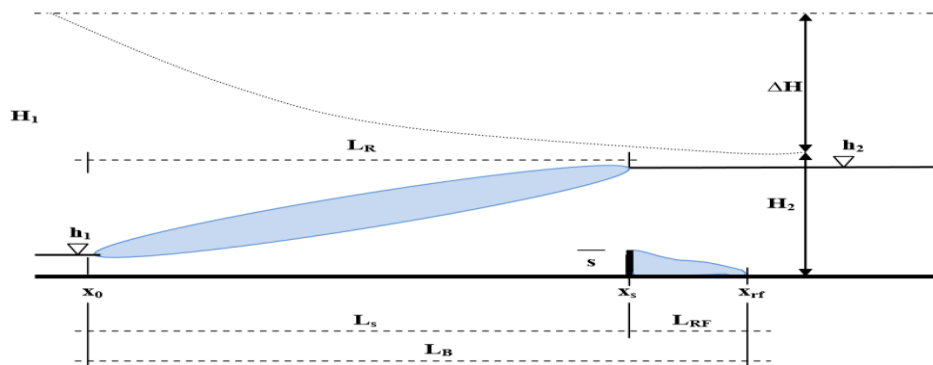


Figure 1.12 : ressaut forcé par seuil selon Bretz (1965) : définition des termes. H_1 Charge amont, H_2 charge aval, ΔH perte de charge, h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x_0 position du pied du ressaut, x_s position du

➤ Hauteurs conjuguées du ressaut

Par rapport à la figure (1.13), le type A montré que plus la hauteur relative S d'un seuil est élevée, plus la courbe opposée s'éloigne de la courbe $S = 0$ correspondant au saut classique (sans seuil). Pour différentes hauteurs relatives S , les courbes sont arrondies à l'aide de l'équation suivante :

$$YA = 1,307F_1 - (0,4S^{0,85} + 0,142) \quad (1.28)$$

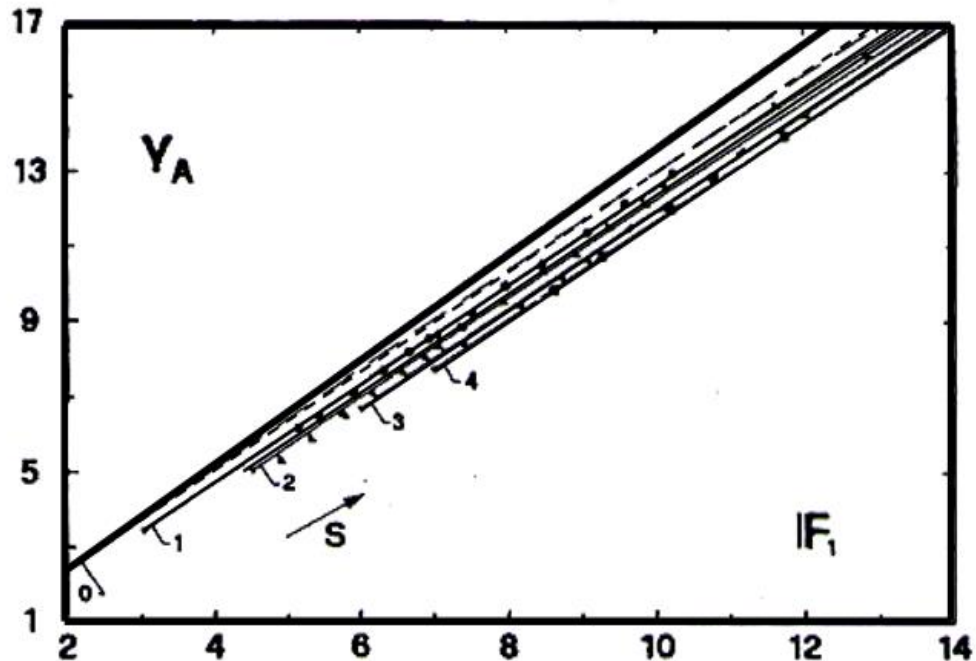


Figure 1.13 : Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_A = f(F_1, S)$ avec $0,5 \leq S \leq 6$. $S = s/h_1$, courbe selon l'équation de Bélanger. Courbe du ressaut classique selon l'équation (1.13), $\alpha = 0,4$; et $\beta = 0.6$

➤ **Longueur relative du bassin**

La longueur relative du bassin $\lambda_B = \frac{LB}{h_1}$ et la position relative du seuil $\lambda_S = \frac{LS}{h_1}$, en fonction du nombre de Froude F_1 , sont représentées dans les figures (1.14) .

Pour les trois types du ressaut forcé, λ_S croit quasi linéairement avec F_1 , la pente de la courbe étant plus forte pour le type A et la moindre pour le type B_{min} . Quant à λ_B , les courbes présentent une pente plus forte que celle pour λ_S .

Les courbes pour les divers types du ressaut forcé sont situées au-dessous de celles du ressaut classique. Ce fait indique la réduction nette de la longueur du ressaut forcé par rapport au ressaut classique. Pour les trois types du ressaut forcé, les courbes sont données par les équations suivantes, avec le domaine de validité $5 \leq F_1 \leq 13$: Ressaut forcé de A

$$\lambda S = 6,27F_1 - 5,75 \quad (1.29)$$

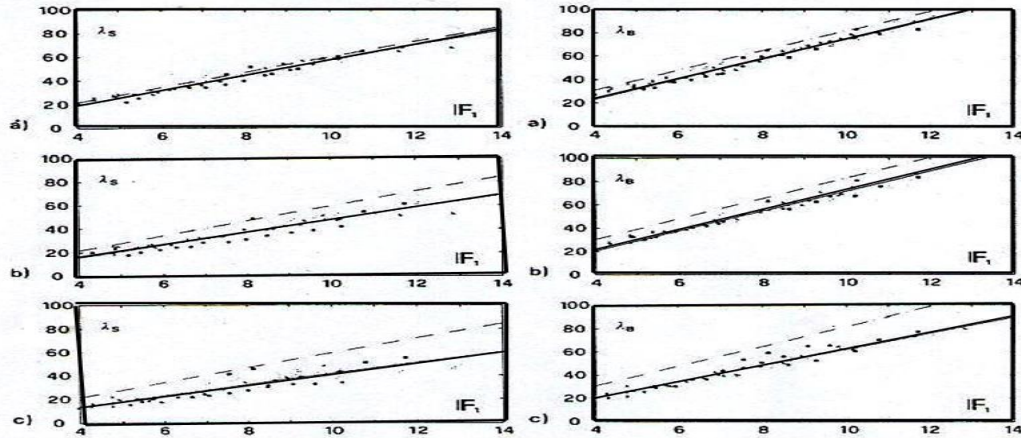


Figure 1.14 : Longueur relative $\lambda S = f(F_1)$ pour le ressaut forcé : a) type A,

I.3 Ressaut hydraulique en canal trapézoïdal

I.3.1 Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

Le ressaut hydraulique est un dissipateur d'énergie, couramment utilisé dans les étangs. Les coupes transversales de ces bassins prennent souvent la forme d'un rectangle, tandis que le canal trapézoïdal est en fait un cas particulièrement intéressant.

I.3.2 Rapport des hauteurs conjuguées

La quantité de mouvement appliquée aux sections initiale et finale de la projection se produit dans un canal horizontal à partir de la section trapézoïdale, qui :

$$A_1 = h_1 * (b + m * h_1) ; \quad A_2 = h_2 * (b + m * h_2)$$

Les centres de gravité des sections initiales et finales sont :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6} * \left(\frac{3b + mh_1}{A_1} \right) ; \quad \bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6} * \left(\frac{3b + mh_2}{A_2} \right)$$

Les forces de pressions des sections initiales et finales sont :

$$P_1 = \bar{\omega} * \bar{h}_1 * A_1 ; \quad P_2 = \bar{\omega} * \bar{h}_2 * A_2$$

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

$$\frac{b \cdot h_1^2}{2} + \frac{m \cdot h_1^2}{3} + \frac{Q^2}{g \cdot A_1} = \frac{b \cdot h_2^2}{2} + \frac{m \cdot h_2^2}{3} + \frac{Q^2}{g \cdot A_2} \quad (1.30)$$

Pour Froude F_1 , qui décrit le flux dans la première section de la projection, il écrit :

$$F_1^2 = \frac{Q^2 \cdot (b \cdot 2m h_1)}{g \cdot (b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2)^3} \quad (1.31)$$

En introduisant le paramètre Y , définissant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, l'équation devient :

$$F_1^2 \cdot \left[1 - \frac{(1+M)}{Y \cdot (1+M \cdot Y)} \right] = \frac{(1+2M)}{2 \cdot (1+M)^2} \cdot \left[Y^2 \cdot \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (1.32)$$

Où cela représente : $Y = \frac{h_2}{h_1}$ et $M = \frac{m \cdot h_1}{b}$

L'équation (2.4) a cinq variables est réduite à trois variables (F_1^2 , M , Y).

Les éléments connus sont Q , h_1 , b et m qui forment :

$$F_1^2 = \frac{Q^2 \cdot (b \cdot 2m h_1)}{g \cdot (b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2)^3} \quad \text{et} \quad M = \frac{m \cdot h_1}{b}$$

L'élément inconnu est $h_2 = ?$

Connaissant F_1^2 et M on peut tirer à partir du graphique, le rapport

$$Y = \frac{h_2}{h_1} \leftrightarrow h_2 = Y \cdot h_1$$

I.3.2.1 Cas particulier du canal rectangulaire

Pour obtenir la fonction Y (F_1) du saut hydraulique dans un canal rectangulaire, il suffit d'annuler l'équation (2.4) m et M ($m = 0$ et $M = 0$). L'équation (3.4) devient.

$$F_1^2 \cdot \left[1 - \frac{1}{Y} \right] = \left[\frac{Y^2 - 1}{2} \right] = \frac{Y^2}{2} - 1$$

Ou encore :

$$F_1^2 = \frac{Y \cdot (Y + 1)}{2} \quad (1.33)$$

$$\text{Et } F_1^2 \text{ devient : } F_1^2 = \frac{b \cdot Q^2}{g \cdot (b \cdot h_1)^3}$$

Éléments connus : Q , b , h_1 donnent F_1 . Éléments inconnus : $h_2 = ?$ L'équation (1.33) conduit à la relation :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + F_1^2} - 1 \right] \text{ C'est l'équation de Bélanger (1828), cette équation traduit}$$

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

Un ressaut classique sans obstacle en aval. Elle a été reprise par Hager (1988) :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} * F_1^{-\frac{1}{2}}; \text{ valable pour } F_1 > 3.$$

Hager à vérifier expérimentalement que pour des ressauts où $F_1 > 3$; $\sqrt{1 + 8F_1^2} \approx \sqrt{8F_1^2}$
d'où la Relation :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} * F_1^{-\frac{1}{2}} \tag{1.34}$$

I.3.2.2 Cas particulier du canal triangulaire

En remplaçant dans l'équation (2.4) : $b = 0$ et $\frac{1}{M} = 0$ ($M \rightarrow \infty$), donne :

$$F^2 = \frac{2Y^2 * (Y^2 + Y + 1)}{3 * (Y + 1)} \tag{1.35}$$

Hager (1988) a donné une forme approchée à cette équation :

$$Y = \left(\frac{3 * F_1^2}{2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{1.36}$$

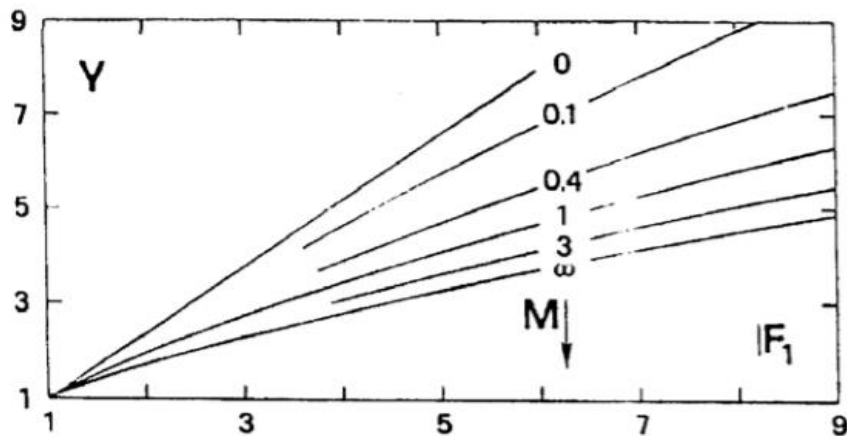


Figure 1.15 : Variation du nombre de Froude F_1 , en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M .

$0 < M < \infty$: profils trapézoïdaux.

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

$M=0$: profil rectangulaire.

$M \rightarrow \infty$: profil triangulaire.

La figure correspondante (1.15) montre que la valeur la plus faible du rapport combiné Y de la hauteur de projection dans le cas du triple profil est obtenue, avec la même valeur pour le nombre de Froude du flux incident.

1.3.3 Longueurs caractéristiques du ressaut

La longueur du ressaut L_j n'a pu être quantifiée que par voie expérimentale et sa définition varie d'un auteur à un autre. En effet, on estime que la longueur L_j doit être mesurée dans la section à l'aval du ressaut.

La longueur du ressaut hydraulique en canaux trapézoïdaux mesurée le long de l'axe du canal est trouvée moins détachée que celle en canal rectangulaire. Posey et Hsing (1938) ont exprimé la longueur relative $\lambda_j = \frac{L_j}{h_2}$ par la relation :

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_2} = 5 * \left[1 + 4 * \left(\frac{B_2 + B_1}{B_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (1.37)$$

Où : $B = b + 2mh$ avec W : largeur de la surface d'eau.

L'erreur sur λ_j est estimée par : $\lambda_j = \lambda_j \pm 5$.

Une autre formule de la longueur du ressaut a été analysée par Silvester (1964), Wanoschek et Hager (1989) c'est la relation (1.30) .

$$\frac{L_j}{(h_2 - h_1)} = 7,1 * (1 + 10M)$$

Otsu (1976) a corrélié la longueur du ressaut, comme :

$$\text{Log}_{10} \left(\frac{L_j}{\Delta H} \right) = 1.71\varepsilon + 0.315m + 1.58 \quad (1.38)$$

Où : $\varepsilon = \frac{\Delta H}{H\varepsilon}$;

ΔH : la perte d'énergie du ressaut ; $\Delta\varepsilon$: la charge totale d'eau.

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

D'après Hager et Wanoschek (1989), La particularité du ressaut en canal trapézoïdal est l'apparition d'un rouleau du fond pour des nombres de Froude $F_1 > 4$. Les dimensions de ce type de rouleau pourront être données par les grandeurs suivantes :

. L_u : distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau du fond.

. L_b : longueur du rouleau du fond.

. h_b : hauteur maximale du rouleau du fond (Figure 1.16)

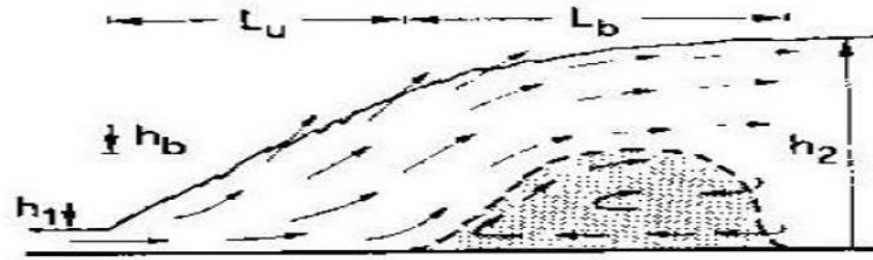


Figure 1.16 : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale

I.3.4 Rendement du ressaut hydraulique

Ressaut hydraulique représente la dissipation mécanique d'énergie qui rend cela possible La perte de charge ΔH du saut est par définition la différence entre les charges initiales et finales :

$$\Delta H = H_1 - H_2.$$

ΔH est la chute de pression relative par rapport à la charge initial H_1 , $\eta = \frac{\Delta H}{H_1}$

Où ; η : appelée par fois l'efficacité d'un ressaut hydraulique.

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2g \cdot A_1^2} \quad (1.39)$$

$$H_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2g \cdot A_2^2}$$

En tenant compte des relations donnant le rapport des hauteurs conjuguées.

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

$Y = \frac{h_2}{h_1}$ et $M = \frac{m \cdot h_1}{b}$ Nous compensons l'équation du nombre de Ford

$$F^2_1 = \frac{Q^2 \cdot (1+2M)}{g \cdot b^2 \cdot h_1^3 \cdot (1+M)^3}$$

On obtiendra :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2 \cdot (1+M)^3}{2Y^2 \cdot (1+2M) \cdot (1+YM)^2}}{1 + \frac{F_1^2 \cdot (1+M)}{2(1+2M)}} ; 0 < \eta < 1 \quad (1.40)$$

I.3.4.1 Cas particulier du canal rectangulaire

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

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (1.41)$$

Siniger (1985) a proposé une bonne approximation de cette équation :

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2 ; F > 2.5 \quad (1.42)$$

I.3.4.2 Cas du canal triangulaire

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

Relative sera :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}} \quad (1.43)$$

Si $F_1 > 3$, Hager et Sinniger (1985) ont suggéré la relation approximative suivante :

$$\eta = \left[\left(1 - \frac{12}{F_1^4} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \quad (1.44)$$

La représentation graphique (figure 1.17) de la relation générale (1.40), montre que pour même nombre de Froude F_1 , le rendement du ressaut triangulaire est plus élevé que celui du

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

rectangulaire ou du trapézoïdale. Comparé au rendement du ressaut rectangulaire, le rendement du ressaut trapézoïdal est environ 10 % plus important

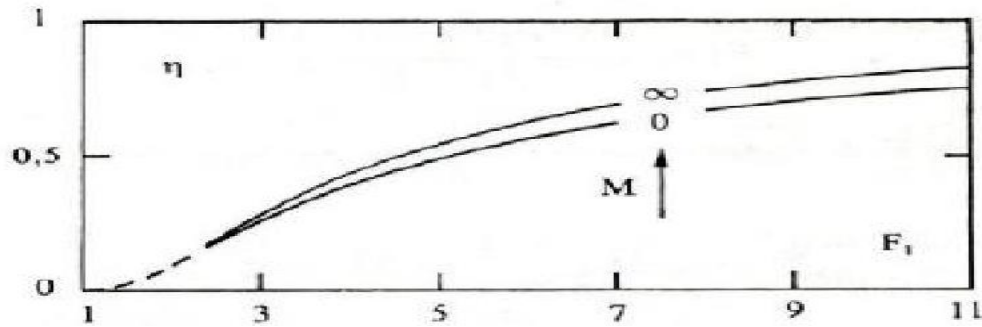


Figure 1.17: Représentation graphique de la relation (1.40) du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . $M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire.

I.4 Ressaut hydraulique dans les canaux composés (Approche de Khattaoui et Achour 2012)

I.4.1 La géométrie du canal

La forme dimensionnelle du canal combiné est indiquée (figure 1.18).

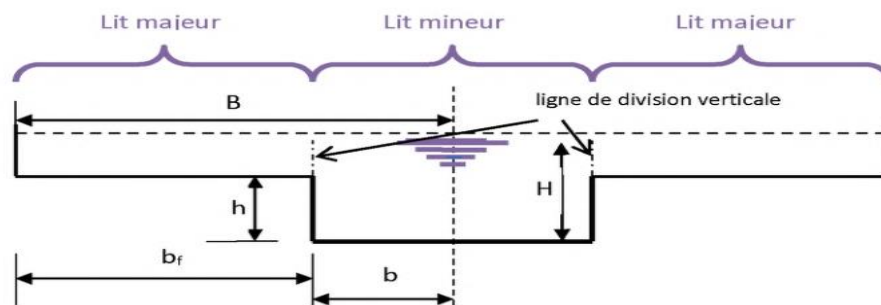


Figure 1.18 Définition des paramètres géométriques d'un canal de section rectangulaire composée.

Tel que :

b : Largeur du lit mineur divisé par 2

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

b_f : Largeur du lit majeur

B : Largeur du lit majeur divisé par 2

H : la charge d'eau sur le lit mineur en cas de plaine inondable.

h : hauteur de plein bord du lit mineur

Pour le cas d'un canal de section trapézoïdale composée, (Figure 1.19)

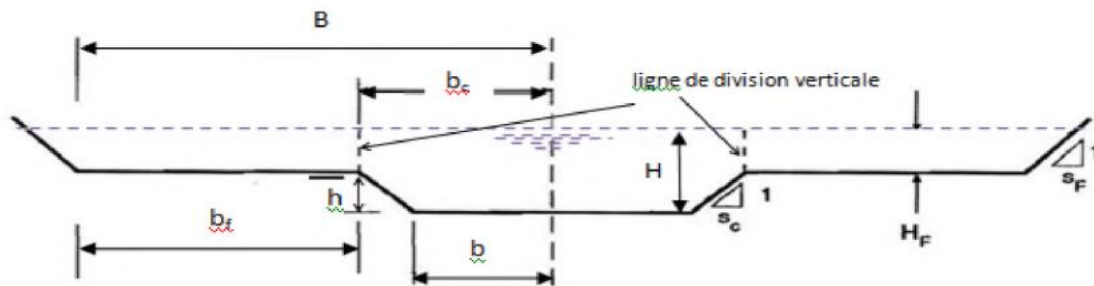


Figure 1.19 : Définition des paramètres géométriques d'un canal de section trapézoïdale composée.

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, il faut juste étudier un seul côté parce que les résultats de l'autre côté sont les mêmes.

I.4.2 L'avantage des canaux de type composé

On peut remarquer quelques avantages de ce type de canaux :

. L'utilisation la plus générale des plaines inondables (le lit majeur) est pour l'agriculture.

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

- . Augmentation de la capacité pour absorber le débit de crues, résultant de l'écoulement sur les talus ou lits majeurs
- . Facilité de maintenance presque toujours, c'est lorsque l'écoulement dans le canal principal.
- . Avantage de 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.

I.4.3 Caractéristique des écoulements en lit composé

Les écoulements en lit composé se caractérisent par une forte réaction, d'une part, l'écoulement rapide et profond de petit lit, et d'autre part, l'écoulement relativement lent du lit principal. Cela conduit à un transfert de Momentum entre les deux familles, et ce bien est lié à la formation de structures turbulentes à l'interface qui les sépare. Après avoir dissipé une partie de l'énergie d'écoulement, cette réaction ajuste la capacité d'écoulement des deux lits et la capacité de Proust (2005).

La complexité des processus physiques impliqués dans le fait que l'interaction turbulente entre la famille dépend de la structure du complexe et est renforcée

Paramètres hydrauliques (débit total, hauteur relative du débit - c'est-à-dire le rapport entre la hauteur de l'eau du lit principal et celle du lit secondaire) Proust, (2005).

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

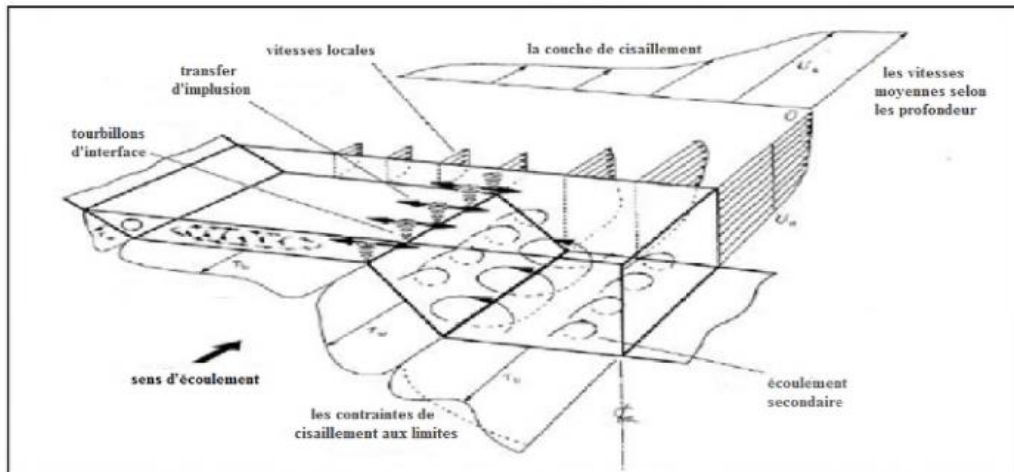


Figure 1.20: Structure tridimensionnelle de l'écoulement en lit composé droit, d'après Shiono et Knight (1991).

I.4.4 Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé

Grâce à cette étude, nous avons constaté que nous pouvons obtenir de très bons résultats lors de l'utilisation d'un lit composite pour la dissipation de puissance due au phénomène de saut hydraulique.

D'après les travaux de Khattaoui et Achur (2012) sur le saut hydraulique du bateau, nous verrons comment se développe ce phénomène.

I.4.4.1 Rapport des hauteurs conjuguées

La figure (1.21) montre les différentes hauteurs d'ingénierie et hydrauliques du saut hydraulique dans une couche composée droite.

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

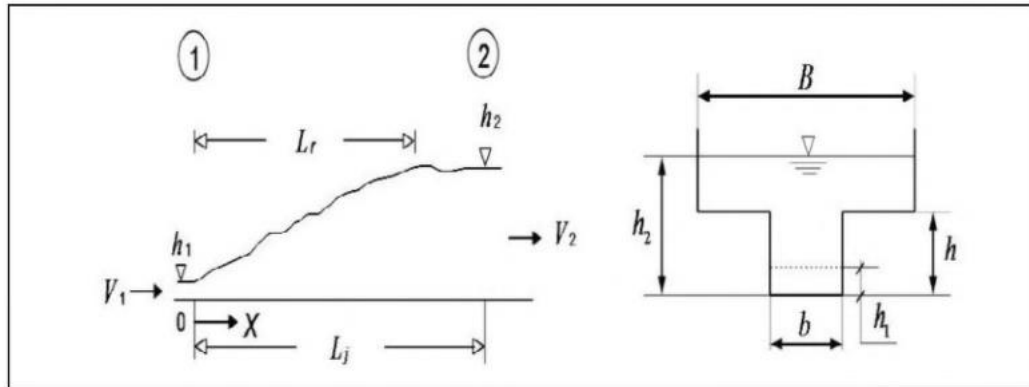


Figure 1.21: Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit.

La masse et l'élan sont transférés vers l'avant entre le lit secondaire et le lit principal (Bousmar et al. 2004).

La formule de la quantité de mouvement appliquée entre le pied et la fin de la projection, définie dans la figure 1, est écrite comme suit :

$$\rho * Q * (\beta_2 * V_2 - \beta_1 * V_1) = f_1 - f_2 \quad (1.45)$$

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 hydrostatiques 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

Tiré de l'article d'Achour (2000), en mesurant la relation de Borda Carnot et en regardant la forme de la relation (1.45), il semble acceptable d'ajouter une force de résistance qui a une projection le long de l'axe. Le flux horizontal sera le suivant :

$$f_x = -k * \bar{\omega} * (h_2 - h)^x * h_1^y * (B - b)^z \quad (1.46)$$

h_1 et h_2 : Charges d'eau au pied et à la fin du ressaut. h : Hauteur de plein bord du lit mineur.

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

$\bar{\omega}$: 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 :

$$\rho * Q^2 * \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = (f_1 - f_2) + f_x \quad (1.47)$$

Nous analysons l'équation de la fonction $f_x = \left(\frac{1}{2} \right) \bar{\omega} (h_2 - h) * h_1 (B - b)$: Supposons que la distribution uniforme des vitesses dans les sections transversales correspondant au pied et à la fin signifie le saut que $\beta_1 = \beta_2 = 1$. Les sections A_1 et A_2 sont données. Respectivement par :

$A_1 = bh_1$ et $A_2 = B * (h_2 - h) + b * h$. Supposons également que la distribution de la pression hydrostatique se trouve dans les sections 1 et 2 de la projection, ce qui donne des expressions énergétiques :

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

On met $Q_1 = Q_2$

$$2F_1^2 * \left(\frac{\beta}{Y - \frac{1-\beta}{\tau}} - 1 \right) = \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} - \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta} - \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) - \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (1.48)$$

Où :

$$F_1 = \frac{Q}{\sqrt{g * (b * h_1)^2}} \quad (1.49)$$

$\tau = \frac{h_1}{h}$ Et : Rapport de hauteurs, $\beta = \frac{b}{B}$: Rapport de l'élargissement.

En négligeant la force de la résistance f_x , l'équation résultante est :

$$2F_1^2 * \left(\frac{\beta}{Y - \left(\frac{1-\beta}{\tau} \right)} - 1 \right) = \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} - \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta} \quad (1.50)$$

Les relations (1.47) et (1.48) sont des équations fonctionnelles de forme $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

Notons que les équations (1.48) et (1.50) peuvent s'écrire sous la forme $Y + aY^2 + bY + c =$

En faisant le changement de variable $Y = \left(\frac{x-a}{3}\right)$, 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 (1.22) illustre la variation de Y , calculé par l'équation (1.50) en fonction de F_1 . L'une des variables, β ou τ , est fixée, l'autre varie avec un pas de 0,2. Pour que le ressaut se produise effectivement dans le canal composé. Pour que le ressaut se produise effectivement dans le canal composé ($h_2 > h$), les valeurs de F_1 à considérer doivent être strictement supérieures à la valeur minimale

$$F_{1\min} = \left[\frac{1}{2\sqrt{2}}\right] * \sqrt{-1 + \left(\frac{2}{\tau} + 1\right)^2} \quad \text{correspondent à } h_2 = h_1$$

On s'aperçoit de ces figures, que pour un β et τ données, Y augmente continuellement avec l'accroissement de F_1 . L'augmentation du rapport Y en fonction de F_1 est plus rapide pour grandes valeurs de β et diminue avec l'augmentation de τ . Khattaoui et Achour (2012)

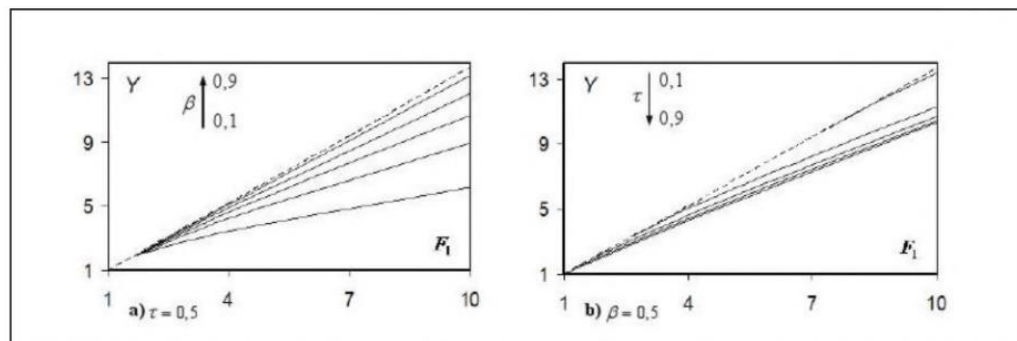


Figure 1.22 Variation de Y , calculé par (3.1), en fonction de F_1 , (---) : $\beta = 1$; Khattaoui et Achour (2012).

Sur la figure (1.23) nous avons représenté la variation de Y en fonction de F_1 pour ($\beta = \tau = 0,5$). On voit clairement que les Y calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont inférieures à celles calculées en l'a négligeant. La différence est plus claire au fur et

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente. La force f_x traduit les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

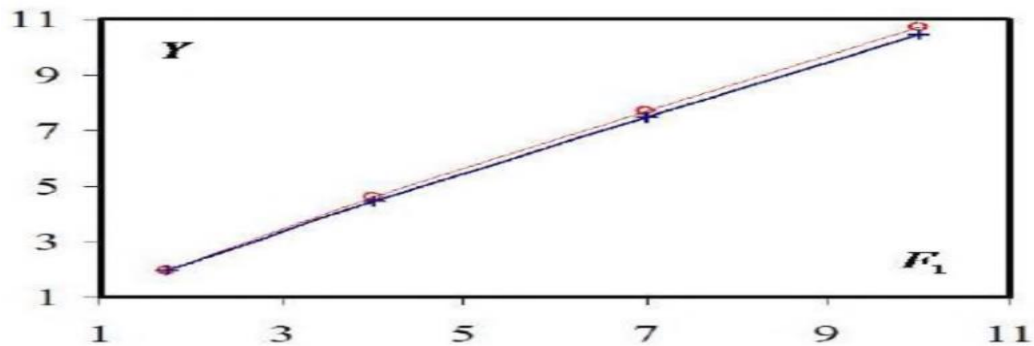


Figure 1.23 : Variation de Y en fonction de F_1 . (o) : équation (1.50), (+) : équation (1.48).

I.4.4.2 Rendement du ressaut

À partir d'une étude précédente et en examinant les mêmes hypothèses pour les valeurs d'élévation complexes, l'efficacité, $\varepsilon \eta = \frac{\Delta H}{H_1}$, peut être exprimée par :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{\left[2 * \left(\frac{Y}{\beta} - \frac{1}{(1+\beta)} \right) \right]^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (1.51)$$

L'équation (3.7) permet le calcul, d'une manière explicite, le rendement du ressaut se produisant en lit composé droit, connaissant F_1 , Y ainsi que β et τ . En considérant les valeurs de Y calculées avec la relation (1.50), nous avons représenté sur la figure (1.24) la variation de ε en fonction de F_1 . Pour un τ et un β fixés, il est clairement illustré sur la figure que le rendement ε d'un ressaut hydraulique dans un lit composé, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de F_1 .

Pour un τ connu, en fixant F_1 , ε diminue avec l'augmentation de β . Pour un β et un F_1 fixé, on peut aisément voir que le ε augmente avec l'accroissement de τ .

Chapitre : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS DEFERANTS CANAUX

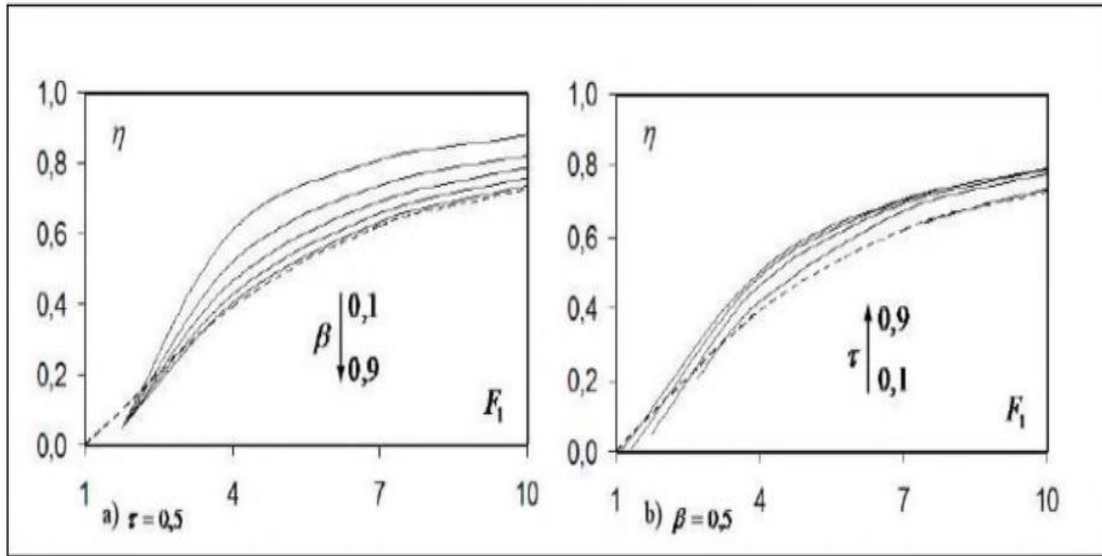


Figure 1.24 : Variation de ϵ en fonction de F_1 . (- - -) : $\beta = 1$. η est calculé par l'équation (3.4).

La figure (1.25) ; montre la variance de ϵ en fonction de F_1 de $\beta = \tau = 0,5$. Il est clair que ϵ calculé en tenant compte de la résistance ajoutée est supérieur à celui calculé en la négligeant.

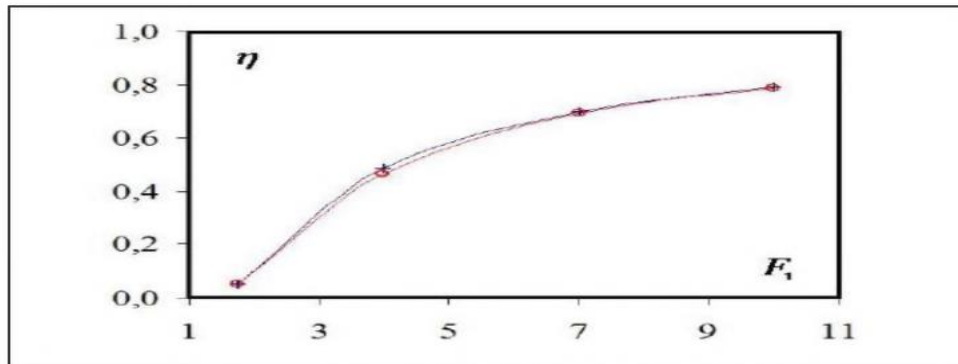


Figure 1.25 : Variation de ϵ en fonction de F_1 . (0) : équation (3.2), (+) : équation (3).

I.5 Conclusion

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les travaux les plus importants d'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire (ressaut hydraulique classique), et nous avons étudié diverses formes de ce ressaut, selon la classification de Bradley et Peterka (1957), qui sont basées sur un certain nombre de F_1 . À partir de cette étude, nous avons observé que le ressaut hydraulique était régi par l'équation de la quantité de mouvement, afin de déterminer la relation entre le rapport de hauteur composé et le nombre de Froude F_1 . Bélanger (1928) a fait le premier pas vers cet objectif et a déterminé cette relation, en appliquant la théorie d'Euler, le rapport Y_F des hauteurs combinées dépend du nombre de Froude F_1 et de la hauteur relative du seuil S .

Dans la deuxième partie de notre étude, nous avons étudié les principaux travaux réalisés dans le domaine du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal. La détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique a souvent été la cible principale de ses travaux : Bossi et Hsing (1938), Sylvester (1964) et Otsu (1976), et plus récemment les caractéristiques de Wanoschek et Hager (1989).

Dans cette dernière partie, nous avons mené notre étude, qui passe en revue, les principales caractéristiques du canal composé, ainsi que les travaux réalisés notamment par Khataoui et Achour (2012) dans le domaine du ressaut hydraulique dans ce type de canal. Afin de trouver l'influence de la forme composée sur la distribution des vitesses dans le ressaut, il est nécessaire de faire des mesures sur un modèle de laboratoire.

Chapitre II :

DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

Chapitre II

DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

II.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à la distribution des vitesses de ressaut hydraulique dans plusieurs types de canaux prismatiques. Dans le cas du canal rectangulaire, nous rechercherons la distribution de vitesse de ressaut forcé, les premières mesures préliminaires des vitesses dans un ressaut hydraulique ont été dirigées par Bakhmeteff et Marzky en 1936. En 1959 Ross et autres ont représenté le domaine de vitesse pour trois valeurs choisies de Froude 'F1'.

Pour le ressaut classique, nous nous intéresserons aussi aux travaux les œuvres de Schroder (1963), Rajaratnam et Subramania (1968-1970) sont les plus importantes aussi les travaux de Debabeche (2003), qui est consacré à l'étude empirique de la distribution des vitesses moyennes horizontales !!!! dans l'axe de symétrie dans un canal profilé en 'U'. Leurs études ont permis de trouver des relations fonctionnelles entre les propriétés de ressaut et les changements de vitesse. En ce qui concerne le ressaut forcé, les travaux de Bretz (1988) sont particulièrement liés au ressaut forcé de type A, suivi d'une étude comparative entre les différents types de ressaut forcé.

II.2 Ressaut hydraulique classique

En 1936, les premières mesures préliminaires de vitesse dans un ressaut hydraulique ont été dirigées par Bakhmeteff et Marzky. En 1959, Ross et d'autres ont représenté le champ de vitesse de trois valeurs sélectionnées plus tard dans F1, SCHRÖDER (1963), Rajaratnam et Subramania (1968, 1970) ont fourni une description complète de la forme de l'écoulement. L'analyse de l'évolution longitudinale et transversale de la vitesse axiale du ressaut hydraulique à $F_1 = 5.1$, montre que la distribution verticale près du fond est encore approximativement.

Uniforme. Par conséquent, il existe une région non turbulente de hauteur z_1 (figure 4.1). Au-dessus de la ligne pointillée, les formes de vitesse ressemblent à la fonction de Gauss. Soit z

Chapitre II : DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

La coordonnée verticale mesurée depuis le bas. Comme le montre la figure 2.1, z_1 représente l'épaisseur potentielle du cœur (zone de jet non turbulent), qui dépend principalement de h_1 . Selon (1963), les coordonnées verticales avec les dimensions peuvent être exprimées.

$$Z = 2 * \left(\frac{z - z_1}{h - h_1} \right) ; z_1 = h_1 * \left[\frac{h_2 - h}{h_2 - h_1} \right] \quad (2.1)$$

Donc $z_1 = z_1(h) = z_1[h(x)]$. Les valeurs extrêmes correspondent à :

$$z_1 = z_1(h = h_1) = h_1 \quad \text{et} \quad \text{à } z_1(h = h_2) = 0.$$

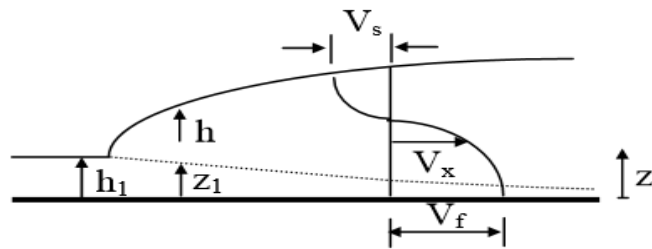


Figure 2.1 : Notation pour l'écoulement interne du ressaut hydraulique.

En fonction de ces indicateurs et des informations relatives aux vitesses de fond et de surface, le profil de vitesse global peut être déterminé dans le ressaut hydraulique.

Soit $\bar{V} = \frac{(V_x - V_s)}{(V_f - V_s)}$ 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.

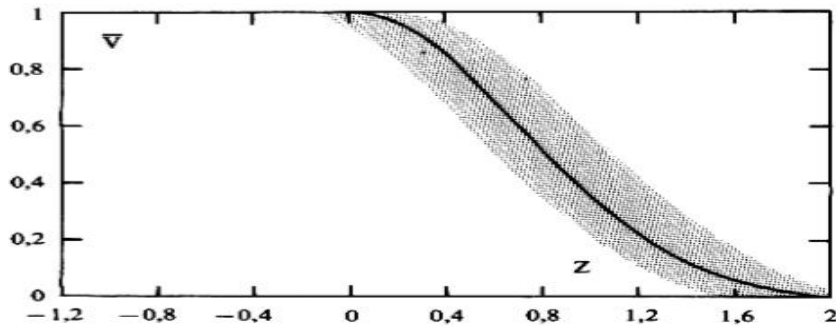


Figure 2.2 : Représentation adimensionnelle de la répartition de vitesse \bar{v} en fonction de Z , Selon SCHRODER (1963).

II.2.1 Ressaut hydraulique classique profilé en ‘‘U’’

Debabeche en 2003, à consacré une étude expérimentale sur la distribution des vitesses dans un ressaut hydraulique classique dans un canal profilé en ‘‘U’’, 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 F_1 sont tels que $23 \text{ mm} \leq h_1 \leq 61 \text{ mm}$ et $3,75 \leq F_1 \leq 12$, l’appareil utilisée est le Micro-moulinet.

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 2.3). 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.

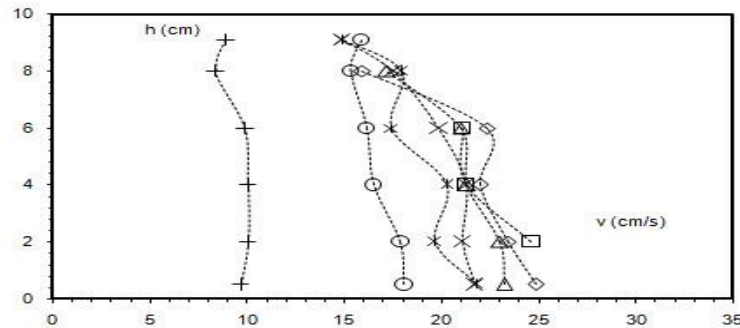


Figure 2.3 : Ressaut classique. Profil des vitesses moyennes horizontales dans l’axe de symétrie du canal, pour différentes positions x (cm) : (\square)30, (\diamond)40, (\triangle)50, (x)60, ($*$)70, (o)90, ($+$)110. $h_1=2,3 \text{ cm}$. $F_1 = 5,35$. $L_j = 100 \text{ cm}$, $h_2=9,6 \text{ cm}$.

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 $F_1 = 3,67$. Ce dernier évolue dans un intervalle de position relative : $1/3 \leq x/L_j \leq 3/5$ (Figure 2.4) DEBABECHE (2003).

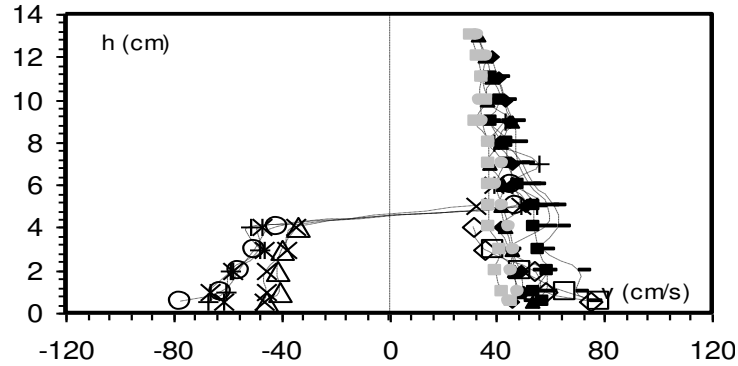


Figure 2.4 : Ressaut classique. Profil des vitesses moyennes horizontales dans l'axe de symétrie du canal, pour différentes positions x (cm) : (□)30, (◇)40, (△)50, (x)60, (*)70, (o)80, (+)90, (-)100, (-)110, (■)120, (◆)130, (▲)140, (●)160. $h_1=5,2$ cm. $IF_1=3,69$. $L_j=150$ cm, $h_2=13,5$ cm.

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 F_1 , pour différentes positions x . La vitesse relative V_f/V_1 diminue progressivement avec l'augmentation de F_1 . (Figure 2.5)

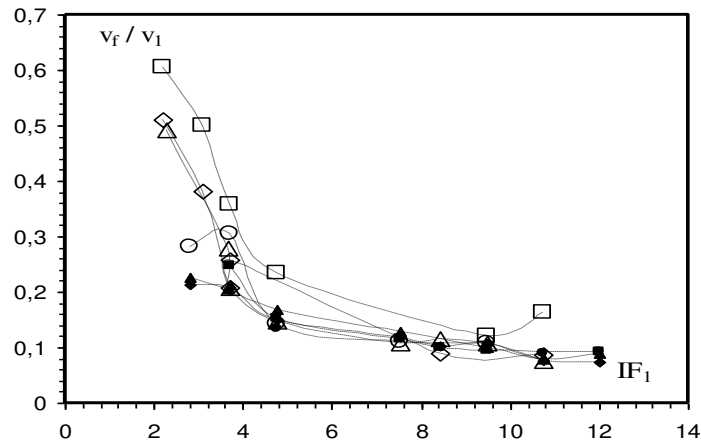


Figure 2.5 : Ressaut classique en canal profilé en "U". Variation de la vitesse moyenne horizontale relative V_f/V_1 en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, pour huit positions x : x (cm) = : (□)30, (◇) 50, (△)70,(o)90, (■)110, (◆)130, (▲)160, (●)180.

II.2.2 APPROCHE RAJARATNAM et SUBRAMANYA (1968, 1970)

Dans l'année (1968, 1970). Les mêmes résultats ont été obtenus par Rajaratnam et Subramania. La figure 2.6 montre la distribution de vitesse spécifique $\frac{u}{u_m}$ en fonction de la coordonnée verticale $\frac{z}{\delta_1}$, telle que u_m est la vitesse de section maximale et δ_1 la hauteur où $u = \frac{u_m}{2}$ et $\frac{\partial U}{\partial z} < 0$.

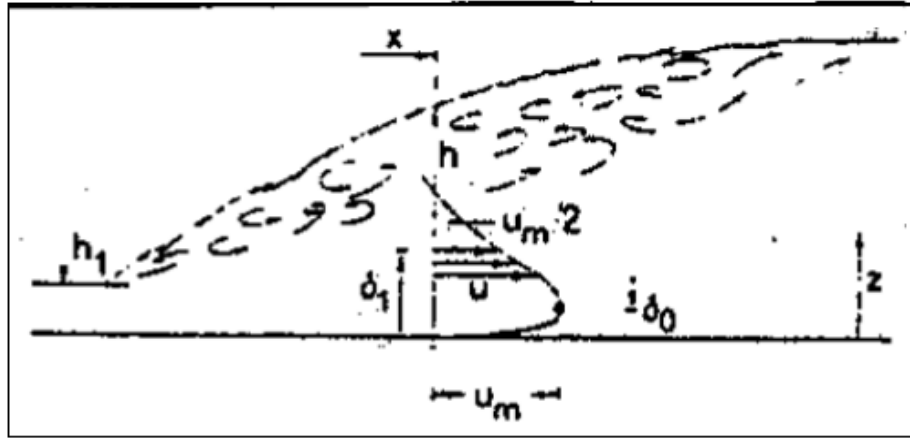


Figure 2.6 : Distribution des vitesses $u(z)$ dans la partie inférieure du ressaut

Où :

$$\frac{u}{u_m} = [Z\delta * \exp * (1 - Z\delta)]^{0.12}$$

$$Z\delta = \frac{5z}{\delta_1} \quad \text{avec} \quad \frac{u}{u_m} > 0$$

Selon l'équation 1.2, la vitesse maximale a lieu à $\frac{z}{\delta_1} = \frac{1}{5}$, par contre RAJARATNAM et SUBRAMANYA ont trouvé approximativement à $\frac{z}{\delta_1} = 0,18$. Par ailleurs la longueur relative $\frac{x}{h_1}$ et le nombre de Froude incident sont tels que ; $8,3 \leq \frac{x}{h_1} \leq 41,7$ et $3,9 \leq F_1 \leq 9,05$. Pour une série de valeur de la hauteur δ_1 , les résultats expérimentaux conduisent à la formulation suivante :

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

Avec l'équation 1.2, la limite de vitesse maximale pour la vitesse incidente $\frac{u_m}{v_1}$ est écrite en fonction de la longueur relative $\frac{x}{h_1}$, comme suit :

Chapitre II : DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

$$\frac{um}{v1} = \frac{1}{42} * \left[45 - \frac{x}{h1} \right] \quad \frac{um}{v1} < 30 \quad (2.4)$$

Pour les valeurs de $\frac{x}{h1} > 30$, la fonction $\frac{um}{v1}$ tend à se rapprocher de zéro. L'analyse RAJARATNAM et SUBRAMANYA (1968, 1970) ne s'applique qu'au fond de l'écoulement et les données relatives au roulis de surface ne sont pas collectées.

II.2.3 APPROCHE DE HAGER (1992).

L'analyse de des auteurs a été considérée comme une étape importante dans la compréhension des ressauts.

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 $4,3 < F_1 < 8,9$.

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

Pour tous les nombres de Fraudes F_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 $F_1 = 5,5$ et $6,85$. um et us 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 $u = u = um$ (figures 2.7 et 2.8). Les paramètres um et us et δ_0 dépendent de $\frac{x}{Lr}$ et de F_1 .

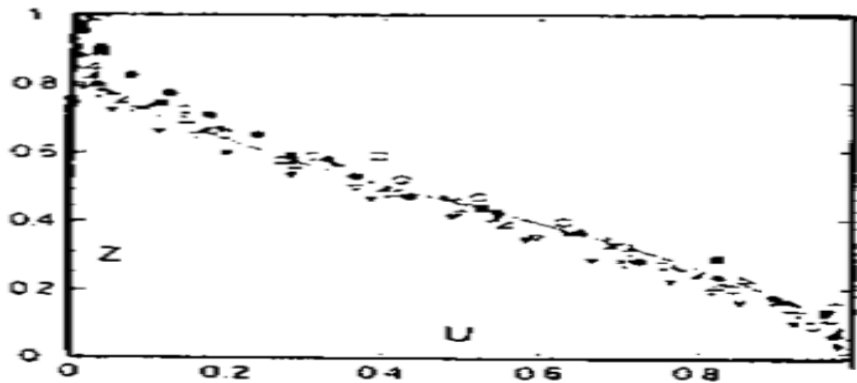


Figure 2.7: Distribution des vitesses $U(Z)$, pour différentes longueurs relatives $X = x/L$ $F_1 = 5,50$.

$X = (,) 0,2; (\square) 0,3; (\triangle) 0,4; (\diamond) 0,5; (\nabla) 0,6; (\pentagon) 0,7; (\hexagon) 0,8; (\heptagon) 0,9; (\bullet) 1,0$

Chapitre II : DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

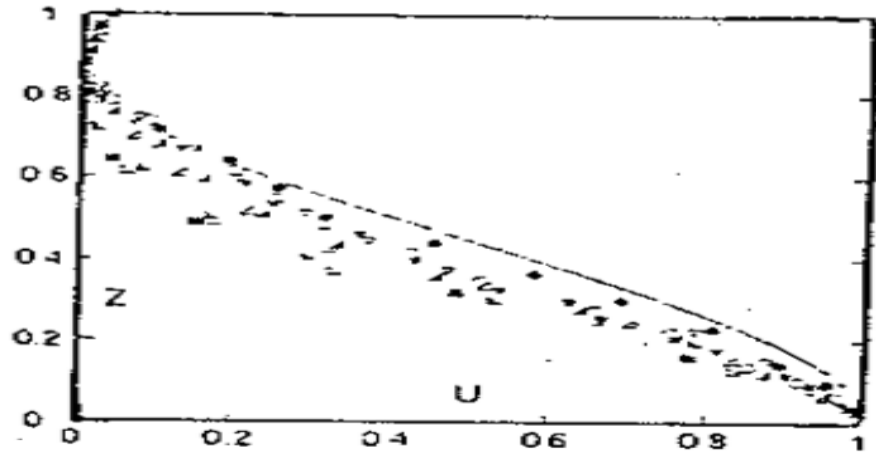


Figure 2.8 montre la variation de la vitesse maximale inférieure relative $U_m = \frac{(u_m - v_2)}{(v_1 - v_2)}$ en fonction de la longueur relative $X = x/L_r$, telles que $v_1 = q/h_1$ et $v_2 = q/h_2$ sont les vitesses nominales à l'amont et à l'aval du ressaut.

La figure 2.9 montre que l'effet du nombre de Froude F_1 sur U_m est petit, et que $U_m(X)$ peut être exprimée en fonction de la longueur relative X comme suit :

$$U_m = \exp(-2X^{1.8}), \quad 0 \leq X < 1,4 \quad (2.6)$$

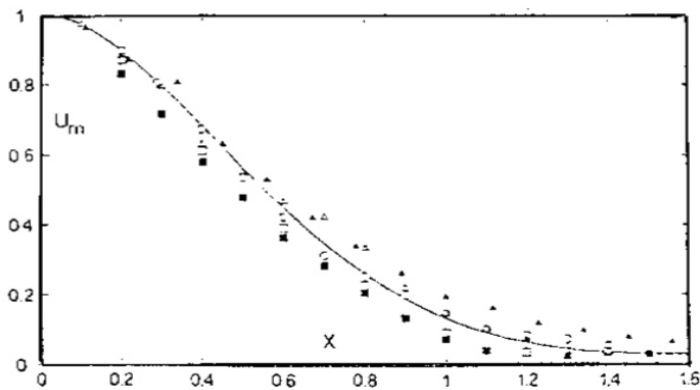


Figure 2.9 : Ressaut hydraulique classique, vitesse maximale inférieure relative U_m en fonction de la longueur relative X . (\square) Courbe tracée selon l'équation.1.7. $F_1 =$ (o) 4,3 , (S) 4,95 , (U) 5,5 , (,) 6,85 , (†) 8,9. La vitesse maximale relative de

Chapitre II : DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

$$U_s = -\sin \left[\frac{X+0.1}{1.1} \right] \quad , \quad 0,05 < X < 1,4 \quad (2.7)$$

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

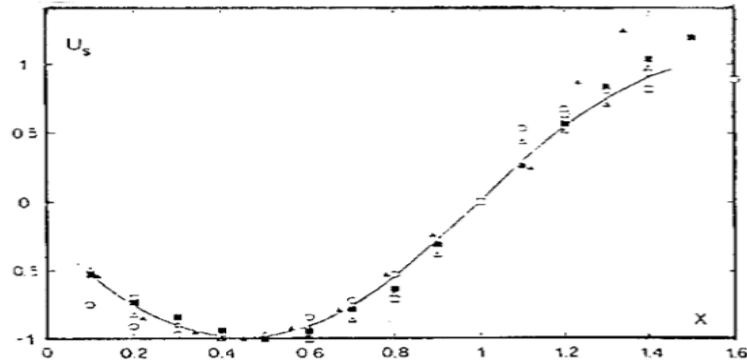


Figure 2.10 : Ressaut hydraulique classique, vitesse maximale supérieure relative U_s en fonction de la longueur relative X .

Même notation que la figure 2.11 La variation de la hauteur $\delta_0(X)$ est représentée dans la figure 2.9 et donne en fonction de X l'expression suivante :

$$\frac{\delta_0}{(h_2-h_1)} = 0.06 * \left[1 + 5 * \left(X - \frac{1}{4} \right)^2 \right] \quad , \quad 0,05 < X < 1,2 \quad (2.8)$$

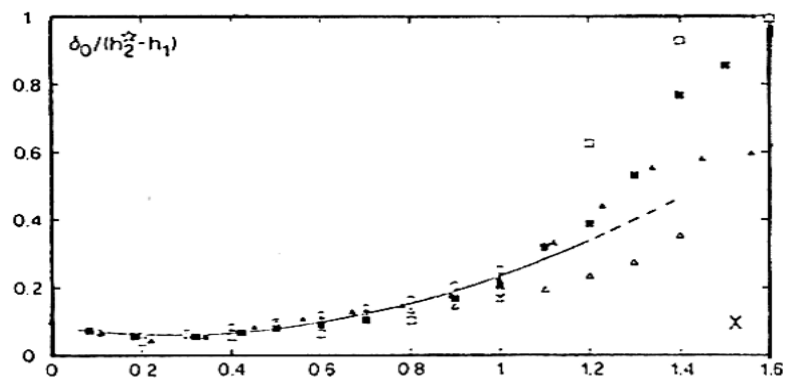


Figure 2.11 : Accroissement de la hauteur relative $\delta_0/((h_2-h_1))$ en fonction de la longueur relative X

Chapitre II : DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

Même notation que la figure 2.9 .Après analyse de la figure 2.11, elle montre qu'en ce qui concerne les valeurs de $X \leq 0,9$, la courbe suit complètement les points de mesure.

Pour $0 < x < L_r$, Les vitesses de surface V_s sont opposées à la direction principale de l'écoulement. Par conséquent, une distinction doit être faite entre la zone du rouleau et la région du rouleau inférieur.

$$X = \frac{x}{L_r}, \quad f = \frac{V_s}{V_t} \quad (2.6)$$

Où : $V_t = \frac{3}{8} * (Y - 1)^{\frac{1}{2}} * V$; $V = \frac{Q}{(b * h^2)}$.

Selon les tests de Schröder (1963), il est possible de spécifier $V_s(x)$ pour que :

Pour $X = 0$ correspond au pied amont du ressaut et $X = 1$ correspond à l'extrémité aval du rouleau ($x = L_r$), Figure 2.9.

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

$$\bar{X} = 1 - \frac{3}{2} * \sqrt{Y - 1}(X - 1), \quad \bar{f} = \frac{V_s}{V_2} \quad (2.7)$$

On retrouve alors la même fonction $f(X) = \bar{f}(\bar{X})$ pour $0 < X < 1$ et $X > 1$ (figure 4.12). Bien que le fuseau soit important, cette figure indique néanmoins les tendances prépondérantes pour les vitesses de surface.

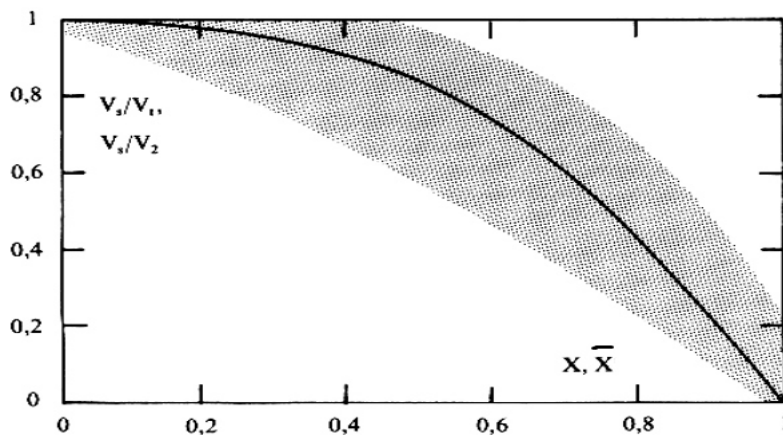


Figure 2.12 : Vitesse de surface adimensionnelle pour $0 < x < L_r$ et $x > L_r$ d'après les

Chapitre II : DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

définitions Des vitesses très élevées dans le ressaut hydraulique de l'eau près du fond du V_f sont particulièrement importantes dans un cours d'eau, de graves dommages.

$$X = \frac{x}{L_r} \quad , \quad f = \frac{V_f - V_2}{V_1 - V_2} \quad (2.8)$$

Où V_1 et V_2 sont les vitesses à l'amont et à l'aval du ressaut. La figure 2.13 reflète les observations de SCHRODER (1963).

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

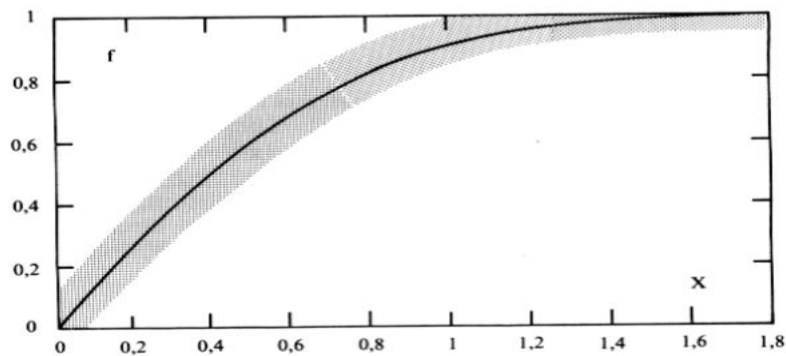


Figure 2.13: Vitesse relative $f = (V_f - V_2) / (V_1 - V_2)$ le long du fond en fonction de la coordonnée longitudinale relative x/L_r . Pour $X = 1,5$, la figure 4.10 donne $f \cong 0,04$, donc $V_f = 0,04V_1 + 0,96V_2$. $X = 1,5$ correspond à peu près à l'extrémité aval du ressaut .

Avec $Y = \frac{V_1}{V_2} = \sqrt{2F_1^2} - \frac{1}{2}$ et $V_2 = \frac{Q}{b \cdot h_2} = \frac{V_1 \cdot h_1}{h_2}$; on déduit $\frac{V_f}{V_2} \cong 1 + 0,06 \cdot F_1$ pour $X = 1,5$.

II.3 Ressaut hydraulique force type A

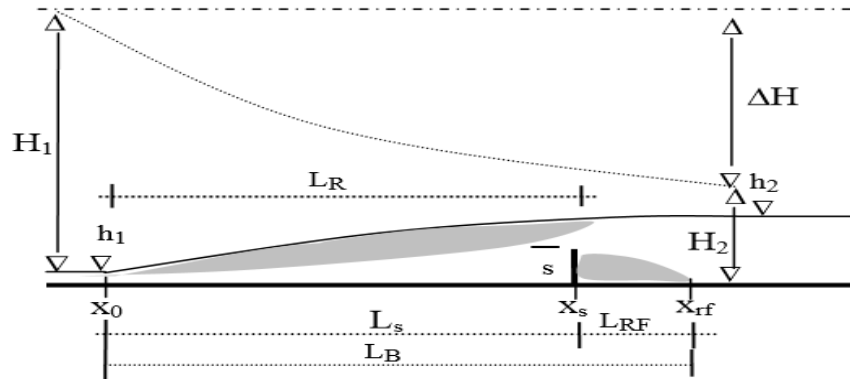


Figure 2.14: Ressaut forcé par seuil : définition des termes.

H_1 charge amont, H_2 charge aval, ΔH perte de charge. h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x_0 position du pied du ressaut, x_s position du seuil, x_{rf} position de l'étant donné les désavantages du ressaut classique, divers dispositifs particuliers. sont utilisés pour stabiliser l'apparition du ressaut hydraulique dans des conditions d'écoulement quelconques à un endroit précis (le bassin amortisseur), en essayant d'avoir le maximum d'efficacité, une hauteur d'eau aval et une longueur de bassin minimale. Dans le cas où un obstacle est placé en travers de l'écoulement, les conditions de celui-ci ainsi que la position et la hauteur de l'obstacle, peuvent conduire à deux configurations du ressaut. La première correspond à la formation complète du ressaut à l'amont immédiat de l'obstacle et le ressaut est dit contrôlé, la deuxième correspond à la formation partielle du ressaut de part et d'autre de l'obstacle, le ressaut est alors dit forcé (figure 2.14).

Nous étudierons les effets de l'élévation et de la localisation du seuil sur la projection forcée, en plus des propriétés de cette dernière. Comme RAND (1957), BRETZ a mené une étude pilote en 1988 sur l'effet d'un seuil sur le ressaut hydraulique. Leurs résultats ont été confirmés par HAGER, BRETZ (1988), HAGER, SINNIGER (1989), HAGER et LI (1992) description détaillée et classification de différents types de sauts forcés par écoulement de seuil dans un canal rectangulaire.

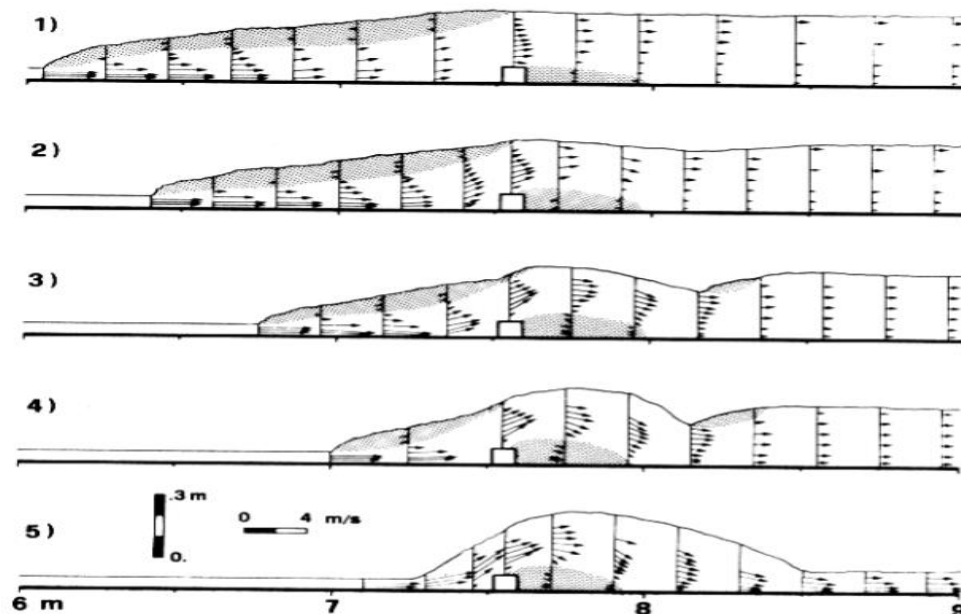
Il existe trois types de ressauts forcés par seuil et leur analyse en quatre sections longitudinales. HAGER et BRETZ (1988), ont traité en détail un cas analogue de ressaut hydraulique

Chapitre II : DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

forcé avec Froude $F_1 = 5,23$ (correspondant au débit $Q = 100\text{ l / s}$ et la hauteur d'eau amont $h_1 = 53\text{ mm}$) et le seuil de section carrée avec $s = 75\text{ mm}$, en formation de canal en utilisant Sédiments standards. Les trois types de ressauts forcés selon le seuil retenu sont les suivants :

- Ressaut forcé de type A ($h_2 = 337\text{ mm}$),
- Ressaut forcé de type B ($h_2 = 320\text{ mm}$)
- Ressaut forcé de type Bmin ($h_2 = 305\text{ mm}$).

Le type de transition forcée B est le type intermédiaire, c'est pourquoi les types A et Bmin sont traités en détail uniquement. Dans la section médiane du canal ($r = 5\text{ mm}$), les directions des lignes de courant sont mesurées dans le plan vertical à l'aide de la sonde de la direction verticale et les valeurs moyennes sur la plage d'une minute sont conservées. À un certain point, la bobine est positionnée à l'angle de la ligne de courant prédéterminée et trois mesures d'intégration sont effectuées. La distribution de vitesse ainsi obtenue est représentée sur la figure 2.15 des cinq espèces étudiées. Cette distribution évolue le long de la projection, sur et hors du seuil, est mise en évidence. Etant donné les fortes fluctuations de niveau dans certains cas, des mesures de vitesses proches de la surface font défaut.



Chapitre II : DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

Figure 2.15 : Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $F_1=5,23$ et $S=1,42$. a) ressaut type A ; b) ressaut type B ; c) ressaut type B minimum ; d) ressaut type C et e) onde. (Bretz, 1987) d) ressaut type (C et e) onde. (Bretz, 1987) Direction.

Les directions des lignes de courant dans le plan horizontal sont mesurées à l'aide d'une sonde de direction horizontale suivant une grille de points de mesure espacés de 50 mm entre les sections transversales $x=7,0m$ et $x=8,15m$. Cette opération est répétée pour les hauteurs $z=15, 50, 85$ et $200mm$. Cela représente 200 à 230 points pour chaque hauteur z . Les résultats sont présentés aux (ressaut forcé type A) (ressaut forcé type Bmin) Les flèches dessinées représentent la direction dans le plan horizontal. En effet si le ressaut type A, Bmin sont assez similaires extérieurement, leurs effets sur le fond à l'aval du seuil sont sensiblement différents.

$z = 15 \text{ mm}$

À l'approche du seuil, les lignes d'écoulement parallèles convergent, puis divergent verticalement à l'avant, soulignant la présence d'un vortex. Au-delà du seuil, les lignes convergent sur la plate-forme opposée à l'enroulement inférieur, puis descendent, commencent près des bords puis vers le milieu. Les directions négatives couvrent deux fois la zone sur l'axe central du canal autant que les murs. Plus en aval, les réseaux sont redevenus parallèles.

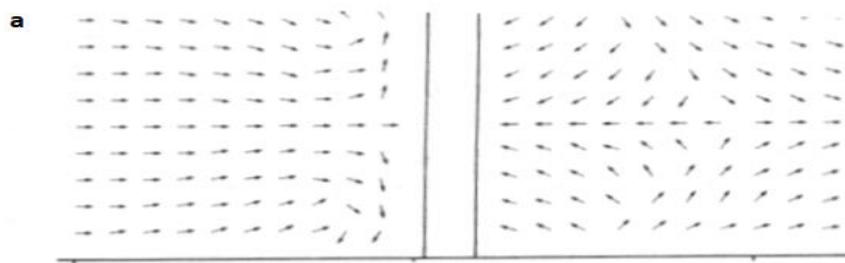


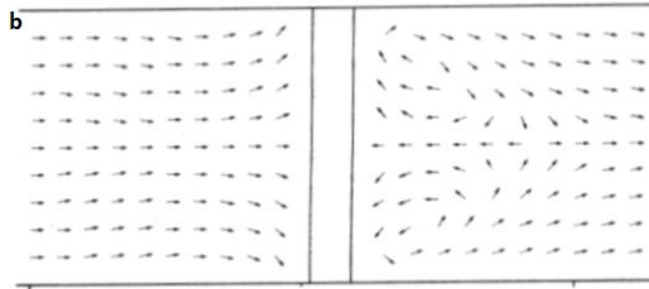
Figure 2.16: Distribution des lignes de courant pour les ressauts forcés de type A dans la zone du seuil :a) $z = 15 \text{ mm}$.

$z = 50 \text{ mm}$

Comme précédemment, les lignes actuelles convergent et divergent, mais plus que la source n'est déjà et de manière moins prononcée ; deux grands tourbillons tournent dans des directions

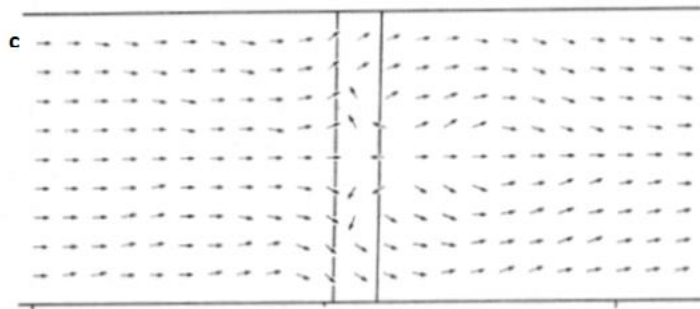
Chapitre II : DISTRIBUTION DES VITESSES DANS LE RESSAUT HYDRAULIQUE

opposées ; les directions divergent près du seuil, puis convergent à la source dans une très petite zone. Plus loin sur les lignes convergent vers le lit de la rivière.



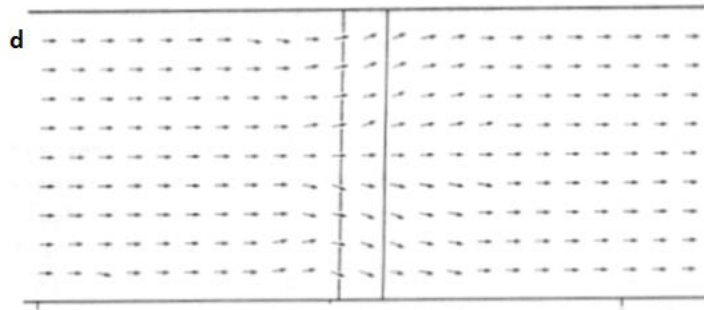
$z = 85 \text{ mm}$

La convergence et la divergence des lignes de courant sont atténuées à l'amont du seuil. Sur ce dernier, les directions proches de l'axe sont divergentes vers l'amont et celles près des parois divergentes vers l'aval.



➤ $z = 120 \text{ mm}$

Les directions des lignes de courant sont pratiquement parallèles partout. Une faible convergence suivie d'une divergence apparaît à l'approche du seuil. La divergence se maintient quelque peu au-delà et disparaît rapidement, les filets redeviennent parallèles.



II.4 Conclusion

Ce chapitre de notre étude bibliographique des principaux travaux qui ont été réalisés dans le domaine de la distribution de vitesse dans le ressaut hydraulique, où nous avons présenté en premier lieu une histoire de certains travaux dans différents types de canaux.

Pour le ressaut classique, nous avons passé en revue les travaux de Rajaratnam, Subramania (1968,1970) et Hager (1992), leurs études ont permis de trouver des relations fonctionnelles liant différentes propriétés et vitesses de ressaut. Debabeche (2003) a mené une étude pilote sur la distribution de la vitesse dans le ressaut hydraulique forcé de type A dans le canal triangulaire.

Étude
Expérimentale

Chapitre III : Description du model Expérimental

Chapitre III

Description du model

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons en premier lieu le modèle expérimental, constitué du canal composé trapézoïdal de base rectangulaire, les appareils et instruments. En second lieu, nous passerons à la description du protocole expérimental utilisés pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique.

III.2 Description du canal

Le canal expérimental (figure 3.2) et (figure 3.3.a et 3.3.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° (figure 3.1), par une conduite de PVC circulaire de 115 mm de diamètre. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe (figure 3.4) 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, permettant la mesure directe du débit.

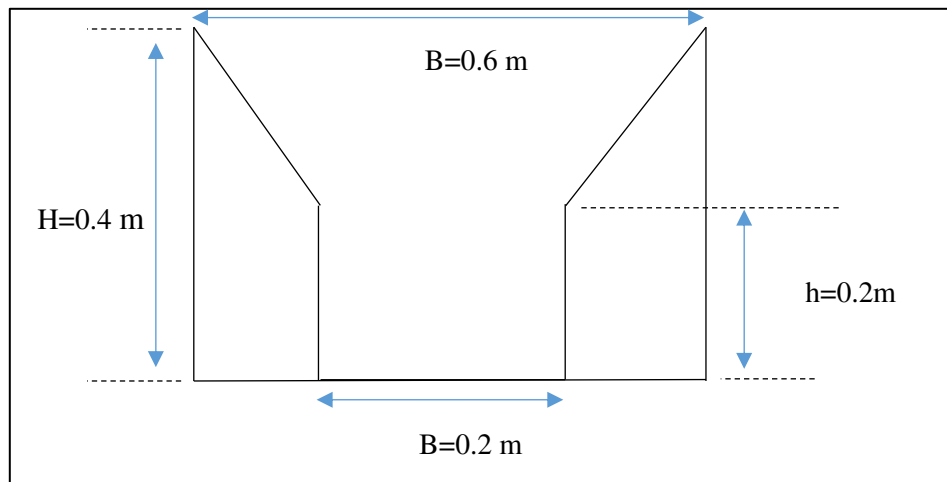


Figure 3.1 : La forme géométrique du canal de mesure (trapézoïdal à base rectangulaire)

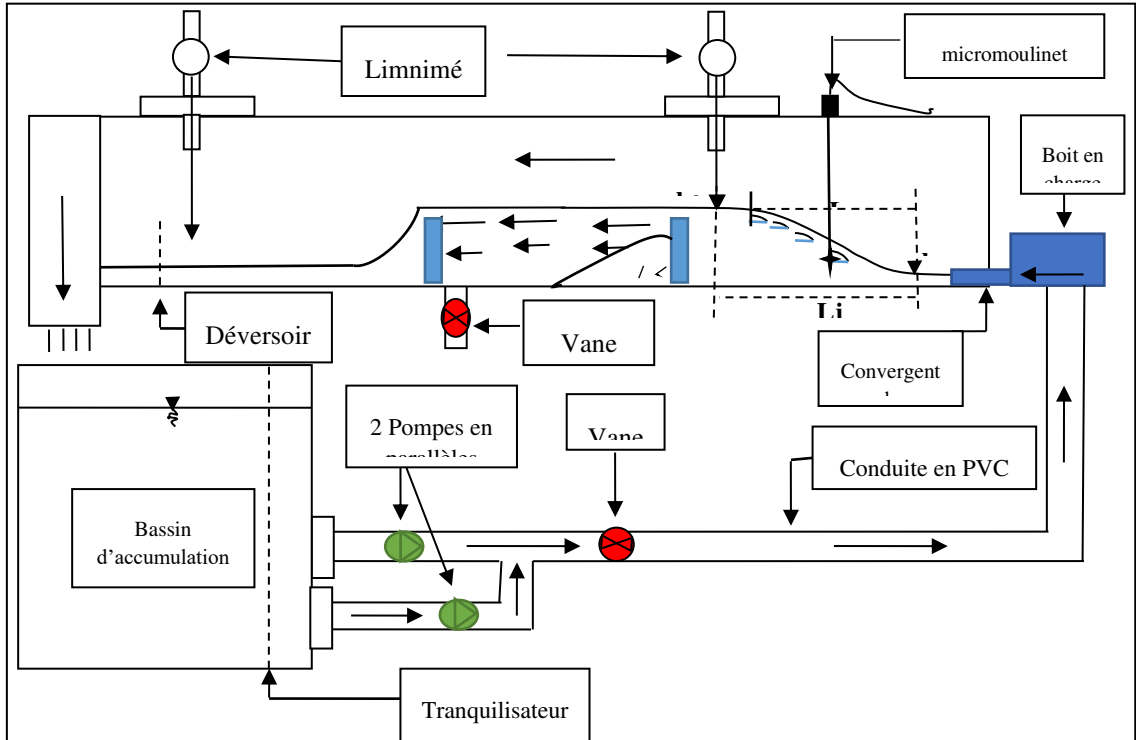


Figure 3.2 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal à base rectangulaire.



Figure 3.3.a: Photographie du modèle expérimental du canal.



Figure 3.3.b : Photographie de la forme du canal



Figure 3.6 : Photographie d'une série de convergent.

Le débit volume Q ainsi que la profondeur h_2 sont les seules grandeurs qui nécessitent un appareillage spécifique. Mais la position x du seuil 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 ($h_1 = 2 \text{ cm} ; ; 3 \text{ cm}$), après avoir positionné le pied du ressaut à environ $\Delta x \approx 5 \text{ cm}$. En mesure la profondeur h_2 à l'aide d'une limnimétrie à vernier à double précision (figure 3-10). Les mesures de h_2 obtenues seront injectées plus tard dans la formule de *Hachemi Rachedi L.* (2006), pour le débitmètre à déversoir utilisé.

III.3 Limnimétrie

Sauf pour la hauteur initiale de la projection, où sa valeur est connue En raison de la section de sortie de convergé sous charge, les profondeurs de l'eau dans Le canal de mesure a été évalué par longitude. L'appareil se compose d'une règle métallique dégradée d'un côté et attachée à son

côté Le fond d'un point vertical (point limnimétrie) dont le rôle est de s'installer La surface de l'eau (figure 3.7).

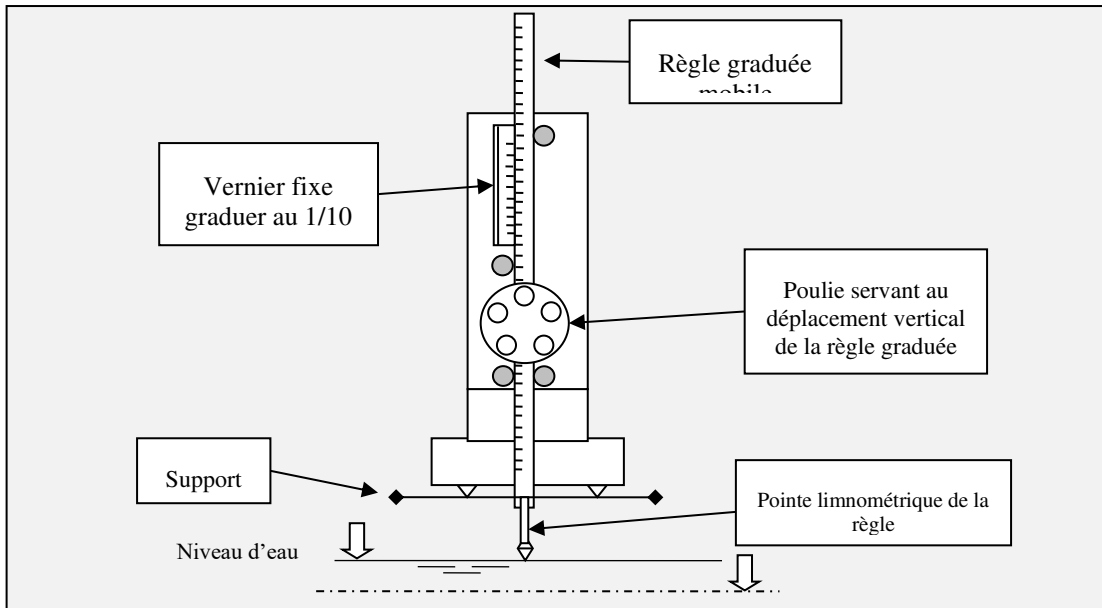


Figure 3.7: Photographie du model expérimentale du canal

La lecture s'effectue sur l'échelle de niveau en deux étapes : on lit d'abord la graduation sur la règle, située directement au-dessus de zéro, puis on lit le nombre de cinquante par rapport à la section qui coïncide ou se rapproche le plus de la division de la base.

III.4 Mesure du débit

Comme il a été cité précédemment, le canal de mesure de section trapézoïdale symétrique à base rectangulaire est relié dans sa partie aval à un second canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction (figure 3.8) latérale réalisé et testé par *Hachemi Rachdi* (2005), permettant la mesure directe du débit.

En effet, lors du passage d'un écoulement à débit Q à travers les deux parois du débitmètre, la hauteur h de la lame d'eau traversant le déversoir rectangulaire est obtenue par la lecture sur un limnimétrie placé au-dessus de l'ouverture du déversoir. Ainsi, le débit volume est obtenu en insérant la hauteur h dans l'équation (3.1) du déversoir.

Chapitre III : Description Du modale Expérimental

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

Avec : $\beta = b/B$

Q : Le débit en (m³/s)

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

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

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

b : Largeur de l'échancrure en (m) ; (b=0.22 m) ;

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

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

D'où l'expression du débit volume :

$$Q = 0.3745 * h^{\frac{3}{2}} \quad (3.2)$$



Figure 3.8: Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit.

III.5 Mesure de la vitesse

La mesure des vitesses locales est effectuée au moyen d'un micro-moulinet (figure 3.8 et 3.9), relié à un appareil permettant la lecture de la fréquence du signal émis par la rotation de l'hélice, ce dernier analyse le signal puis le transmet à l'ordinateur 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.

Nous avons mesuré les vitesses avec une petite boule (figure 3.8) connectée à un appareil qui nous permet de lire la fréquence du signal de rotation du ventilateur. Ce signal est collecté simultanément par un enregistreur électronique connecté à un ordinateur et traduit en une courbe graphique et des valeurs de vitesse.

La valeur de fréquence du signal transmis est lue, par contact électrique, sur un appareil portable alimenté par 4 piles de 4.8 volts Cet appareil nous donne 10 valeurs de vitesse toutes les 10 secondes.

De plus, cette petite poulie est capable de fournir la valeur la plus élevée pour la vitesse domestique de 150 cm / s.

Les sections sous la première partie de la projection sont caractérisées par un écoulement très sévère sous la forme d'un avion et la vitesse moyenne peut atteindre 300 cm / s, et il y a aussi des températures élevées à des vitesses .Les valeurs de vitesse élevée ne peuvent pas être déterminées par cet appareil que nous avons utilisé pour évaluer les vitesses limitées de 0 à 150 cm / s.

La distribution de vitesse horizontale moyenne est représentée par 9 coupes transversales et 5 coupes longitudinales



Figure 3.8 : Photographie de la Micro-moulinet et ses appareils annexe.

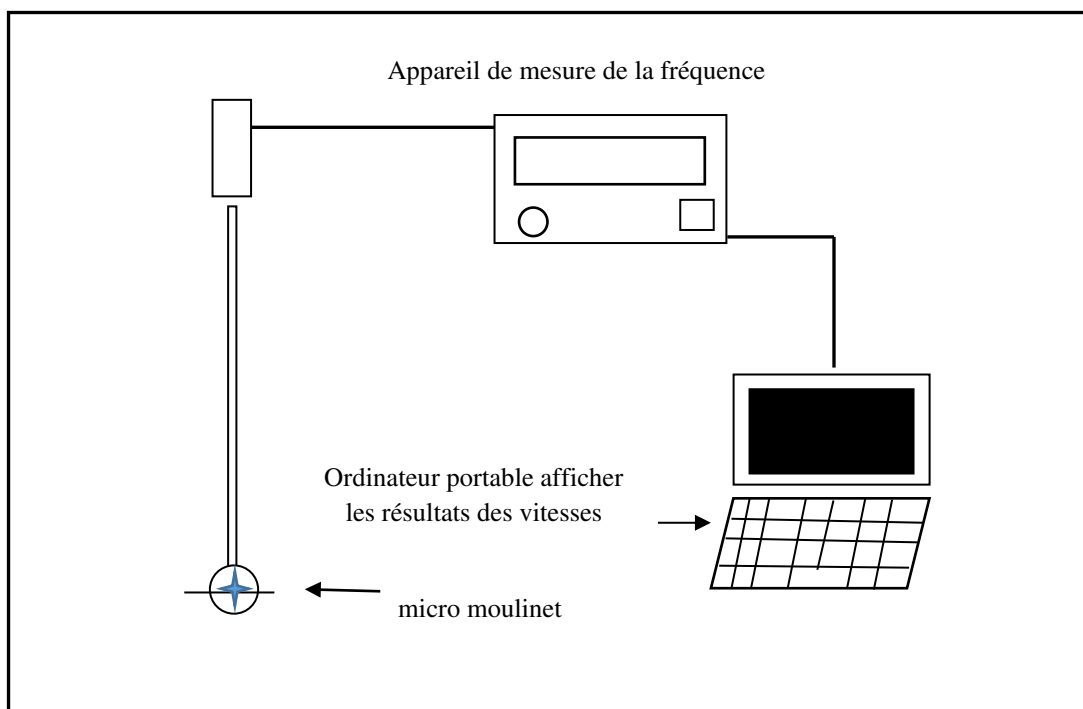


Figure 3.9 : Micro-moulinet et ses appareils annexes.

III.6 Les seuils

Nous avons des seuils utilisés dans le dispositif expérimental, qui sont des formes rectangles. Pour obtenir un nombre n'importe quel de points, nous avons préparé 2 seuils de différentes hauteurs (figure 3.10).

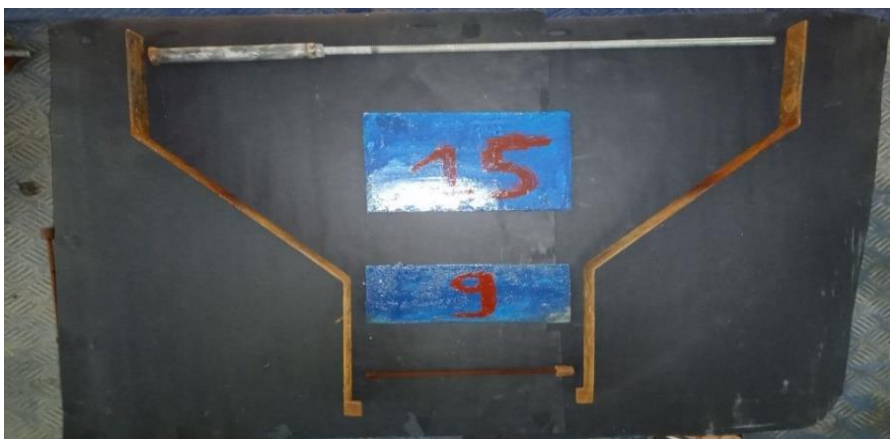


Figure 3.10 : Photographie des seuils minces testés est Support du seuil.

III.7 Protocole des essais

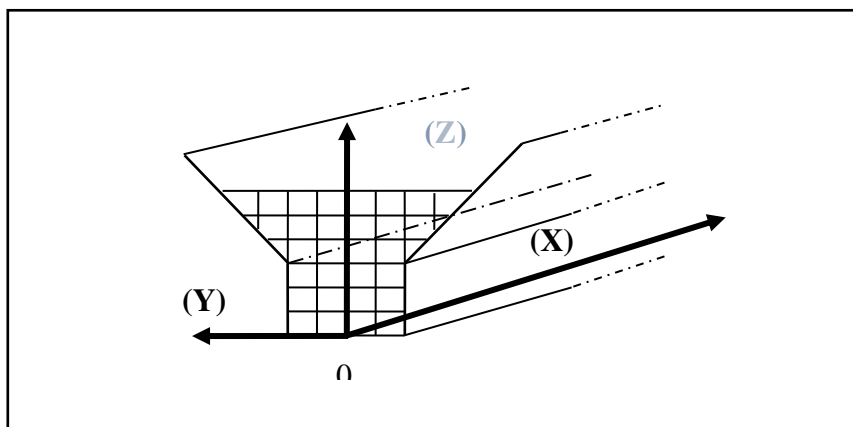


Figure 3.11 : Maillage et système d'axes adoptés pour la mesure des vitesses horizontales.

Point de mesure est caractérisé par ses coordonnées x, y et z.

Les axes de coordonnées sont définis dans la figure 3.11 comme suit :

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 ; le déplacement longitudinal se fait généralement avec un pas de 10 cm.
2. L'axe y - coordonnée transversale - parcourt la largeur du canal ; le zéro est placé dans l'axe du canal ; à chaque déplacement transversal correspond un pas de 4 cm.
3. L'axe des z - coordonnées verticales - possède son zéro sur le fond horizontal du canal et dirigé du bas vers le haut ; le déplacement vertical se fait avec un pas de (5 cm.13 cm. 21 cm.25 cm). Le maillage est resserré à l'amont et l'aval immédiat du seuil.

III.7.1 Opérations de mesures

Pour chaque type de ressaut et pour un nombre de Froude incident F_1 donné, les opérations suivantes sont effectuées :

- 1^{ère} Opération : On fixe d'abord la position longitudinale x et la position transversale y, puis on fait varier la hauteur z.
- 2^{ème} Opération : 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^{ème} Opération : 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 du ventilateur de la sonde à particules fines, il y a une mesure de la vitesse horizontale moyenne $v(x, y, z)$. Cette mesure est effectuée en environ une minute et représente la moyenne des dix valeurs de vitesse horizontale à un moment donné. Par conséquent, nous avons mesuré environ 700 points de mesures expérimentales de ressaut forcé dans le canal composite (type A), décrivant en détail la distribution de vitesse horizontale moyenne, en 5 sections longitudinales et 9 sections transversales.

III.8 Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à l'étude du modèle expérimental, qui a servi de base dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal composé. Nous avons abordé les appareils de mesure utilisés tel que le micro-moulinet qui a été utilisé dans ce travail de laboratoire où nous les avons illustrés par des photographies, dans le but de prendre toutes les mesures nécessaires quant aux caractéristiques du ressaut hydraulique.

En ce qui concerne les mesures des débits, nous avons utilisé le débitmètre à déversoir rectangulaire de *Hachemi Rachedi L.* (2006) vu son efficacité et nous avons abouti à des résultats acceptables.

Chapitre IV : Étude Expérimentale

Chapitre IV

Étude expérimentale

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous effectuerons empiriquement des mesures des vitesses dans le ressaut hydraulique forcé de type A dans un canal composé d'un trapèze à base rectangulaire. En plus, nous tenterons d'analyser la distribution des vitesses dans ce phénomène pour qu'on puisse comprendre le comportement de l'écoulement du ressaut. Nous avons utilisé deux hauteurs primaires de l'écoulement ($h_1 = 2$ et 3 cm). Grâce à ces hauteurs, nous avons obtenu les nombres de Froude $F_1 = 6,9$ et 10 . À la fin de ce chapitre, nous tenterons de montrer la relation entre les vitesses relatives et la position relative.

IV.2 Description des essais

L'objectif de notre étude est d'analyser l'évolution du ressaut hydraulique forcé de type A dans le canal composé.

Comme mentionné précédemment, h_1 est la hauteur de la sortie de l'eau du convergent ($h_1 = 2$ et 3 cm) ces derniers correspondent des nombres de Froude les suivants $F_1 = 6,9$ et 10 .

Nous avons fixé deux seuils différents ($S_1 = 9$ cm et $S_2 = 15$ cm), chacun de ces seuils à une distance fixe ($L_{S_1} = 185$ cm, $L_{S_2} = 427$ cm), les Figures 4.1 et 4.2 illustrent bien notre configuration de l'écoulement.

- Mesure de la hauteur déversant h_{dev} .
- Calcul du débit volume Q par l'application de la relation (3.1)
- Calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par l'application de

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{g * b^2 * h_1^3} \quad (4.1)$$

- Mesure de la longueur L_r du rouleau.
 - Mesure de la longueur L_b du bassin.
 - Mesure de la hauteur conjuguée aval h_2 du ressaut.

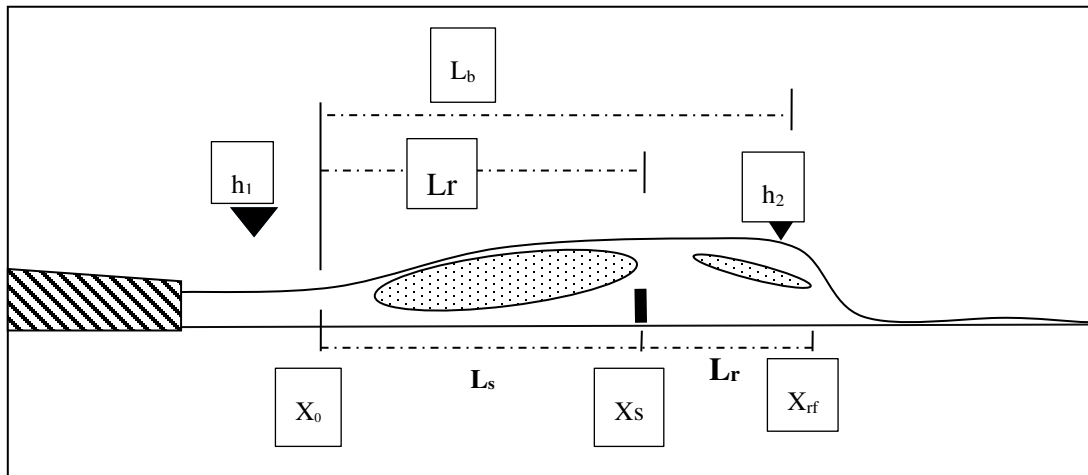


Figure 4.1 : Ressaut forcé type A h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x position du seuil par rapport au pied du ressaut.

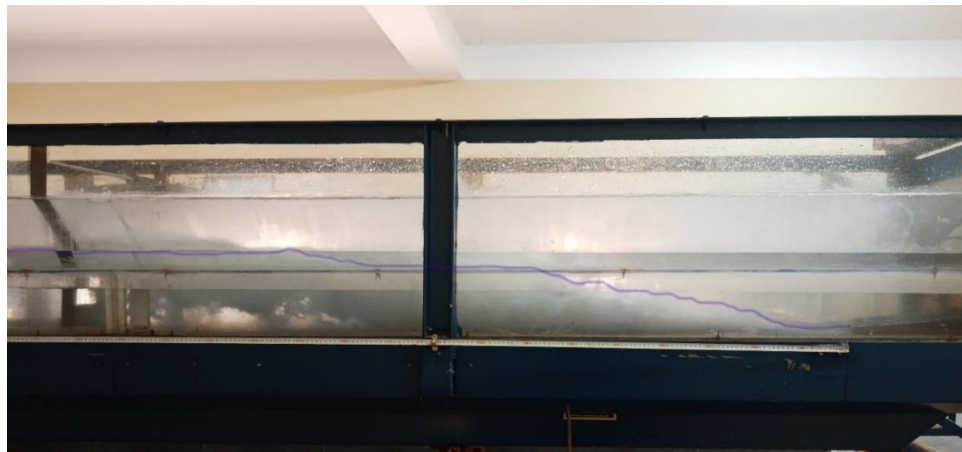


Figure 4.2 : Photographie d'un ressaut forcé de type A évoluant dans un canal trapézoïdal à base rectangulaire, $F_1=10.08$; $S_1=9$; $S_2=15\text{cm}$; $L_{S1}=185\text{cm}$, $L_b=254\text{cm}$; $h_2=26,7\text{cm}$, $h_1=2\text{cm}$.

IV.3 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux sont divisés en deux expériences principales, pour le premier essai nous avons effectuée 408 points de mesure de la vitesse, le deuxième essai compte de 360 points dans le but de confirmer et clarifier l répartition des vitesses dans notre canal. Pour montre le sens de l'écoulement le long du canal on place une file de plastique de 3.5 cm de long à 3 mm au-dessus d'hélice.

IV.3.1 Premier essai

Le tableau suivant montre les caractéristiques expérimentales de la première expérience. Nous n'avons pu enregistrer aucune mesure dans les sections efficaces $x < 150$ cm, en raison des vitesses très élevées où la vitesse d'écoulement moyenne $V_1 \approx 536$ cm/s. Il déplace ainsi toutes les particules liquides qui composent le flux initial ($x < 150$ cm) de l'écoulement à une vitesse moyenne supérieure à 300 cm/s.

Tableau 4.1 : conditions et paramètres hydraulique respectif au premier essai.

| F_1 | Q (l/s) | H_d (cm) | S_1 (cm) | S_2 (cm) | h_1 (cm) | h_2 (cm) | L_{S1} (cm) | L_{S2} (cm) | L_B (cm) | L_{RF} (cm) |
|-------|--------------|---------------|---------------|------------|---------------|------------|------------------|------------------|---------------|------------------|
| 10.08 | 21,44 | 13,8 | 9 | 15 | 2 | 26,7 | 185 | 427 | 254 | 69 |

IV.3.1.1 Distribution Longitudinale des vitesses

Dans cette expérience, nous avons distribué les points de mesures des vitesses horizontales moyennes en sept coupes longitudinales réparties sur la largeur du canal, des deux côtés de l'axe de symétrie des positions suivantes, y (cm) = -11, -8, -4, 0, +4, +8, 11 +, où $y = 0$ cm est l'axe de symétrie du canal.

Nous afficherons les vitesses horizontales moyennes dans les sept axes cités au-dessus dans des tableaux ainsi que leurs représentations graphiques.

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.

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

$$Y = 0$$

| y = 0 cm | | | | | | | | |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| x | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 |
| h | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 |
| 5 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | -135,1 | -121,8 | -89,96 | 58,16 | -45,38 |
| 13 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | -145,2 | 143,54 | 131,58 |
| 21 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | 148,53 |
| 25 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | -145,2 | 142,05 | 140,99 | 135,2 |
| 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 |
| -32,6 | 27,3 | -22,09 | 24,01 | 25,66 | 44,72 | 63,78 | 49,19 | 34,6 |
| 83,62 | 88,6 | -92,91 | 102,65 | 119,45 | 120,65 | 122,07 | 119 | 118,3 |
| 148,53 | 148,53 | 148,53 | 135,87 | 123,2 | 123,2 | 123,2 | 123,2 | 123,2 |
| 134 | 133,2 | 130,2 | 128,22 | 127 | 126,89 | 126 | 125,66 | 125,87 |

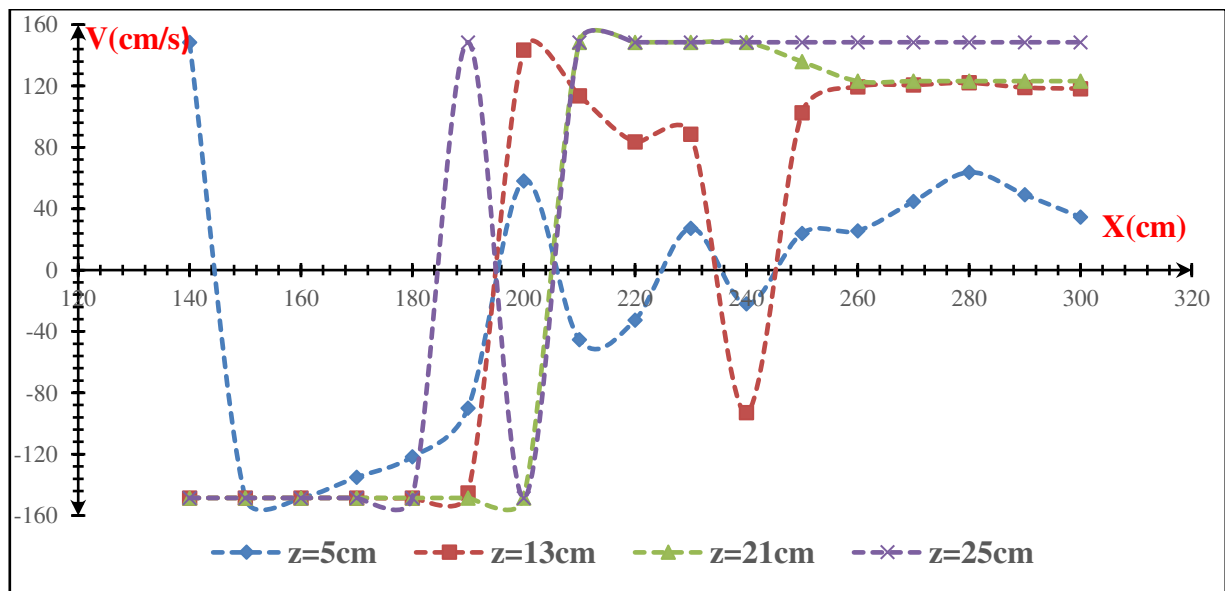


Figure 4.3: Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=0$ cm, pour différentes positions x_s (cm).

La figure 4.3 montre le profile horizontale de la section longitudinale ($y = 0$ cm, axe de symétrie du canal) avec la variation de X a un pas de 10 cm, dans différents plans ($Z = 5, 13, 21, 25$ cm). Dans la section d'écoulement peu profond mesuré à partir du bas du canal et en aval de la section primaire de la projection, les vitesses sont très élevées en tout point à une distance inférieure.

Les mesures des vitesses sont mesurées à partir de la position $x = 140$ cm, ou il y a un diagramme clair dépassant 150 cm/s jusqu'à $x = 160$ cm, ces valeurs des vitesses élevées sont dues au jet d'eau provenant de la sortie du convergeant. Cette section a des vitesses de pointe (plus de 150 cm/s) sur tous les plans ($Z = 5, 13, 21, 25$ cm).

Dans $Z = 5$ cm, a $x = 140$ cm, la vitesse de pointe (plus 150 cm/s) a un signal parfois positif et parfois négatif.

Dans ($z = 13, 21, 25$ cm), a (x) entre (140 et 185cm) les vitesses sont maximales et ont un signales négatifs.

En remarque des différenciations des valeurs des vitesses sur tous les plans, ces valeurs enregistrent des signes moins et négatifs dans l'intervalles ($x = 185$ cm, $x = 250$ cm). Après cet intervalle les vitesses sont positives est stables.

Lorsque l'on s'éloigne de $x = 250$ cm, on constate une diminution de la vitesse (34 cm/s) à $z = 5$ cm. De plus, on note que les vitesses élevées sont enregistrées à la surface avec une hauteur ($z = 13, 21$ et 25 cm) jusqu'à 125 cm/s. Ceci est confirmé par l'auteur Debabeche (1996).

Les signes positives et négatives des valeurs des vitesses représentent la direction du mouvement des courants d'eau par rapport le sens de l'écoulement Hagar (1992).

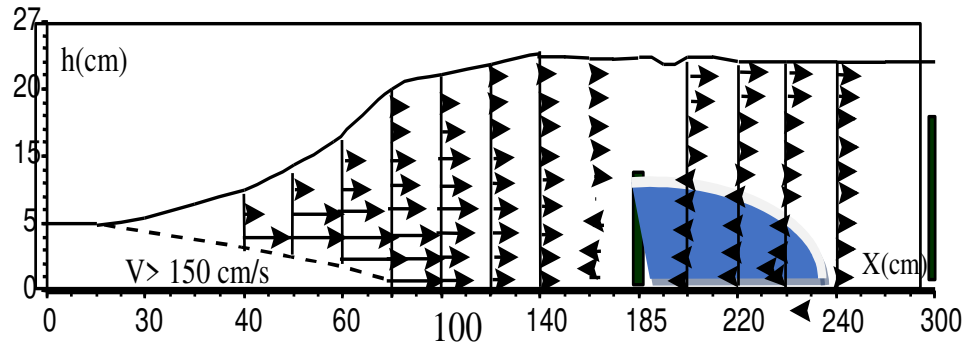


Figure 4.4: Ressaut forcé type A distribution des vitesses moyennes pour la section longitudinale $Y = 0 \text{ cm}$

Tableau 4.3 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale

$Y = -4 \text{ cm}$

| y = -4 cm | | | | | | | | |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| x | | | | | | | | |
| h | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 |
| 5 | 148,53 | 130,89 | 114,95 | 105,08 | 44,82 | 76,99 | 33,33 | -47,55 |
| 13 | 148,53 | -140,53 | -134,2 | -117,3 | -128,5 | -90,65 | 131,11 | -100 |
| 21 | 148,53 | 148,53 | 148,53 | 148 | 142,1 | -129,55 | 105,88 | 106,02 |
| 25 | 148,53 | 148,53 | 148,53 | 148,5 | -148,53 | 144,02 | 143,2 | 133,99 |
| | | | | | | | | |
| 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 |
| -39,93 | -27,88 | -15,1 | 26,87 | 24,34 | 40,3 | 72,68 | 41,12 | 72,68 |
| 119,4 | -109 | -97,94 | 93,75 | 99,7 | 90,45 | 107,77 | 103,12 | 107,77 |
| 104,22 | 100,4 | 116,22 | 90,2 | 119,66 | 115,99 | 120,1 | 115,45 | 111 |
| 148 | 133,66 | 148,53 | 125,33 | 148,53 | 125,1 | 148 | 119,6 | 116,4 |

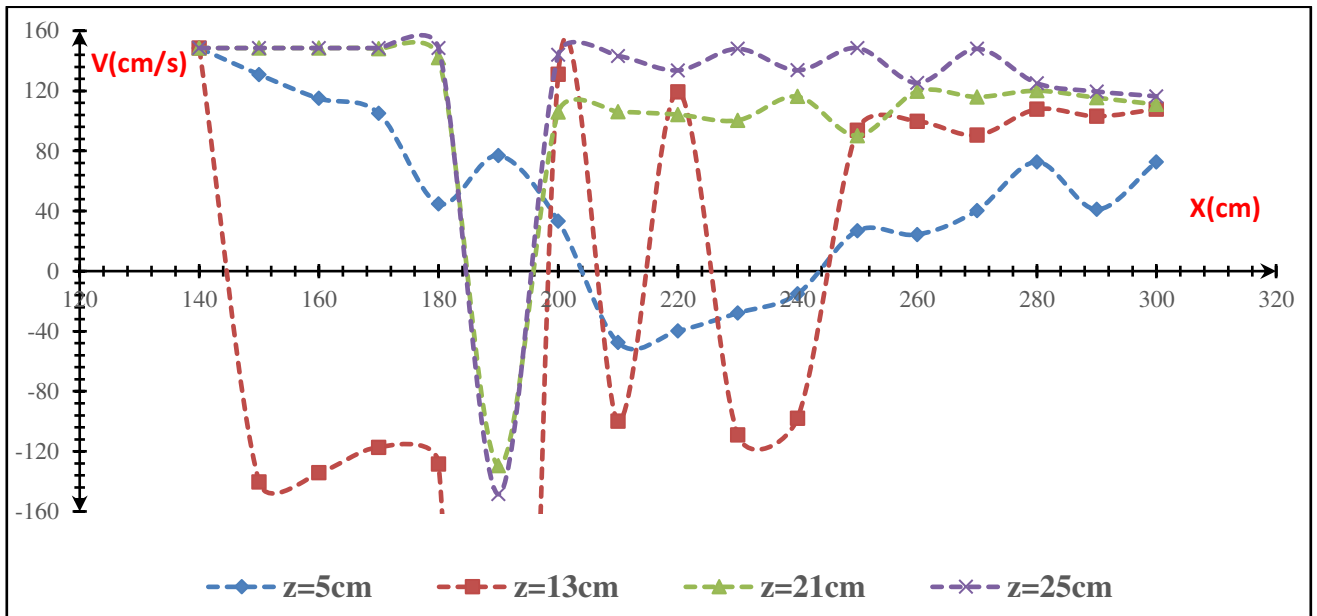


Figure 4.5 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -4$ cm, pour différentes positions x (cm).

La figure 4.5 et le tableau 4.3 illustrent le profil des vitesses horizontales moyennes de la section longitudinale $y = -4$ cm. à $x = 140$ cm, des grandes vitesses se forme jusqu'au premier seuil à $x = 185$ cm sur tous les plans avec des signes positifs sauf la courbe ($z = 13$ cm) marque un signe négatif.

Dans l'intervalles ($x = 185$ cm, $x = 250$ cm) des diversifications des valeurs des vitesses sur tous les plans, les vitesses enregistrent des signes moins et négatifs. Après cet intervalle les vitesses sont positives est plus stables en allons ver le deuxième seuil.

De la position 260 cm à 300 cm, nous remarquons une diminution de la vitesse de 41 cm/s dans la courbe $z = 5$ cm, toutes ces valeurs de vitesses sont positives. Nous enregistrons aussi une valeur de vitesse maximum de 119,6 cm/s sur la courbe $z = 25$ cm. ces résultats sont toujours confirmé par l'auteur Debabeche (1996).

Tableau Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y=4cm, pour différentes positions xs (cm)

| y = +4 cm | | | | | | | | |
|-----------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| X | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 |
| h | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 |
| 5 | 148,53 | 131,89 | 115,25 | 104,25 | 93,25 | 75,51 | 57,77 | -44,57 |
| 13 | 148,53 | -141,83 | -135,3 | -117,33 | -87,66 | -91 | 95,25 | -101,1 |
| 21 | 148,53 | 148,53 | 148,53 | 148,53 | 140 | -130,2 | 109,55 | 105,5 |
| 25 | 148,53 | 148,53 | 148,53 | 148,53 | 144,1 | 142 | 139,2 | 133,4 |
| 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 |
| -31,38 | -30,09 | -28,81 | 28,9 | 29,67 | 38,85 | 48,58 | 39,1 | 30,3 |
| 107,42 | -107,21 | 106,15 | 91,57 | 77,71 | 91,5 | 106,56 | 105,3 | 104,02 |
| 107,8 | 106,55 | 120,44 | 90,87 | 119,3 | 118,1 | 119,3 | 119,3 | 110,47 |
| 133,4 | 131,12 | 128,54 | 125,33 | 123,1 | 122,6 | 120,33 | 119,6 | 115,2 |

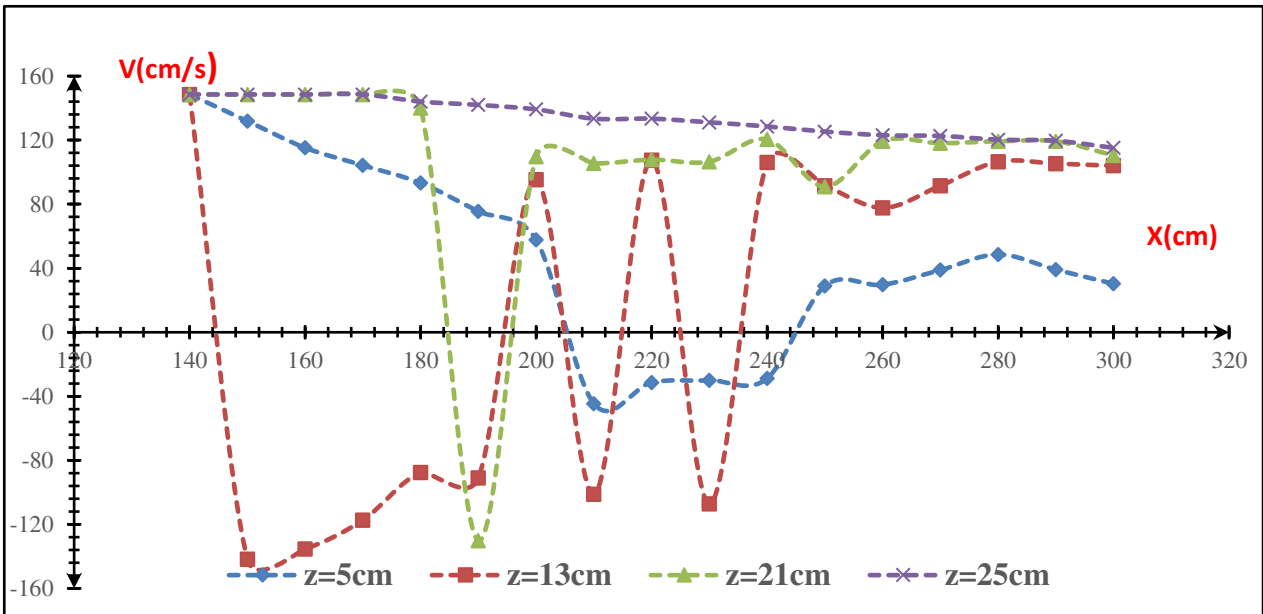


Figure 4.6 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y=4cm, pour différentes positions x_s (cm)

Pour la figure 4.6, nous remarquons que la distribution des vitesses dans toutes les plans ($Z = 5, 13, 21$ et 25) est similaire à la figure 4.5 précédente, sauf un point que se situe juste après le premier seuil a $x = 190$ cm presque qui est contradictoire avec le profile $y = -4$.

Tableau 4.5 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale

| y = -8 cm | | | | | | | | |
|-----------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| x | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 |
| h | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 |
| 5 | 148,53 | -109,50 | -71,06 | -49,41 | 27,76 | -22,36 | 17,07 | 20,45 |
| 13 | -148,53 | -123,00 | 97,42 | 98,01 | -98,76 | -114,30 | 129,91 | 127,81 |
| 21 | 148,53 | -148,53 | 148,53 | 148,53 | 148,53 | 103,53 | 58,63 | 57,66 |
| 25 | 148,53 | 148,53 | 148,53 | 148,53 | 142,38 | 140,20 | 136,28 | 133,68 |
| 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 |
| 22,09 | 21,30 | 23,07 | 22,45 | 21,40 | 42,20 | 63,01 | 52,22 | 41,43 |
| 12çà5,70 | 120,18 | 114,66 | 124,51 | 134,35 | 114,81 | 95,26 | 95,26 | 95,26 |
| 57,65 | 64,66 | 71,67 | 69,66 | 68,07 | 66,20 | 64,47 | 63,23 | 63,01 |
| 131,18 | 130,00 | 127,82 | 127,00 | 126,83 | 126,00 | 125,84 | 124,30 | 130,00 |

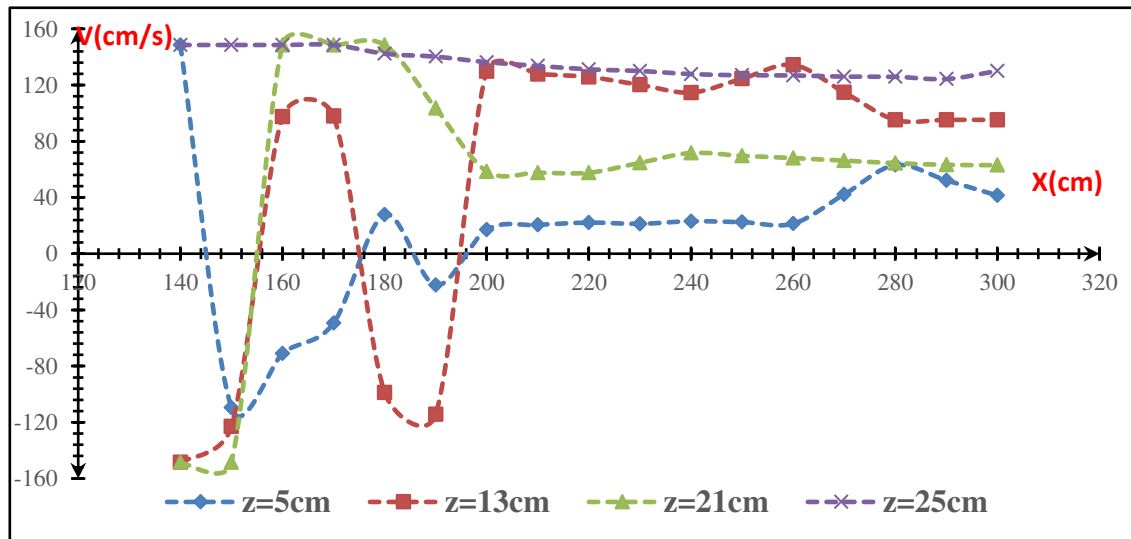


Figure 4.7: Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -8$ cm, pour différentes positions x_s (cm).

La zone qui se situe avons le premier seuil, enregistre toujours des grandes valeurs des vitesses avec des signes négatifs et positifs, puisque on est dans la zone du relou.

Après le premier seuil, en remarque que presque toutes les valeurs des vitesses sont positives est presque stables sur tous les plans en allons ver le deuxième seuil.

Tableau 4.6 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale

$$Y = +8\text{cm}$$

| y = +8 cm | | | | | | | | |
|-----------|---------|----------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| x | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 |
| h | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 |
| 5 | -148,53 | -110,395 | -72,26 | -74,174 | 76,09 | 66,45 | 56,82 | -40,43 |
| 13 | -148,53 | -124 | -99,46 | -79,3 | 95,76 | 96,33 | 97,94 | 94,96 |
| 21 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | -148,53 | 148,53 | 104,14 | 59,75 | 59,63 |
| 25 | -148,53 | -148,53 | 148,53 | 148,53 | 144,35 | -140,8 | 137,16 | 135,2 |
| 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 |
| -24,04 | 28,63 | 33,23 | 26,82 | 20,42 | 21,03 | 22,32 | 30,08 | 38,01 |
| 93,59 | 79,51 | 65,44 | 63,2 | 60,8 | 60,4 | 59,77 | 59,82 | 59 |
| 58,42 | 63,54 | 68,67 | 67,12 | 65,07 | 63,8 | 61,47 | 61,3 | 60,48 |
| 133,17 | 130,19 | 127,98 | 127 | 126,99 | 126,4 | 126 | 60,48 | 133,8 |

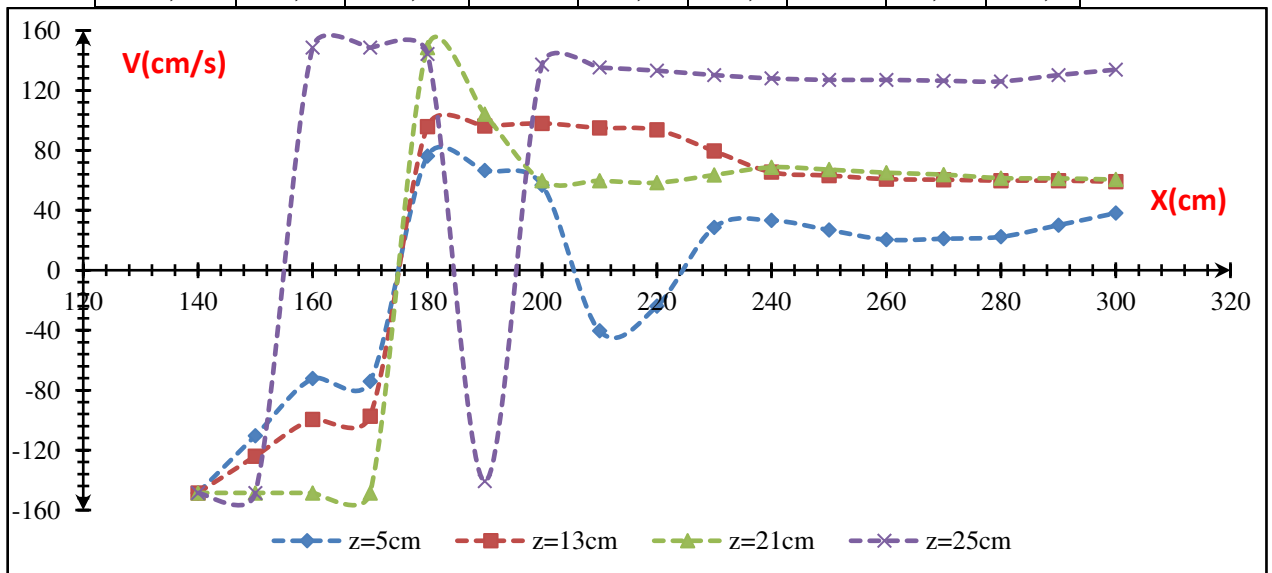


Figure 4.8 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=+8\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm).

Tableau 4.8 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale

| y=+11cm | | | | | | | | | | |
|---------|------|------|------|------|-----|------|------|------|--|--|
| x | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | | |
| h | | | | | | | | | | |
| 21 | -149 | -133 | 117 | -114 | 113 | 74,8 | 36,7 | 36 | | |
| 25 | -149 | -149 | 149 | 146 | 142 | 142 | 139 | 134 | | |
| | | | | | | | | | | |
| 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 | | |
| 35,7 | 47,2 | 58,7 | 56,9 | 55,1 | 53 | 51,5 | 51,4 | 51,4 | | |
| 128 | 127 | 127 | 126 | 126 | 126 | 125 | 118 | 115 | | |

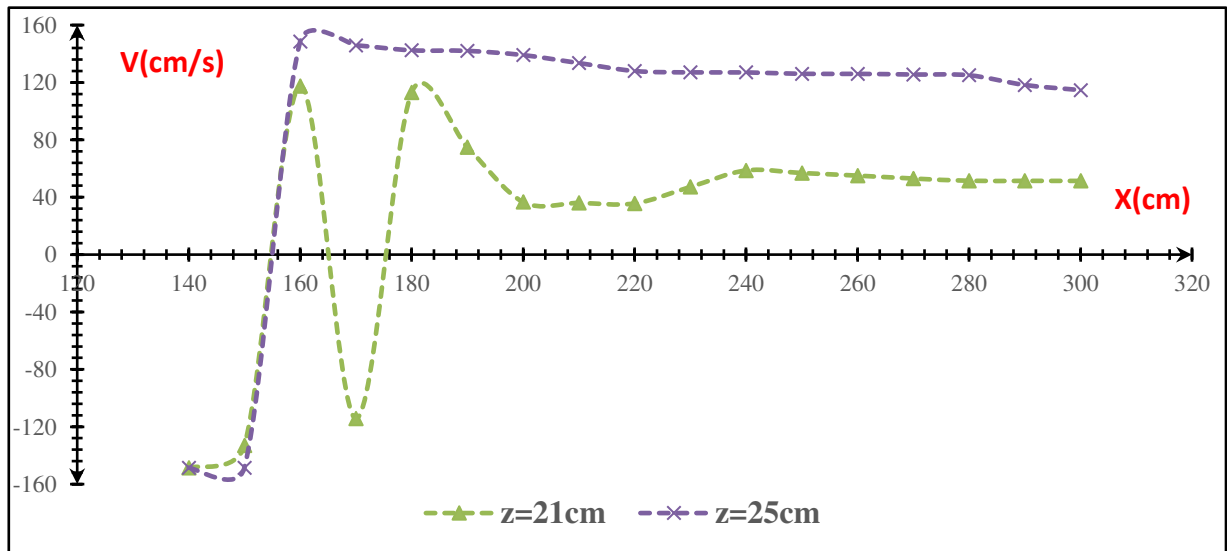


Figure 4.10 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=+11\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm).

Sur la figure 4.9 et le tableau 4.7, on remarque que les vitesses horizontales moyennes sont importantes et en position $x = 160$ jusqu'à 148 cm / sec , et elles diminuent significativement à 113 cm / sec avant le seuil $x = 180$ par rapport à la hauteur de 25 cm . La valeur maximale des vitesses

des rouleau de surface varie de 148 à cm / s. En haut, les vitesses maximales sont proches du mur et les plus faibles en surface.

IV.3.1.2 Distribution transversale des vitesses

Soit quelques sections transversales de l'écoulement dans notre configuration de ressaut, qui se situent dans différents positions x ; tel que $160\text{cm} < x < 300\text{cm}$, ces sections sont montrées dans des graphes ci-dessous.

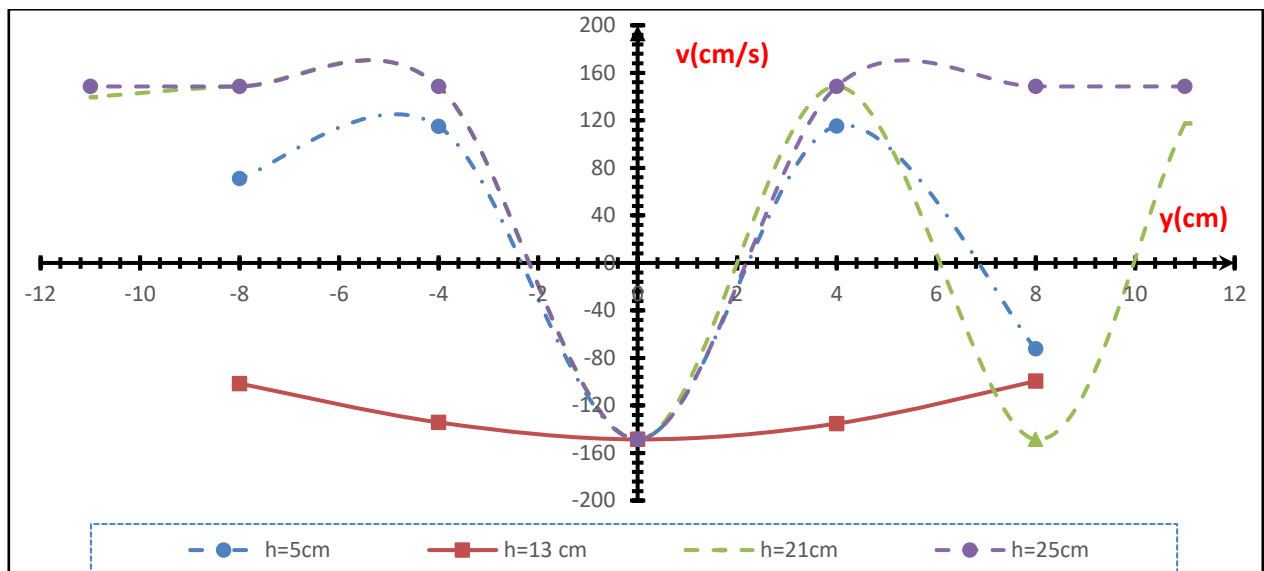


Figure 4.11 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 160\text{cm}$, pour différentes positions Y (cm), $F=10.08$, $x/L_b = 0,62$, $x < L_{s1}$.

Dans la figure 4.11, à $x=160\text{cm}$ en remarque dans toutes les profondeurs qu'ils y'a des valeurs de vitesse négatives maximale dans le centre du canal ($Y=0$). La même remarque (que les vitesses négative) est enregistrée pour la profondeur $h=13\text{cm}$. Dans les autres points (Y) pour tous les plans (h), l'écoulement est perturbé à cause du jet qui forme le rouleau, où les vitesses sont très élevées et sont presque tous portent le signe positif.

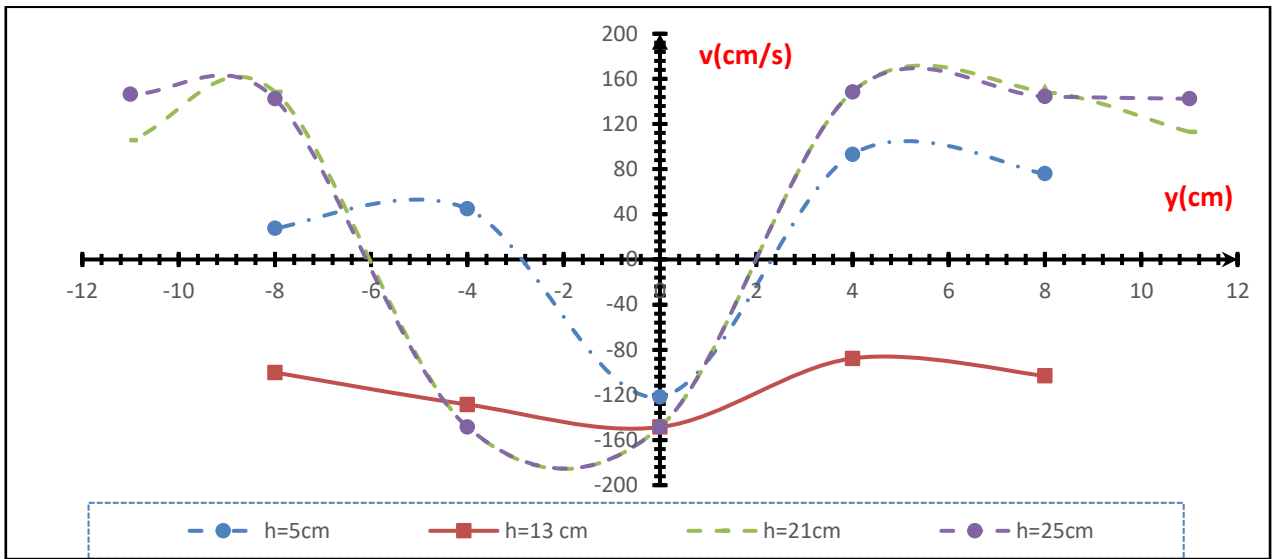


Figure 4.12 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 180$ cm, pour différentes positions Y (cm), $F=10.085$, $x/L_b = 0,71$, $x < L_{s1}$.

On remarque qu'il y a une concordance entre les deux figures 4.11 et 4.12 avec un léger changement dans quelques points. Cette congruence des courbes est due à la position proche des sections transversales du premier seuil.

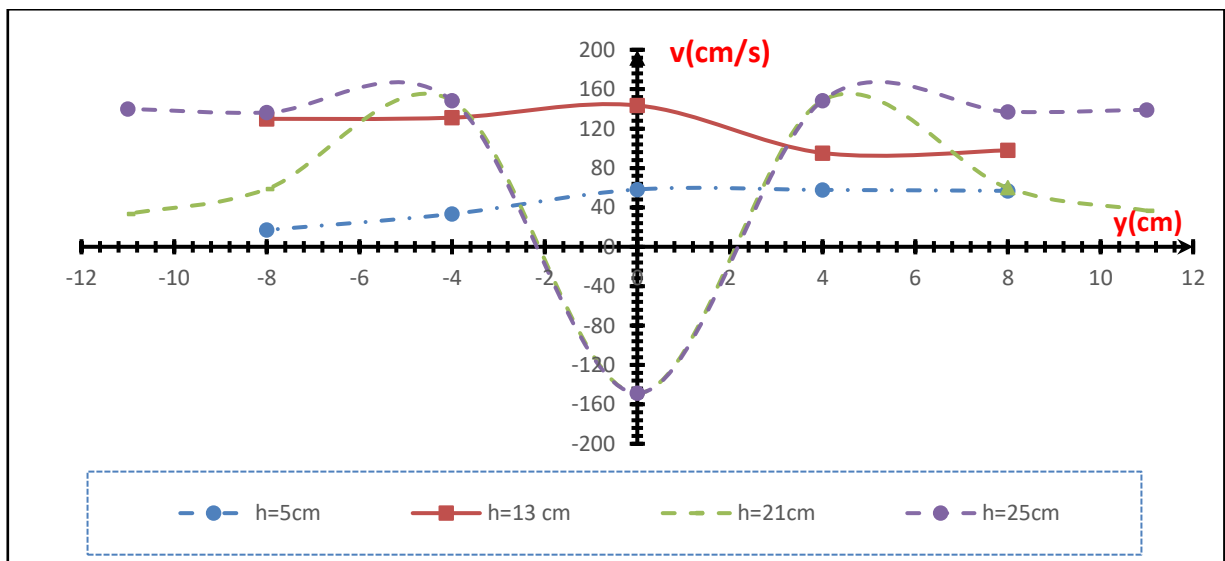


Figure 4.13 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 200$ cm, pour différents points Y (cm), $F=10.08$, $x/L_b = 0,79$, $x > L_{s1}$

La figure 4.13 montre la distribution des vitesses après le seuil, les vitesses enregistrent des valeurs moins que les autres sections précédentes dans le centre d'écoulement ($y = 0$ cm), et augmente également des deux côtés. Les vitesses les plus élevées sont situées près de la surface.

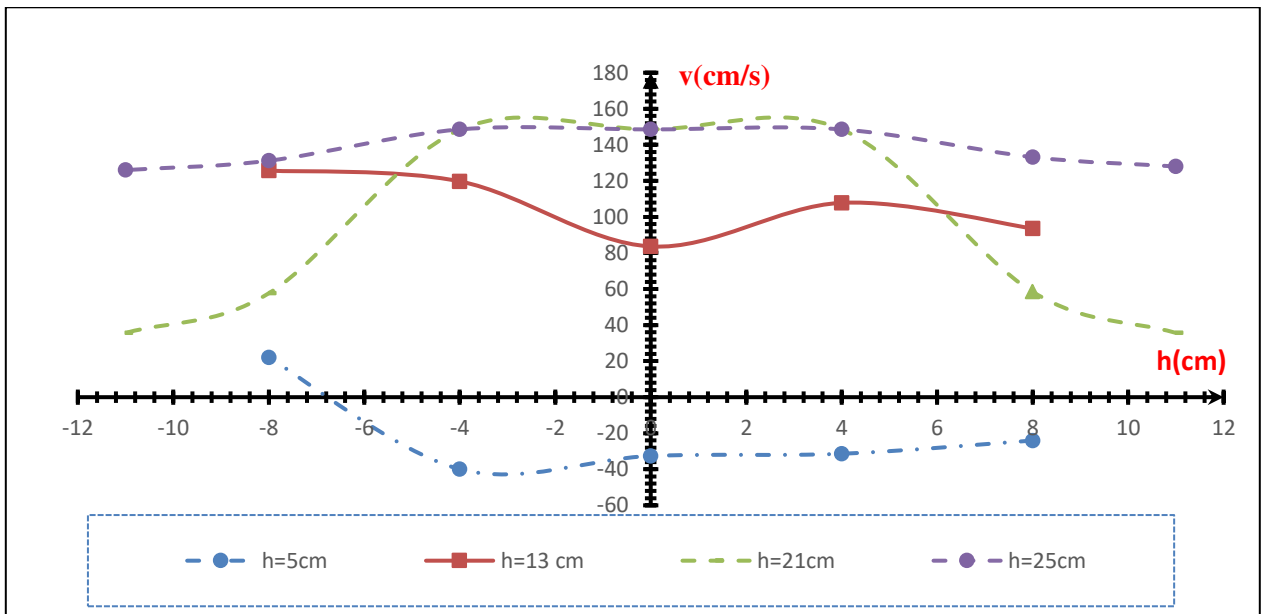


Figure 4.14 : $x = 220$ cm, $F=10.085$, $x/L_b = 0,85$, $x > L_{s1}$ Mêmes notations que la figure Figure 4.14

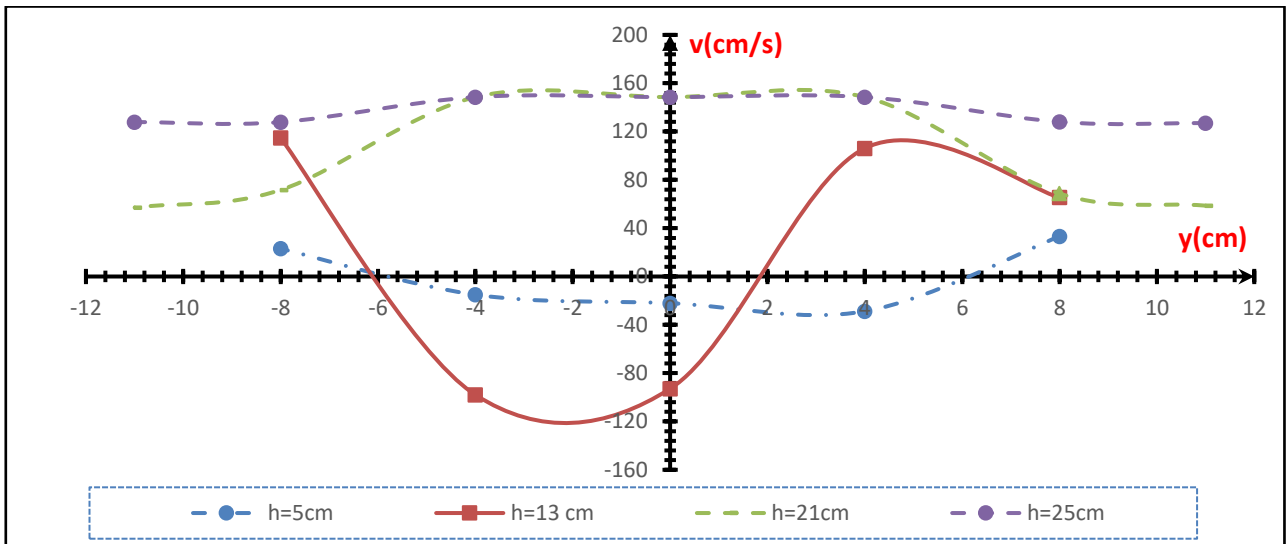


Figure 4.15 : $x = 240$ cm, $F=10.085$, $x/L_b = 0,93$, $x > L_{s1}$ Mêmes notations que la figure Figure 4.14.

La figure 4.15 montre les changements soudains qui se manifestent par l'augmentation de la vitesse dans les différents axes Y de la surface, comme s'il s'agissait d'une course pour atteindre le seuil. Le seuil impose des vitesses plus faibles au bas du canal par rapport à la surface où le rapport relatif $x / L_{s1} = 0,85$.

Dans la figure 4.16, toutes les vitesses observées dans la surface libre sont relativement plus élevées, tandis que les vitesses restent faibles au bas du canal où le rapport relatif $x / L_{s1} = 0,93$. Ces vitesses de surface forment une couche semi-uniforme dont la surface franchit le seuil.

On peut dire qu'après le seuil la vitesse diminue, les particules liquides formées du premier seuil atteignent la surface du fait de la résistance que le seuil impose à l'écoulement. Par conséquent, l'emplacement de chaque particule liquide se déplace du bas vers la surface libre, et la direction d'écoulement est toujours dans la direction aval, comme indiqué dans différentes sections transversales.

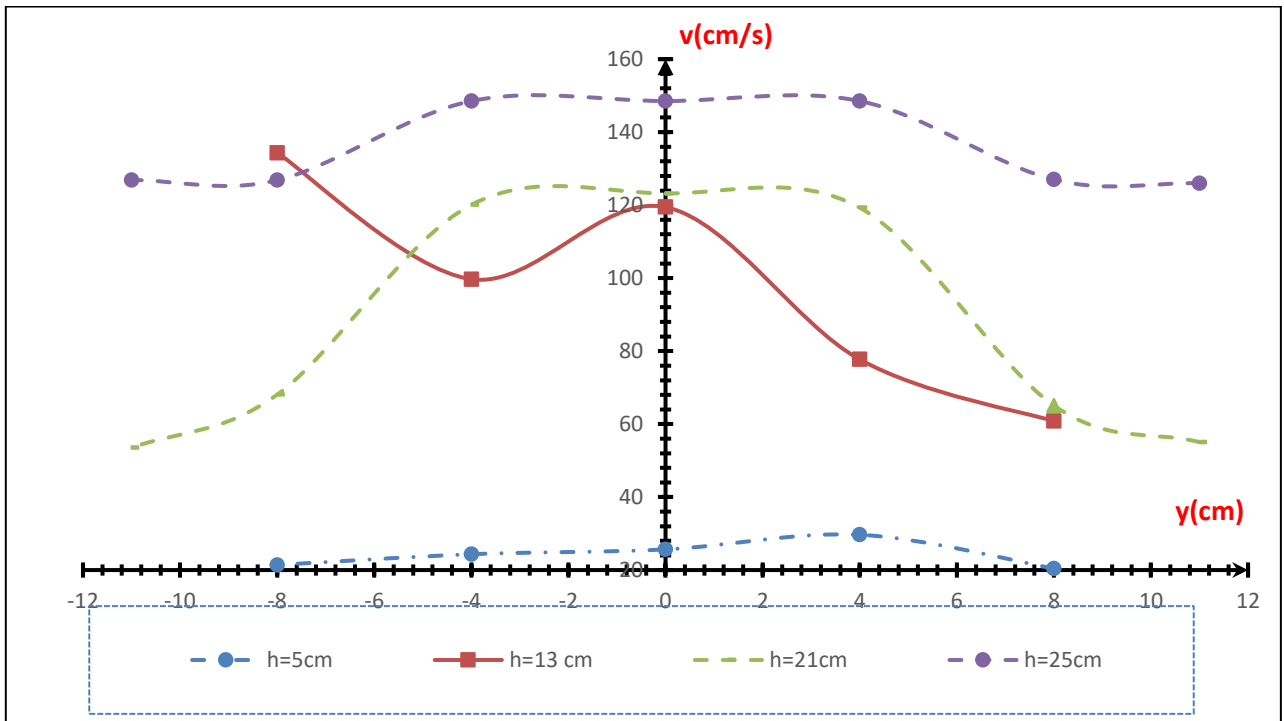


Figure 4.16 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 260$ cm, pour différentes positions Y (cm), $F=10.085$, $x/L_b = 1.007$, $x > L_{s1}$.

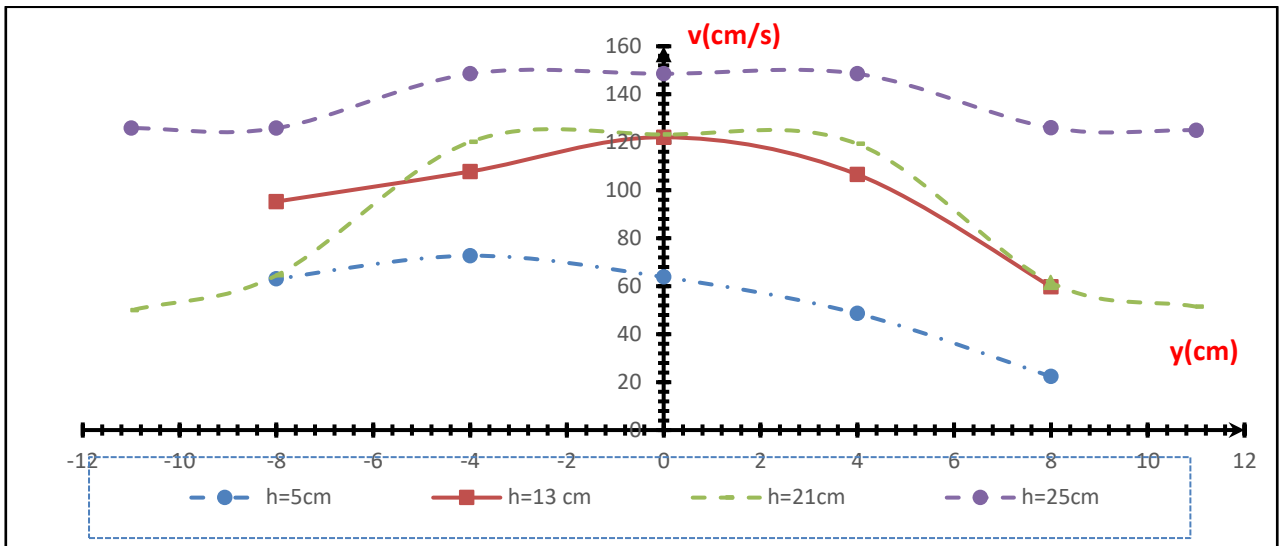


Figure 4.17 : $x = 280\text{cm}$, $F=10.085$, $x/Lb = 1.08$, $x > L_{s1}$ Mêmes notations que la figure Figure 4.16.

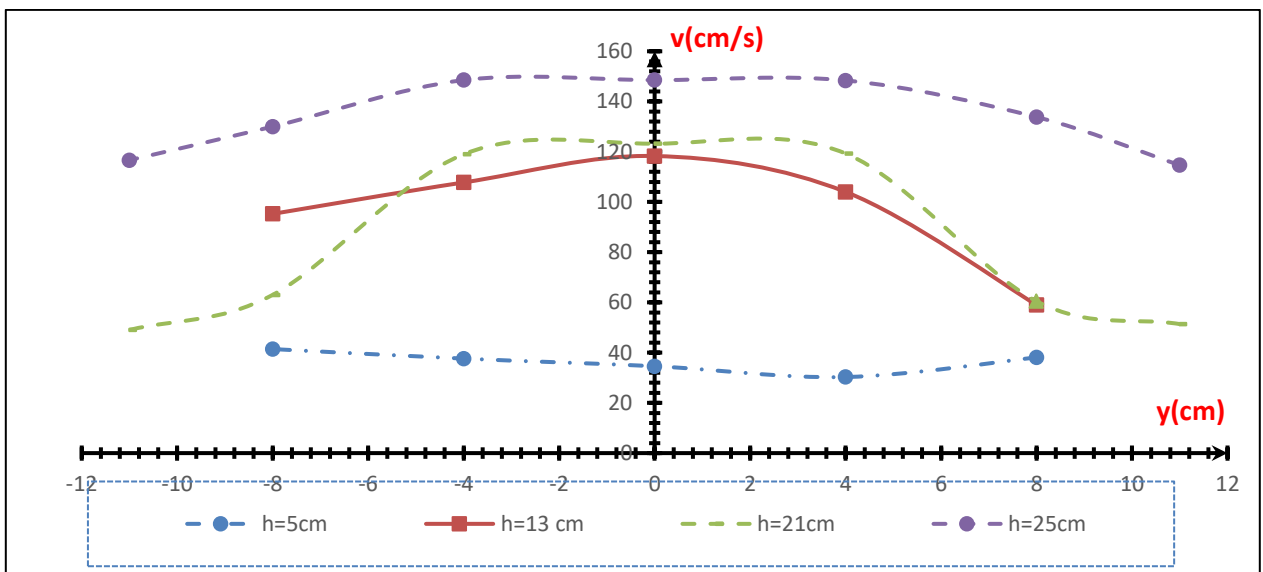


Figure 4.18 : $x = 300\text{cm}$, $F=10.085$, $x/Lb = 1.16$, $x > L_{s1}$; Mêmes notations que la figure Figure 4.16.

Les figures 4.16, 4.17, et 4.18 montrent que les vitesses sont devenues plus faibles dans les plans profonds par rapport à la surface. En éloignant du premier seuil, l'écoulement en général va se stabiliser.

IV.3.2 Deuxième essai

Pour le deuxième essai de nos expériences, nous avons utilisé un autre convergent de hauteur $h = 3\text{cm}$, c'est pour but de clarifier la distribution de vitesse dans notre canal, l'expérience a été réalisée dans les conditions indiquées ci-dessous dans le tableau 2.9

Tableau 2.9 : conditions et paramètres hydraulique respectif au deuxième essai.

| F_1 | Q (l/s) | H_d (cm) | S_1 (cm) | S_2 (cm) | h_1 (cm) | h_2 (cm) | L_{S1} (cm) | L_{S2} (cm) | L_B (cm) | L_{RF} (cm) |
|-------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|------------------|---------------|------------------|
| 6,91 | 27,26 | 16,1 | 9 | 15 | 3 | 28,8 | 185 | 427 | 237 | 52 |

IV.3.2.1 Distribution Longitudinale des vitesses

Tableau 4.10 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale

$Y = 0\text{ cm}$

| y = 0 cm | | | | | | | |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| X (cm) | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 |
| H (cm) | | | | | | | |
| 5 | 148 | -134,83 | -121,67 | -93,9 | -66,13 | -39,95 | 13,78 |
| 13 | 148 | -148,34 | -148,68 | -120,72 | -92,76 | -71,5 | -50,24 |
| 21 | 148 | -135,73 | -123,46 | -115,73 | 108,01 | 98,55 | 89,1 |
| 25 | 148 | -138,78 | -129,57 | -125,95 | 122,34 | 123,65 | 124,97 |
| | | | | | | | |
| | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 |
| | 10,11 | 6,45 | 6,4 | -6,45 | -6,45 | -6,45 | -6,45 |
| | -31,37 | 12,51 | 9,59 | 6,67 | 6,65 | 6,6 | 6,39 |
| | 67,52 | 45,95 | 36,85 | 27,76 | 20,6 | 13,44 | 12,37 |
| | 124,11 | 123,26 | 102,66 | 82,06 | -78,39 | -74,72 | -73,06 |
| | | | | | | | 71,4 |

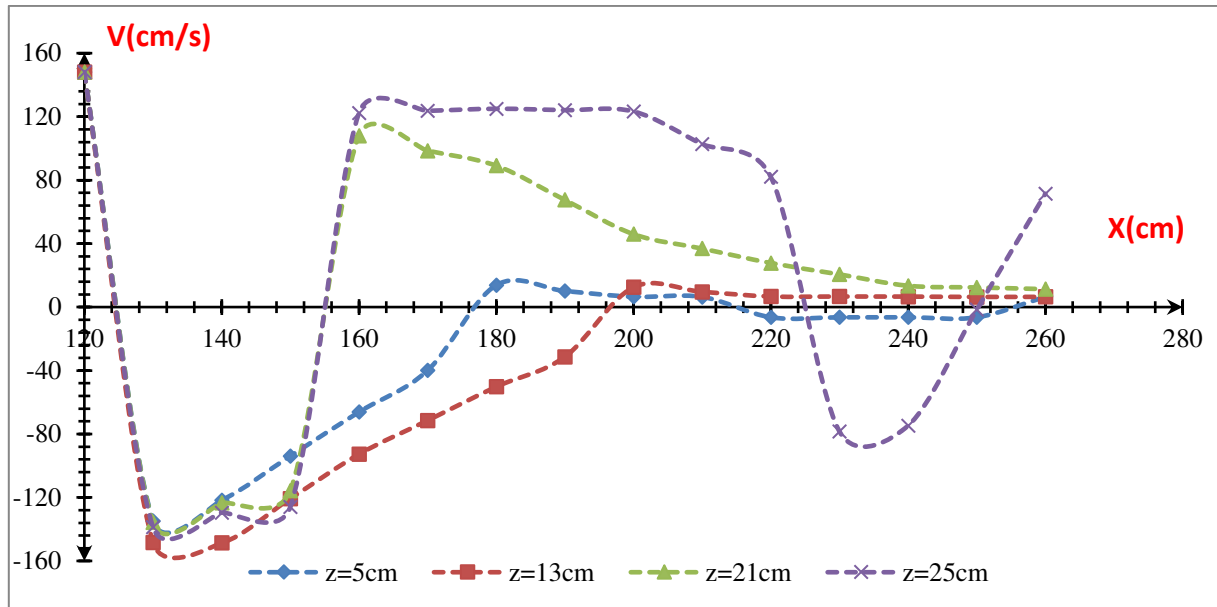


Figure 4.18 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=0\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm).

Les figures 4.18, 4.19 et 4.20 qui représentent les profils longitudinaux $Y=0$, $Y=+4$, $Y=-4$ montrent une similitude des résultats obtenus dans la première expérience, et comme nous avons indiquée dans le terme des répartitions générale de vitesse, où l'on note que la vitesse constatée est maximale au début du ressaut dans le fond du canal. La vitesse en surface est aussi avec des valeurs importantes.

Lorsque la direction est vers l'aval, toutes les vitesses sont en diminution de chaque section longitudinale.

On constat qu'il y a des valeurs de vitesses négative et positives qu'on représente la direction de l'écoulement.

Tableau 4.11 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale

Y = -4cm

| y = -4cm | | | | | | | |
|----------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|
| X(cm) | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 |
| h (cm) | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 |
| 5 | 148 | -127,33 | -107,38 | 79 | -49,9 | 32,11 | 13,34 |
| 13 | -148 | -148 | -148 | -122 | 96,33 | 75 | 52,49 |
| 21 | -148 | -140,25 | -132,24 | 125 | -113,29 | 90,22 | 74,09 |
| 25 | -148 | 142,66 | 137,44 | 131,88 | 126,93 | 130,33 | 136,46 |
| 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 |
| 10,44 | -6,45 | -6,45 | -6,45 | -6,45 | 6,45 | 6,45 | 6,45 |
| 30 | -10,7 | -10,22 | -6,45 | -6,45 | -6,45 | -6,45 | 6,45 |
| 62,55 | 50,22 | 42,12 | 33,62 | 24,66 | 15,47 | 14,57 | 13,2 |
| 130,88 | 132,31 | -114,15 | -96,38 | 90,22 | 88,4 | 87,33 | 85 |

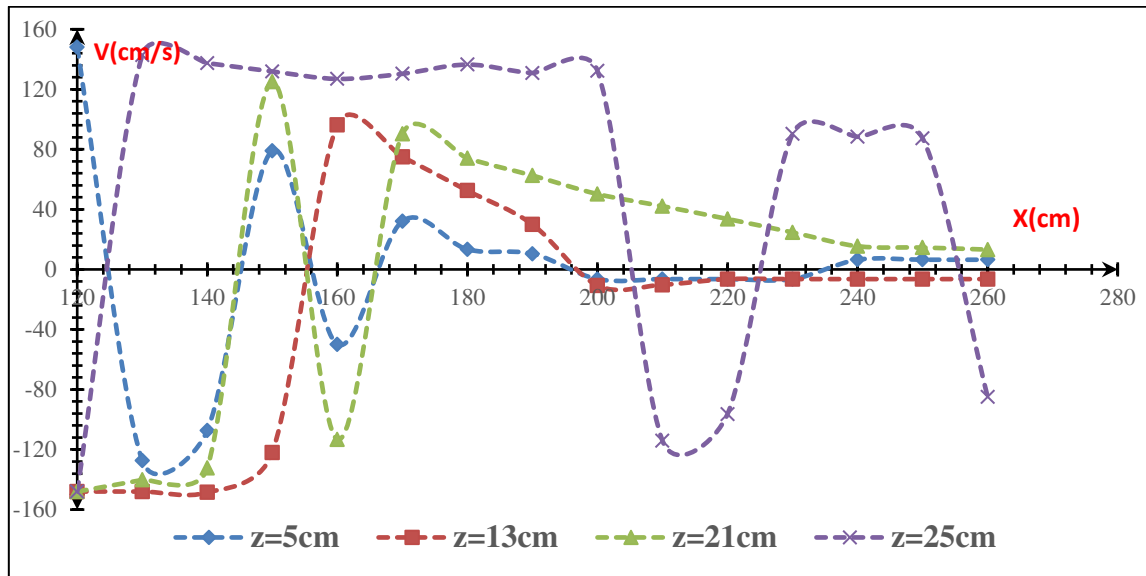


Figure 4.19 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=-4\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)

Tableau 4.12 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale

$Y = 4\text{cm}$

| y = +4cm | | | | | | | |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| X(cm) | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 |
| h (cm) | | | | | | | |
| 5 | 148 | -123,75 | -99,51 | -70 | 40,22 | 24,3 | -8,21 |
| 13 | -148 | -132,5 | -115,49 | -110,01 | 82,79 | 64,22 | -45,89 |
| 21 | -148 | -132,5 | -116,32 | 124,22 | 11,68 | 90,22 | -65,49 |
| 25 | -148 | -143,12 | 138,12 | 130,12 | 122,81 | 129,23 | 132,78 |
| 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 |
| 8,65 | -6,45 | -6,45 | -6,45 | -6,45 | -6,45 | 6,45 | 6,45 |
| -30 | -14,27 | 13,55 | 10,75 | 10,75 | 10,75 | 10,75 | 10,75 |
| 56,41 | -46,28 | 37,65 | 27,76 | 22,22 | 16,12 | 15,98 | 15 |
| -124,5 | -117,79 | 132,55 | 145,03 | -110,5 | -76,1 | 74,33 | -73 |

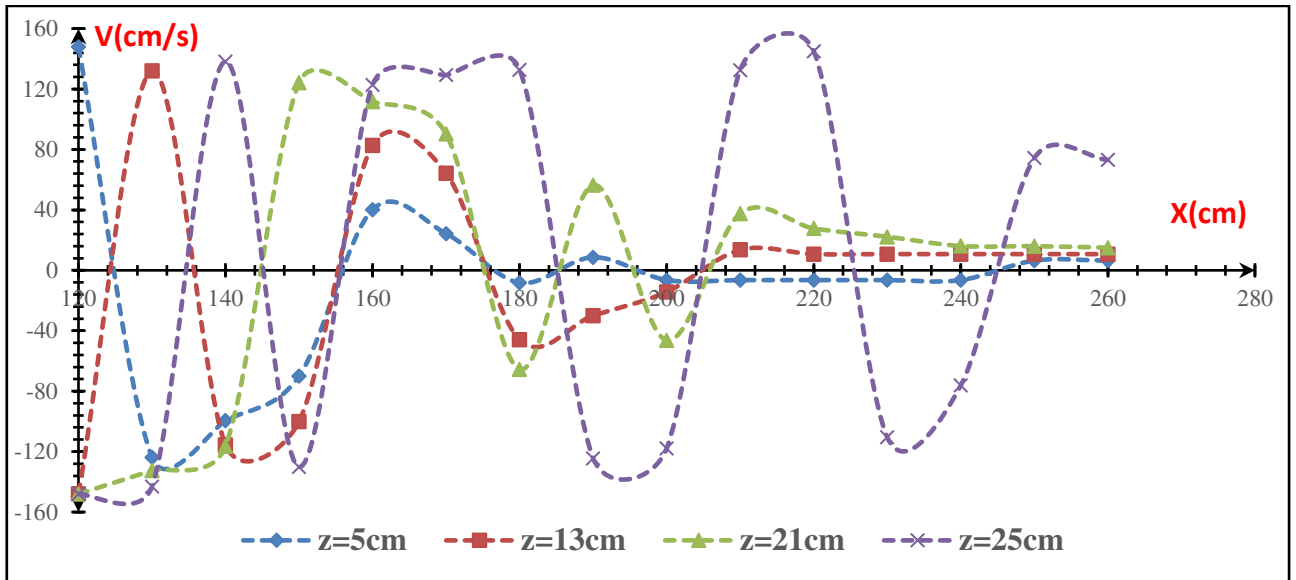


Figure 4.20 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=4\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm).

Tableau 4.13 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale

$Y = -8\text{cm}$

| y = -8cm | | | | | | | |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| X (cm) | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 |
| h (cm) | | | | | | | |
| 5 | 148 | -134,08 | -120,17 | -80,07 | -39,98 | 26,56 | 13,14 |
| 13 | 148 | 145,72 | 143,45 | 107,42 | 71,4 | 53,34 | 35,28 |
| 21 | 148 | 100,34 | -52,69 | -54,03 | -55,37 | -59,21 | 63,06 |
| 25 | 148 | 148 | 148 | 137,88 | 127,23 | 133,63 | 140,03 |

| 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 9,79 | -6,45 | -6,45 | -6,45 | -6,45 | -6,45 | 6,45 | 6,45 |
| 23,87 | 12,46 | 9,12 | -6,3 | -6,3 | -6,3 | -6,3 | 6,3 |
| 53,52 | -43,99 | -29,25 | 14,51 | 13,01 | 11,44 | 11,29 | |
| 142,02 | 144,06 | 107,12 | 70,18 | 83,71 | 97,25 | 96,62 | |

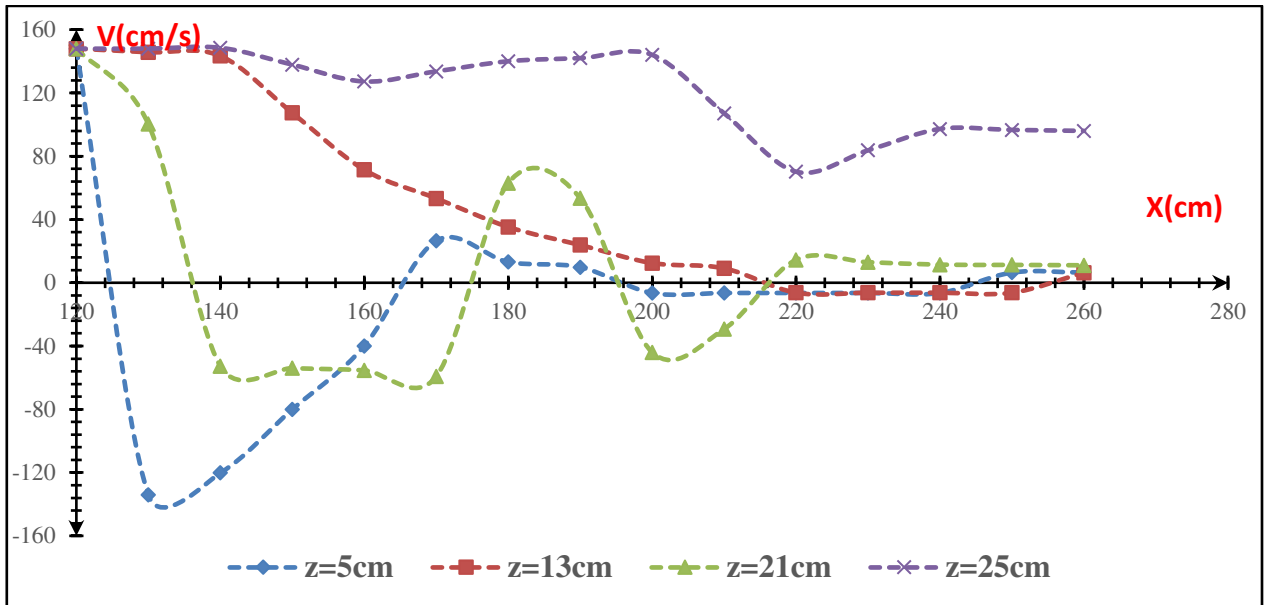


Figure 4.21 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -8$ cm, pour différentes positions x_s (cm).

Tableau 4.14 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale

$Y = +8$ cm

| y = +8 cm | | | | | | | |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| X(cm) | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 |
| h (cm) | | | | | | | |
| 5 | 115,02 | -81,3 | -47,03 | 39,02 | -31,33 | 22,21 | -13,09 |
| 13 | 148 | -103,11 | -58,22 | -90,35 | 66,42 | -49,33 | -32,25 |
| 21 | 148 | 121,71 | 94,74 | 84,6 | 74,44 | -58,94 | -43,25 |
| 25 | 148 | -140,3 | -132,44 | -120 | 106,92 | 106,53 | 106,14 |
| 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 |
| 9,8 | 6,5 | -6,5 | -6,5 | -6,5 | 6,5 | 6,5 | 6,5 |
| -22,35 | 11,82 | 10 | 9,16 | -8,9 | -8,16 | -7,66 | -7,16 |
| -35,31 | -27,37 | 20,46 | 13,54 | 16,5 | 19,45 | 18,99 | 18,45 |
| -110,6 | -115,01 | 130,02 | 144,73 | 105,98 | 67,21 | 66,15 | 65,1 |

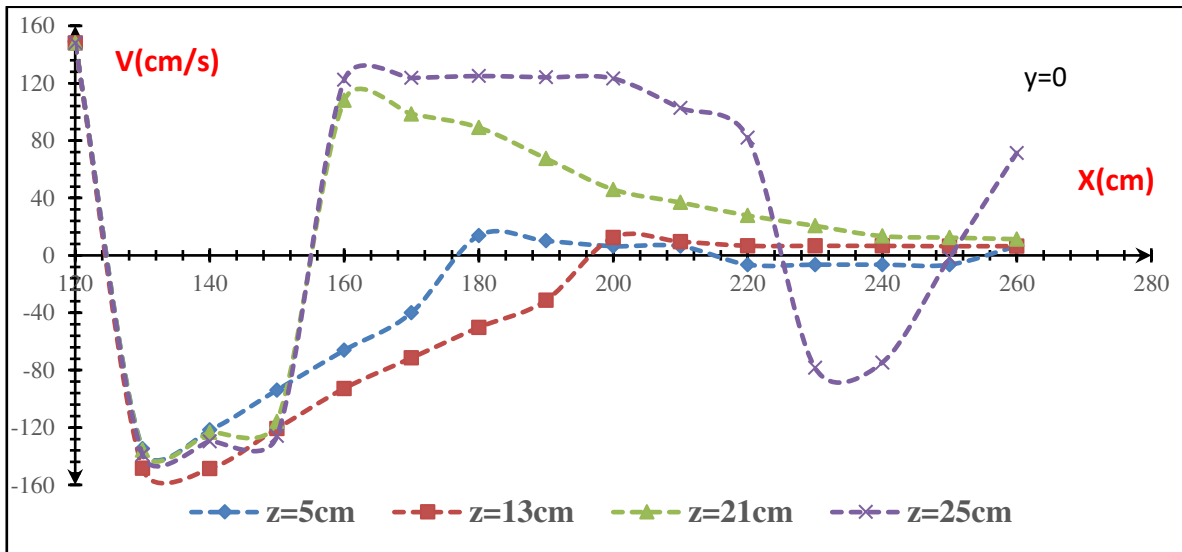


Figure 4.22 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=+8$ cm, pour différentes positions x_s (cm).

La figure 4.21 et 4.22 montrent qu'en haut de la section longitudinale $y = -8$ cm et $+8$ cm, les vitesses horizontales moyennes sont légèrement inférieures à la section précédente et cela est dû au frottement avec les parois du canal. Après le seuil, les vitesses diminuent légèrement puis maintiennent un écoulement presque uniforme. Toujours en remarque la présence des valeurs de vitesse négative dans quelque point de nos profils.

Tableau 4.15: Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale

$Y = -11$ cm

| y = -11 cm | | | | | | | |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| X (cm) | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 |
| h (cm) | | | | | | | |
| 21 | 148 | 143,67 | 139,34 | 96,13 | -52,93 | -37,7 | 22,48 |
| 25 | 148 | 145,6 | 143,11 | 116,76 | 90,42 | -105,96 | -121,5 |
| 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 |
| 18,27 | 14,07 | 18,09 | 22,11 | 18,79 | 15,47 | 15,23 | 14,99 |
| -125,82 | 130,15 | 95,59 | 61,04 | 63,75 | -66,46 | -66,46 | -66,46 |

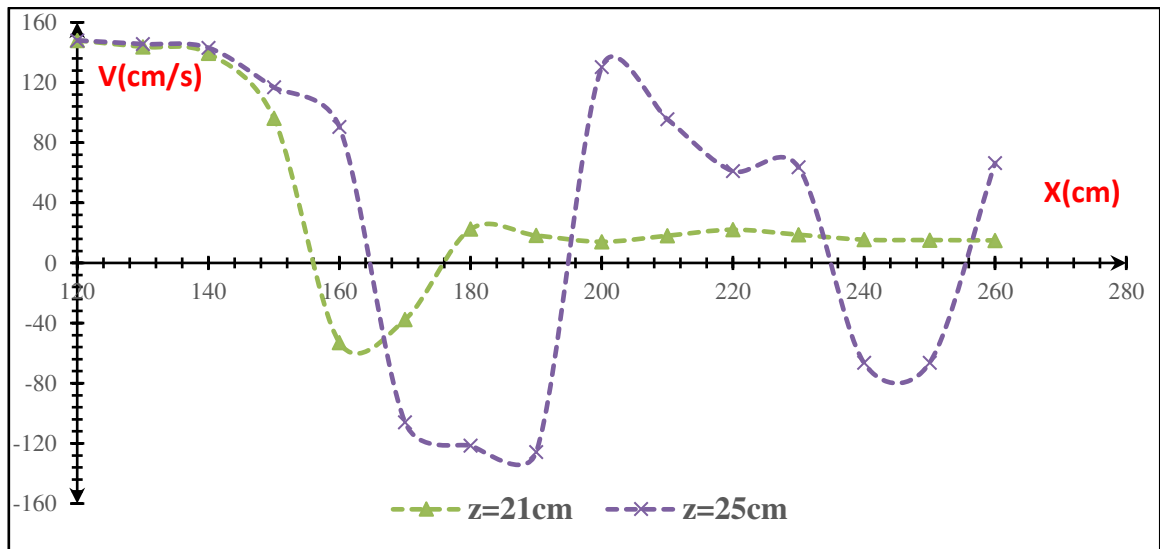


Figure 4.23 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=-11\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm).

Tableau 4.16 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale

$Y = 11\text{cm}$

| y = +11 cm | | | | | | | |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| X (cm) | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 |
| h (cm) | | | | | | | |
| 21 | 148 | -103,72 | -59,44 | -46,53 | 33,62 | 22,01 | 10,41 |
| 25 | 148 | -106,23 | -64,46 | 59,2 | 53,96 | 66,91 | 79,86 |
| 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 |
| 15,59 | 20,77 | -19,15 | -17,54 | -17,54 | -17,54 | 13,32 | 9,1 |
| 74,14 | 68,43 | 104,91 | 141,39 | 141,39 | 141,39 | 92,2 | 43,01 |

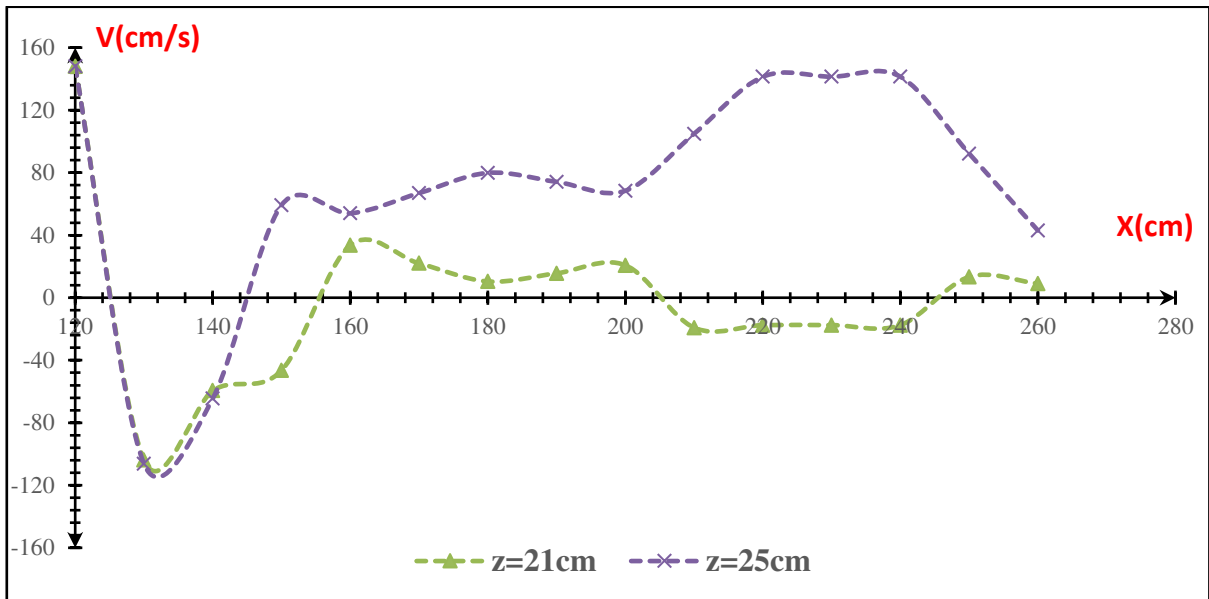


Figure 4.24 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=11$ cm, pour différentes positions x_s (cm).

La figure 4.23 et 4.24 illustrent qu'au en haut du canal la section longitudinale dans la surface de l'écoulement $Y = -11$ cm, les vitesses horizontales moyennes sont légèrement plus grandes que la section précédente et sont les plus grandes vitesses enregistrées dans cette section. Au-delà du premier seuil, les vitesses diminuent légèrement puis maintiennent un écoulement presque stable.

IV.3.2.2 Distribution transversale des vitesses

Soit quelques sections transversales de l'écoulement dans notre configuration de ressaut, qui se situent dans différents positions x ; tel que $140\text{cm} < x < 260\text{cm}$, ces sections sont montrées dans des graphes ci-dessous.

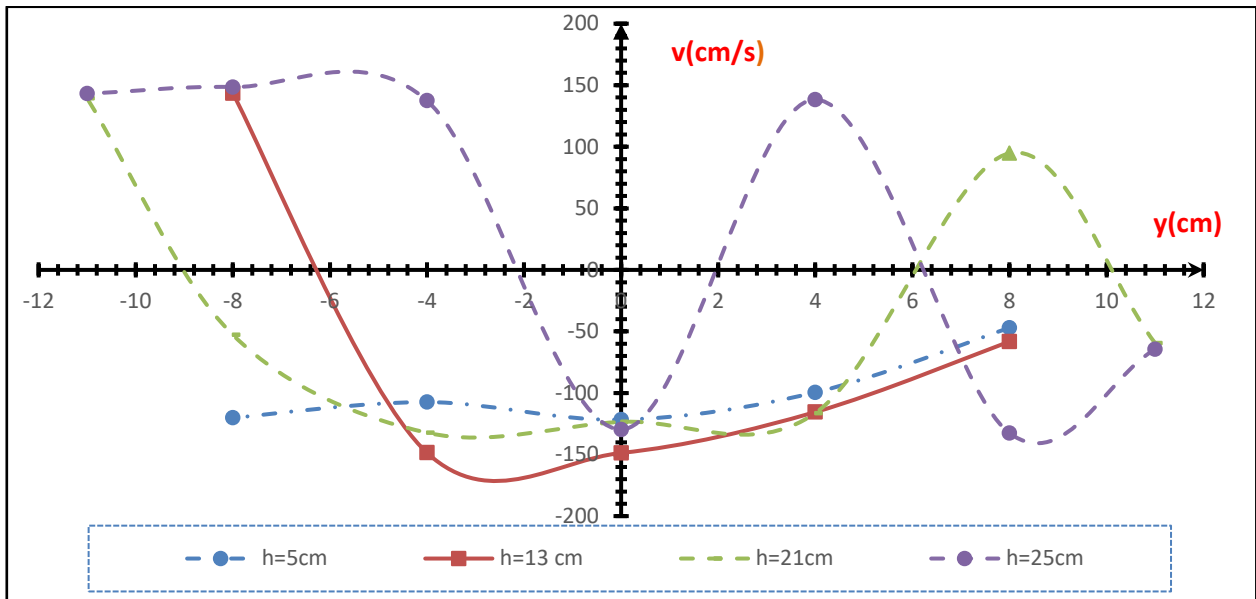


Figure 4.25 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 140\text{cm}$, pour différentes positions Y (cm), $F=6.91$, $x < L_{s1}$, $x/L_b = 0.59$.

La figure 4.25 montre que les vitesses sont très élevées en bas et atteignent une valeur maximale de 300 cm/s . Comme nous l'avons déterminé précédemment, cette région d'écoulement correspond le jet provenant au convergent. Ce jet non turbulent devient faible lorsque l'on se déplace vers l'aval jusqu'à la section $x = 185\text{ cm}$.

Les vitesses horizontales moyennes passent de la valeur maximale au fond à la valeur minimale en surface. Les valeurs de vitesse négatives et positives maximales de centre sont diminuées en approchant aux parois du canal.

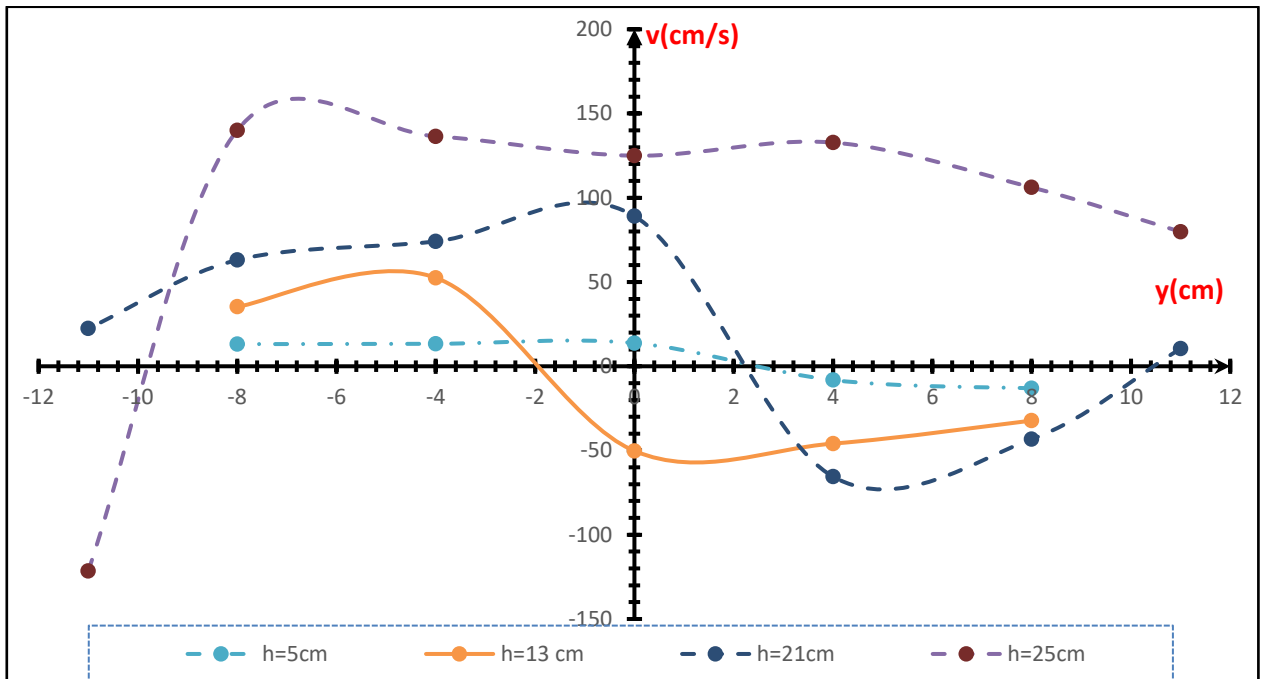


Figure 4.26 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 180$ cm, pour différentes positions Y (cm), $F=6.91$, $x < L_{s1}$, $x/L_b = 0.76$.

La figure 4.26 montre qu'approchant le premier seuil, il y a une diminution d'ondulation des courbes ce qui explique une diminution de turbulence du ressaut (les vitesses va se stabilisent).

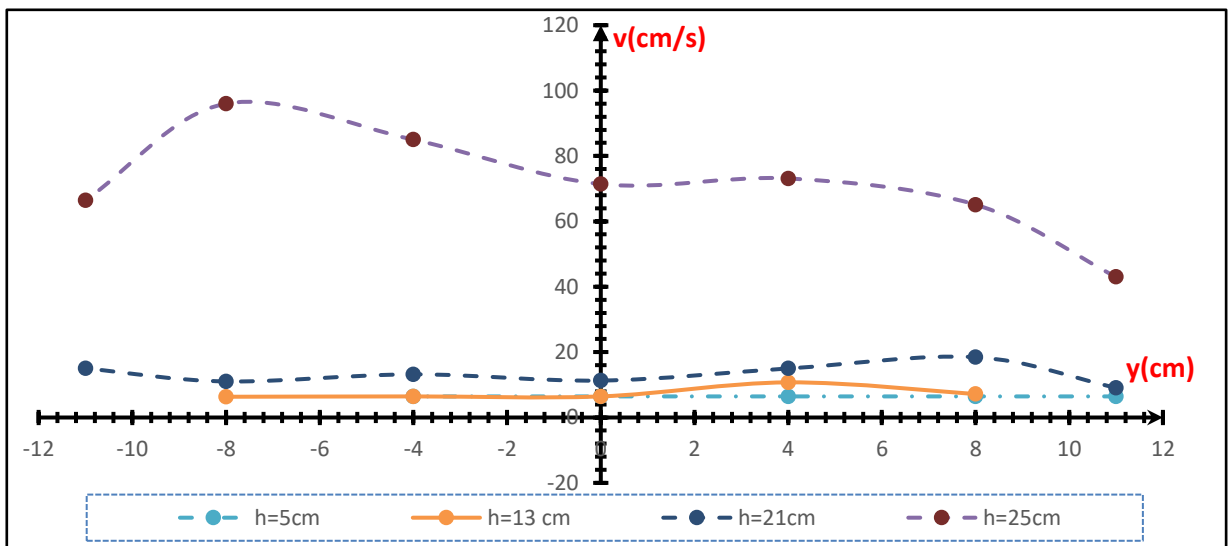


Figure 4.27 : $x = 260$ cm, $F=6.91$, $x > L_{s1}$, $x/L_b = 1.1$ Mêmes notations que la figure 4.29.

La figure 4.27 montre que ; si en éloignant a le premier seuil, et après le rouleau de fond une grande stabilité de l'écoulement a été enregistré dans presque tous les plans, sauf à $h=25\text{cm}$ c'est la couche superficielle de cet écoulement qui enregistre une légère perturbation. Les vitesses enregistrées sont presque tous faible sauf au niveau de la couche superficielle ($h=25\text{cm}$) de notre configuration du ressaut.

IV.3.3 Récapitulation

À travers notre analyse des résultats expérimentaux, qui ont été présenté, nous pouvons distinguer les observations suivantes :

- On observe un jet à grande vitesse ($V > 300 \text{ cm/s}$) dans la zone amont de notre configuration du ressaut, ce jet diminue lorsque le sens d'écoulement est ver aval.
- Nous enregistrons des vitesses maximales au centre du canal, contrairement de celle-ci, et à l'approche des parois du canal avant et après le premier seuil, nous enregistrons des vitesses élevées.
- À une hauteur de 25 cm au-delà du seuil, et contrairement à la partie amont du ressaut, l'intensité des vitesses est minimale au centre de l'écoulement ($y=0\text{cm}$) et augmente d'un seul part de celui-ci.
- Les vitesses négatives sont enregistrées avant et après le seuil dans une zone de $x = 160$ à 254 cm .
- Près au premier seuil ($x = 180 \text{ cm}$), les particules d'eau au bas du canal tentent de prendre une direction vers la surface afin de joindre les autres particules au-dessus d'elle qui s'élèvent au-dessus du seuil. Ce phénomène peut être appelé, la compétition des particules au libération ver la surface. Certaines de ces particules entrent en collision avec des courants de fond opposés à l'écoulement, de sorte que leur signal est souvent confondu avec leur petite valeur, que nous considérons comme une valeur positive.

IV.4 La relation entre les vitesses relatives et la position relative x/L_b

La vitesse de l'eau au fond du chenal V_f lors d'un ressaut hydraulique est particulièrement importante dans une rivière à fond mouvant. Si ses vitesses sont trop élevées, de graves dommages peuvent survenir en raison de la corrosion. Dans ce chapitre, nous essaierons de trouver la relation entre les vitesses relatives (V_f/V_1 et V_s/V_1) et la position relative x/L_b dans notre configuration du ressaut hydraulique.

Les relations qui nous seront discutées dans ce travail sont :

- L'axe $Y = 0$ cm du centre de canal.
- Les axes Y (cm) = -8, +8, -11, +11, représentent la variation de vitesse dans les côtés 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.

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 relatives x/L_b .

Avec :

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

IV.4.2 Premier essai

Pour la première expérience ; Nous considérons la hauteur du fond du canal $h = 5$ cm et la couche supérieure de l'écoulement à la surface $h = 25$ cm. La vitesse dans la section initiale est $V_1 = 536$ cm / s, et la longueur de ressaut $L_b = 254$ cm, avec nombre de Froude $F_1 = 6.9$

Mesures expérimentales des vitesses moyennes relative pour $Y = 0$ cm

Tableau 4.17 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x.

| Y=0 | X (cm) | ZF (cm) | ZS (cm) | VF (cm/s) | VS (cm/s) | VF/V1 | VS/V1 | X/Lb |
|-----|--------|---------|---------|-----------|-----------|-------|-------|------|
| | 140 | 5 | 25 | 148,53 | 148,53 | 0,28 | 0,28 | 0,55 |
| | 150 | 5 | 25 | -148,39 | 148,53 | 0,28 | 0,28 | 0,59 |
| | 160 | 5 | 25 | -148,39 | 148,53 | 0,28 | 0,28 | 0,63 |
| | 170 | 5 | 25 | -135,07 | 148,53 | 0,25 | 0,28 | 0,67 |
| | 180 | 5 | 25 | -121,75 | 152,34 | 0,23 | 0,28 | 0,71 |
| | 190 | 5 | 25 | -89,955 | 145,2 | 0,17 | 0,27 | 0,75 |
| | 200 | 5 | 25 | 58,16 | 146,28 | 0,11 | 0,27 | 0,79 |
| | 210 | 5 | 25 | -45,38 | 143,68 | 0,08 | 0,27 | 0,83 |
| | 220 | 5 | 25 | -32,6 | 143,99 | 0,06 | 0,27 | 0,87 |
| | 230 | 5 | 25 | 27,3 | 135 | 0,05 | 0,25 | 0,91 |
| | 240 | 5 | 25 | -22,09 | 129,82 | 0,04 | 0,24 | 0,94 |
| | 250 | 5 | 25 | 24,01 | 128 | 0,04 | 0,24 | 0,98 |
| | 260 | 5 | 25 | 25,66 | 126,83 | 0,05 | 0,24 | 1,02 |
| | 270 | 5 | 25 | 44,72 | 126 | 0,08 | 0,24 | 1,06 |
| | 280 | 5 | 25 | 63,78 | 124,84 | 0,12 | 0,23 | 1,10 |
| | 290 | 5 | 25 | 49,19 | 122,3 | 0,09 | 0,23 | 1,14 |
| | 300 | 5 | 25 | 34,6 | 133 | 0,06 | 0,25 | 1,18 |

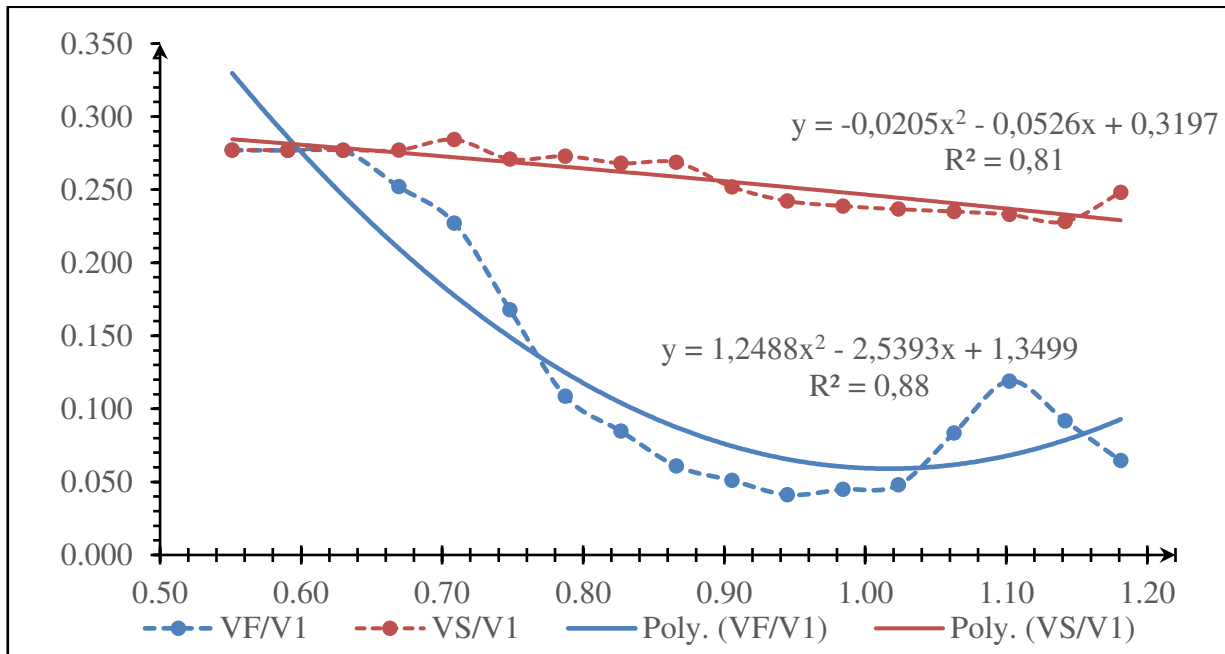


Figure 4.28 Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V_f/V_1) en fonction de la position relative x/L_b pour $Y=0$

La figure 4.28 et le tableau 4.17 montrent que les rapports de vitesse relative V_f / V_1 et V_s / V_1 expriment clairement un nuage dense. On remarque que les vitesses relatives de fond sont inférieures aux vitesses relatives de la surface.

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_b avec un coefficient de corrélation R^2 très élevé, ce qui signifie une bonne relation entre la vitesse relative et la position relative.

Pour la vitesse relative au fond V_f/V_1 on a :

$$Y = 1,2488 \cdot x^2 - 2,5393 \cdot x + 1,3499, \quad R^2 = 0,88 \quad (4.2)$$

Pour la vitesse relative de la surface V_s/V_1 on a :

$$Y = -0,0205 \cdot x^2 - 0,0526 \cdot x + 0,3197, \quad R^2 = 0,81 \quad (4.3)$$

➤ Pour Y = +8cm et -8cm

Tableau 4.18 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x.

| Y= (8cm) | X (cm) | Z1 (cm) | Z4 (cm) | Vf (cm/s) | VS (cm/s) | VF/V1 | VS/V1 | X/LB |
|-------------|-----------|------------|------------|--------------|--------------|-------|-------|------|
| | 140 | 5 | 25 | -148,53 | -148,53 | 0,28 | 0,28 | 0,55 |
| | 150 | 5 | 25 | -110,4 | -148,53 | 0,21 | 0,28 | 0,59 |
| | 160 | 5 | 25 | -72,26 | 148,53 | 0,13 | 0,28 | 0,63 |
| | 170 | 5 | 25 | -74,175 | 148,53 | 0,14 | 0,28 | 0,67 |
| | 180 | 5 | 25 | 76,09 | 144,35 | 0,14 | 0,27 | 0,71 |
| | 190 | 5 | 25 | 66,455 | -140,755 | 0,12 | 0,26 | 0,75 |
| | 200 | 5 | 25 | 56,82 | 137,16 | 0,11 | 0,26 | 0,79 |
| | 210 | 5 | 25 | -40,43 | 135,2 | 0,08 | 0,25 | 0,83 |
| | 220 | 5 | 25 | -24,04 | 133,17 | 0,04 | 0,25 | 0,87 |
| | 230 | 5 | 25 | 28,635 | 130,19 | 0,05 | 0,24 | 0,91 |
| | 240 | 5 | 25 | 33,23 | 127,98 | 0,06 | 0,24 | 0,94 |
| | 250 | 5 | 25 | 26,825 | 127 | 0,05 | 0,24 | 0,98 |
| | 260 | 5 | 25 | 20,42 | 126,99 | 0,04 | 0,24 | 1,02 |
| | 270 | 5 | 25 | 21,03 | 126,4 | 0,04 | 0,24 | 1,06 |
| | 280 | 5 | 25 | 22,32 | 126 | 0,04 | 0,24 | 1,10 |
| | 290 | 5 | 25 | 30,08 | 130,19 | 0,06 | 0,24 | 1,14 |
| | 300 | 5 | 25 | 38,1 | 133,8 | 0,07 | 0,25 | 1,18 |

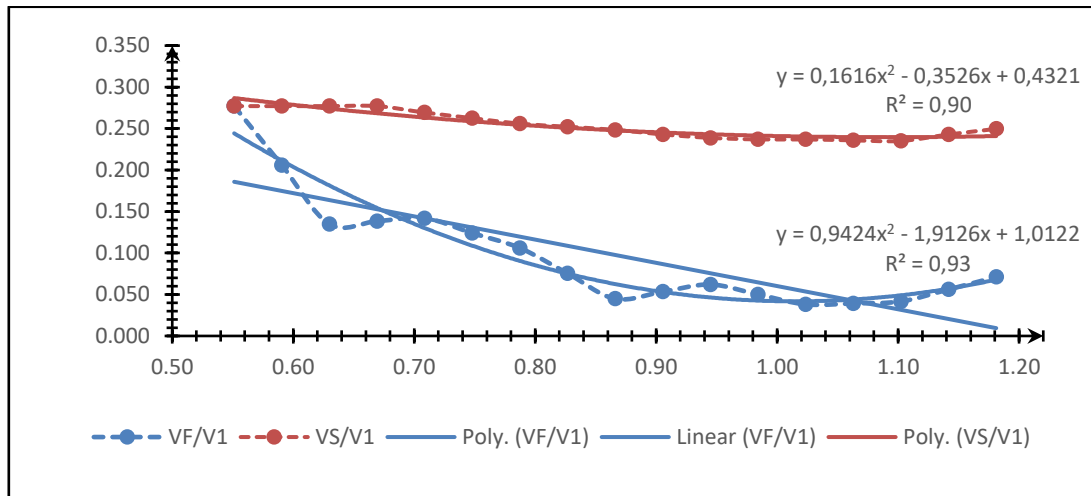


Figure 4.29 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (VF/V1) en fonction de la position relative x/Lb pour Y=+8

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

Y= +8cm :

La vitesse relative au fond V_f/V_1 on a ;

$$Y = 0,1616*x^2 - 0,3526*x + 0,4321 \quad R^2 = 0,93 \quad (4.4)$$

La vitesse relative de la surface V_s/V_1 :

$$Y = 0,9424*x^2 - 1,9126*x + 1,0122 \quad R^2 = 0,90 \quad (4.5)$$

Tableau 4.19 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x.

| Y=-8 (cm) | X (cm) | Z1 (cm) | z4 (cm) | Vf (cm/s) | vs (cm/s) | VF/V1 | VS/V1 | X/LB |
|--------------|-----------|------------|------------|--------------|--------------|-------|-------|------|
| | 140 | 5 | 25 | 148,53 | 148,53 | 0,28 | 0,28 | 0,55 |
| | 150 | 5 | 25 | -109,45 | 148,53 | 0,20 | 0,28 | 0,59 |
| | 160 | 5 | 25 | -71,06 | 148,53 | 0,13 | 0,28 | 0,63 |
| | 170 | 5 | 25 | -49,41 | 148,53 | 0,09 | 0,28 | 0,67 |
| | 180 | 5 | 25 | 27,76 | 142,34 | 0,05 | 0,27 | 0,71 |
| | 190 | 5 | 25 | -22,36 | 140,2 | 0,04 | 0,26 | 0,75 |
| | 200 | 5 | 25 | 17,07 | 136,28 | 0,03 | 0,25 | 0,79 |
| | 210 | 5 | 25 | 20,45 | 133,68 | 0,04 | 0,25 | 0,83 |
| | 220 | 5 | 25 | 22,09 | 131,18 | 0,04 | 0,24 | 0,87 |
| | 230 | 5 | 25 | 21,3 | 130 | 0,04 | 0,24 | 0,91 |
| | 240 | 5 | 25 | 23,07 | 127,82 | 0,04 | 0,24 | 0,94 |
| | 250 | 5 | 25 | 22,45 | 127 | 0,04 | 0,24 | 0,98 |
| | 260 | 5 | 25 | 21,4 | 126,83 | 0,04 | 0,24 | 1,02 |
| | 270 | 5 | 25 | 42,205 | 126 | 0,08 | 0,24 | 1,06 |
| | 280 | 5 | 25 | 63,01 | 125,84 | 0,12 | 0,23 | 1,10 |
| | 290 | 5 | 25 | 52,22 | 124,3 | 0,10 | 0,23 | 1,14 |
| | 300 | 5 | 25 | 41,43 | 130 | 0,08 | 0,24 | 1,18 |

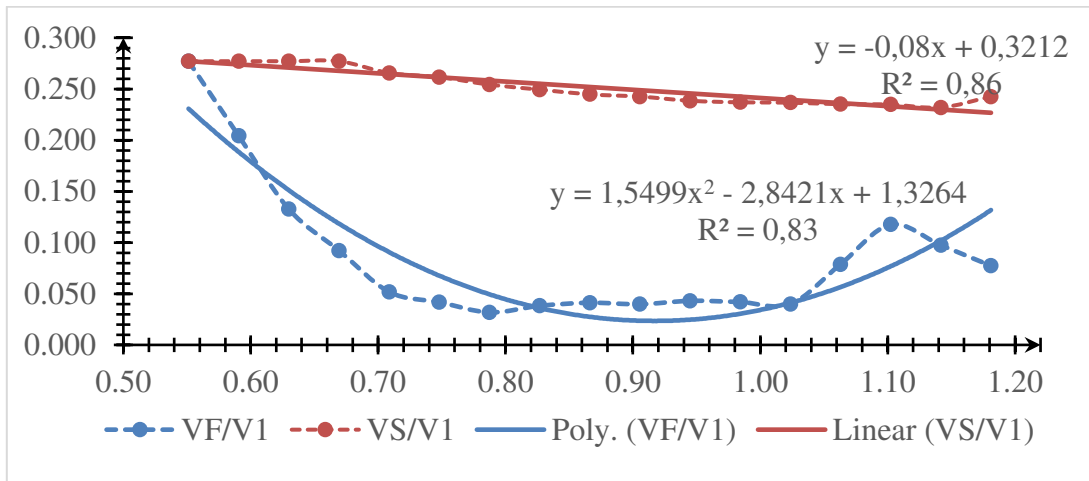


Figure 4.30 : Variation de la vitesse relative (VF/V1) en fonction de la position relative x/Lb pour Y=-8

Les figures 4.29 et 4.30 et les tableaux 4.18 et 4.19 montrent une légère diminution des valeurs des vitesses par rapport au centre du canal. Cela explique la différence totale entre le centre du canal et ses côtés, ce qui signifie qu'il y a une transition des vitesses maximales aux vitesses minimales et revient au frottement avec les parois du canal.

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

Y= -8cm :

La vitesse relative au fond V_f/V_1 on a ;

$$Y = 0,1355*x^2 - 0,3147*x + 0,4178 \quad R^2 = 0,83 \quad (4.6)$$

La vitesse relative de la surface V_s/V_1 on a ;

$$Y = 1,5499*x^2 - 2,8421*x + 1,3264 \quad R^2 = 0,86 \quad (4.7)$$

IV.4.3 Deuxième essai

Pour la deuxième expérience, nous considérons la hauteur du fond du canal $h = 5$ cm et la couche supérieure d'écoulement $h = 25$ cm. La vitesse dans la section initiale est $V_1 = 450$ cm/s, et la longueur du ressaut $L_b = 237$ cm, avec nombre de Froude $F_1=10.08$

Tableau 4.18 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x.

| $y=(0)$ | X (cm) | Z1 (cm) | Z4 (cm) | Vf (cm/s) | Vs(cm/s) | VF/V1 | VS/V1 | X/LB |
|---------|--------|---------|---------|-----------|----------|-------|-------|------|
| | 120 | 5 | 25 | 148 | 148 | 0,33 | 0,33 | 0,51 |
| | 130 | 5 | 25 | -134,835 | -138,785 | 0,30 | 0,31 | 0,55 |
| | 140 | 5 | 25 | -121,67 | -129,57 | 0,27 | 0,29 | 0,59 |
| | 150 | 5 | 25 | -93,9 | -125,955 | 0,21 | 0,28 | 0,63 |
| | 160 | 5 | 25 | -66,13 | 122,34 | 0,15 | 0,27 | 0,68 |
| | 170 | 5 | 25 | -39,955 | 123,655 | 0,09 | 0,27 | 0,72 |
| | 180 | 5 | 25 | 13,78 | 124,97 | 0,03 | 0,28 | 0,76 |
| | 190 | 5 | 25 | 10,115 | 124,115 | 0,02 | 0,28 | 0,80 |
| | 200 | 5 | 25 | 6,45 | 123,26 | 0,01 | 0,27 | 0,84 |
| | 210 | 5 | 25 | 6,4 | 102,66 | 0,01 | 0,23 | 0,89 |
| | 220 | 5 | 25 | -6,45 | 82,06 | 0,01 | 0,18 | 0,93 |
| | 230 | 5 | 25 | -6,45 | -78,39 | 0,01 | 0,17 | 0,97 |
| | 240 | 5 | 25 | -6,45 | -74,72 | 0,01 | 0,17 | 1,01 |
| | 250 | 5 | 25 | -6,45 | -73,06 | 0,01 | 0,16 | 1,05 |
| | 260 | 5 | 25 | 6,45 | 71,4 | 0,01 | 0,16 | 1,10 |

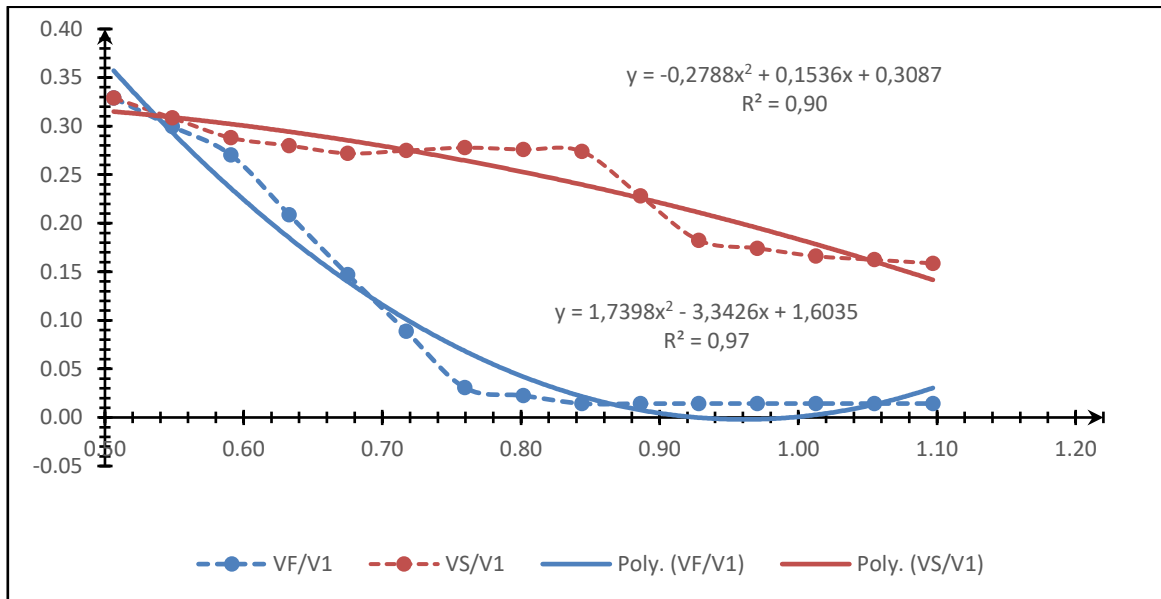


Figure 4.31: Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V_F/V_1) en fonction de la position relative x/L_b pour $Y=0$

Une deuxième expérience vérifiez ce que nous avons obtenu de la première expérience. Ces résultats ne sont pas très différents de ceux concernant les vitesses du centre de canal.

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_b :

Pour la vitesse relative au fond V_f/V_1 on a ;

$$Y = 1,7398 \cdot x^2 - 3,3426 \cdot x + 1,6035, R^2 = 0,97 \quad (4.8)$$

Pour la vitesse relative de la surface V_s/V_1 on a ;

$$Y = -0,2788x^2 + 0,1536x + 0,3087, R^2 = 0,90 \quad (4.9)$$

➤ Pour Y = +8cm et -8cm

Tableau 4.18 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x.

| y= (+8cm) | X (cm) | Z1 (cm) | z4 (cm) | Vf (cm/s) | Xs (cm/s) | Vf/V1 | Vs/V1 | X/LB |
|--------------|--------|------------|------------|-----------|--------------|-------|-------|------|
| | 120 | 5 | 25 | 115,02 | 148 | 0,26 | 0,33 | 0,51 |
| | 130 | 5 | 25 | -81,3 | -140,3 | 0,18 | 0,31 | 0,55 |
| | 140 | 5 | 25 | -47,03 | -132,44 | 0,10 | 0,29 | 0,59 |
| | 150 | 5 | 25 | 39,02 | -120 | 0,09 | 0,27 | 0,63 |
| | 160 | 5 | 25 | -31,33 | 106,92 | 0,07 | 0,24 | 0,68 |
| | 170 | 5 | 25 | 22,21 | 106,53 | 0,05 | 0,24 | 0,72 |
| | 180 | 5 | 25 | -13,09 | 106,14 | 0,03 | 0,24 | 0,76 |
| | 190 | 5 | 25 | 9,8 | -110,6 | 0,02 | 0,25 | 0,80 |
| | 200 | 5 | 25 | 6,5 | -115,01 | 0,01 | 0,26 | 0,84 |
| | 210 | 5 | 25 | -6,45 | 130,02 | 0,01 | 0,29 | 0,89 |
| | 220 | 5 | 25 | -6,45 | 144,73 | 0,01 | 0,32 | 0,93 |
| | 230 | 5 | 25 | -6,45 | 105,98 | 0,01 | 0,24 | 0,97 |
| | 240 | 5 | 25 | 6,5 | 67,21 | 0,01 | 0,15 | 1,01 |
| | 250 | 5 | 25 | 6,5 | 66,15 | 0,01 | 0,15 | 1,05 |
| | 260 | 5 | 25 | 6,5 | 65,1 | 0,01 | 0,14 | 1,10 |

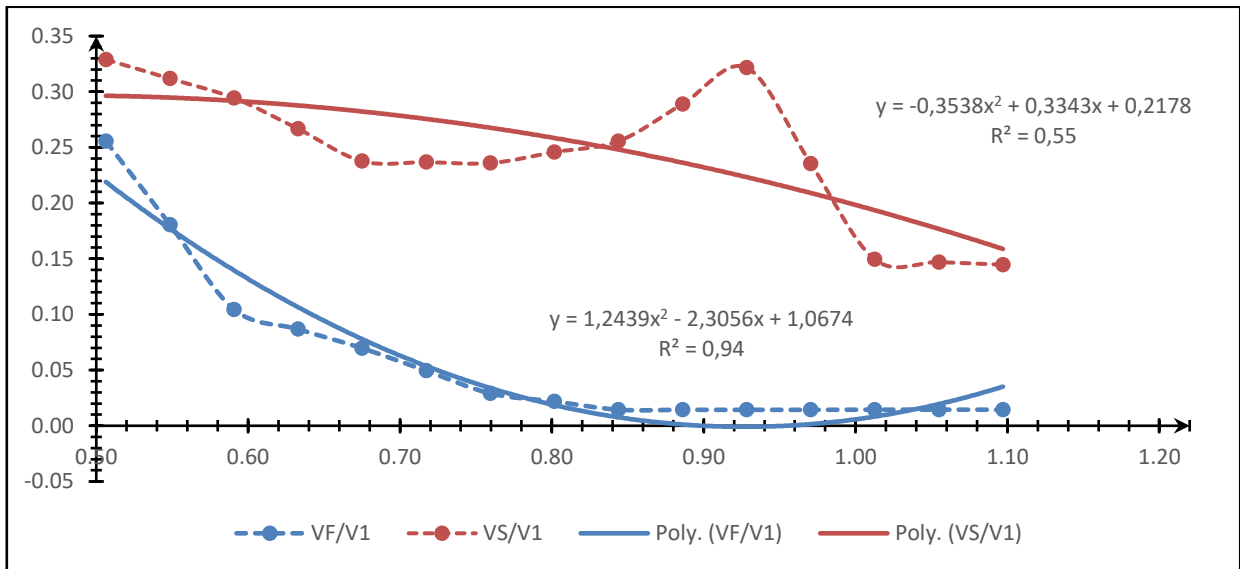


Figure 4.32 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (VF/V1) en fonction de la position relative x/Lb pour Y=+8

Tableau 4.19 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x.

| y=-8cm | X (cm) | Z1 (cm) | z4 (cm) | Vf (cm/s) | Xs (cm/s) | VF/V1 | VS/V1 | X/LB |
|---------------|---------------|----------------|----------------|------------------|------------------|--------------|--------------|-------------|
| | 120 | 5 | 25 | 148 | 148 | 0,33 | 0,33 | 0,51 |
| | 130 | 5 | 25 | -134,085 | 148 | 0,30 | 0,33 | 0,55 |
| | 140 | 5 | 25 | -120,17 | 148,53 | 0,27 | 0,33 | 0,59 |
| | 150 | 5 | 25 | -80,075 | 137,88 | 0,18 | 0,31 | 0,63 |
| | 160 | 5 | 25 | -39,98 | 127,23 | 0,09 | 0,28 | 0,68 |
| | 170 | 5 | 25 | 26,56 | 133,63 | 0,06 | 0,30 | 0,72 |
| | 180 | 5 | 25 | 13,14 | 140,03 | 0,03 | 0,31 | 0,76 |
| | 190 | 5 | 25 | 9,795 | 142,02 | 0,02 | 0,32 | 0,80 |
| | 200 | 5 | 25 | -6,45 | 144,06 | 0,01 | 0,32 | 0,84 |
| | 210 | 5 | 25 | -6,45 | 107,12 | 0,01 | 0,24 | 0,89 |
| | 220 | 5 | 25 | -6,45 | 70,18 | 0,01 | 0,16 | 0,93 |
| | 230 | 5 | 25 | -6,45 | 83,715 | 0,01 | 0,19 | 0,97 |
| | 240 | 5 | 25 | -6,45 | 97,25 | 0,01 | 0,22 | 1,01 |
| | 250 | 5 | 25 | 6,45 | 96,625 | 0,01 | 0,21 | 1,05 |
| | 260 | 5 | 25 | 6,45 | 96 | 0,01 | 0,21 | 1,10 |

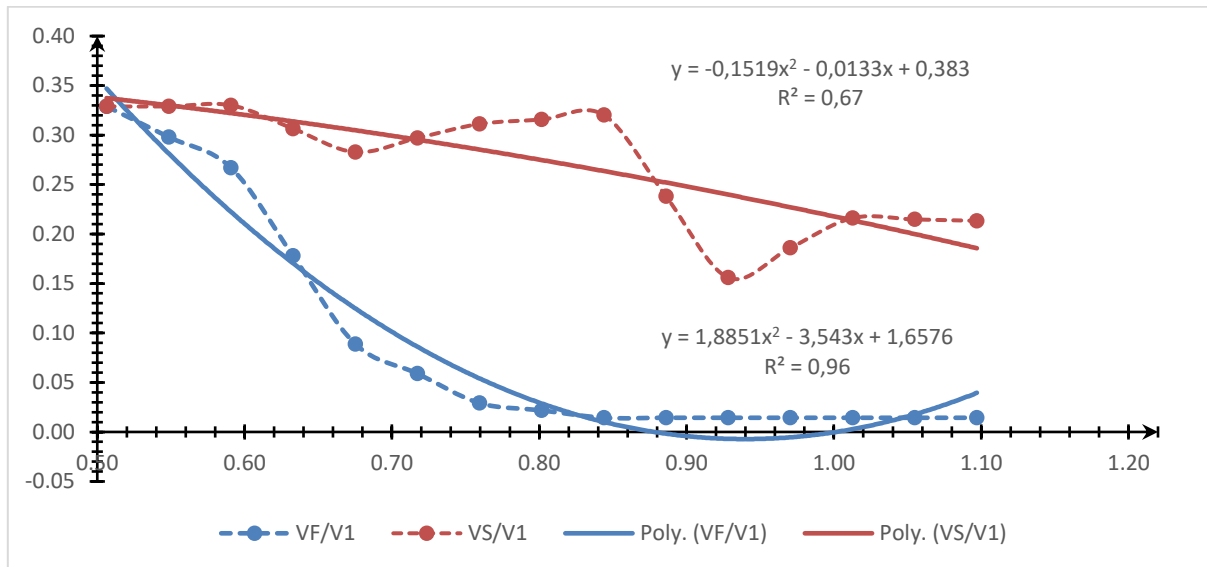


Figure 4.33 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V_F/V_1) en fonction de la position relative x/L_b pour $Y=-8$

Dans les figures correspondantes 4.23 et 4.33 ainsi que dans les tableaux 4.18 et 4.19, nous notons la forte diminution de la vitesse qui a été enregistrée. Cette diminution est due à plusieurs causes, parmi, le frottement avec les parois et éloignement au jet du convergent et le rapprochement du deuxième seuil. Ces résultats confirment toutes les observations mentionnées dans l'expérience précédente concernant les vitesses relatives en surface et au fond du canal.

La relation entre les vitesses relatives et les positions relatives est une forte relation, L'ajustement de l'ensemble du nuage de points donne des relations de la forme polynomiale entre V/V_1 et x/L_b avec un coefficient de corrélation R^2 élevé.

Y= +8cm :

Pour la vitesse relative au fond V_f/V_1 on à :

$$Y = 1,1383*x^2 - 2,1326*x + 1, R^2 = 0,94 \quad (4.10)$$

La vitesse relative de la surface V_s/V_1 on a ;

$$Y = -0,3538*x^2 + 0,3343*x + 0,2178, R^2 = 0,55 \quad (4.11)$$

Y= -8cm :

La vitesse relative au fond V_f/V_1 on a ;

$$Y = 1,8851*x^2 - 3,543*x + 1,6576, R^2 = 0,96 \quad (4.12)$$

La vitesse relative de la surface V_s/V_1 on a ;

$$Y = -0,1519*x^2 - 0,0133*x + 0,383, R^2 = 0,67 \quad (4.13)$$

IV.4.4 Récapitulation

Après notre analyse, on peut déduire les effets des positions relatives sur les vitesses relatives :

- La relation entre les vitesses relatives et les positions relatives est une fonction régulière.
- Les vitesses relatives (V_f/V_1 , V_s/V_1) diminue progressivement avec l'augmentation de F_1 .
- Les vitesses relatives (V_f/V_1 , V_s/V_1) diminue avec l'augmentation de la position relative (x/L_b).

IV.5 Conclusion

Cette étude expérimentale nous a d'abord permis de mener une étude détaillée de la distribution des vitesses horizontales moyennes par rapport à la position 'x' d'un ressaut hydraulique forcé par un seuil mince dans un canal composé. Nous avons examiné, dans cette étude, deux cas de ressaut forcé pour deux nombres de Froude différents ($F_1= 6.91$, $F_1=10.08$) et deux débits différent ($Q= 21.44$ l/s, $Q=27.26$ l/s).

Cette étude pilote nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Chapitre IV : Étude Expérimentale

- Dans les deux essais ; Avant le seuil ($x < L_s$), les vitesses horizontales moyennes passent d'une valeur maximale en bas à une valeur minimale sur la surface avant le seuil. Les vitesses maximales au centre et diminuent à l'approche des parois du canal. Après le seuil ($x > L_s$), nous enregistrons une évolution des vitesses contradictoire avec la partie amont (avant le seuil $x < L_s$).
- Nous notons qu'il y a un petit rouleau après le premier seuil au bas du canal dans les deux expériences.
- Au-delà du seuil, et contrairement à la partie amont du ressaut, l'intensité des vitesses augmente sur la rive gauche par rapport du centre du canal, et puis se diminue et en retournant à la distribution initiale.
- Nous avons effectué ensuite, dans cette partie expérimentale, une analyse des relations qui peuvent exister entre les vitesses relatives (V_f/V_1 et V_s/V_1) et la position relative (x/L_b).

Conclusion générale

Notre présent travail est consacré à étudier théoriquement et expérimentalement le ressaut hydraulique forcé de type A entre deux seuil mince dans un canal composé.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté en premier lieu, les travaux les plus importants d'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire (ressaut hydraulique classique) selon la classification de Bradley et Peterka (1957). En deuxième lieu, nous avons étudié les principales caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, qui ont été souvent la cible principale des auteurs ; Bossi et Hsing (1938), Sylvester (1964) et Otsu (1976), et plus récemment les caractéristiques de Wanoschek et Hager (1989). Dans la dernière partie de notre chapitre, nous avons mené notre étude, qui passe en revue, les principales caractéristiques du canal composé, ainsi que les travaux réalisés notamment par Khataoui et Achour (2012) dans le domaine du ressaut hydraulique dans ce type de canal.

Le deuxième chapitre de notre étude bibliographique est consacré à des principaux travaux qui ont été réalisés dans le domaine de la distribution de vitesse dans le ressaut hydraulique, où nous avons passé en revue les travaux de quelques chercheurs parmi Rajaratnam, Subramania (1968,1970) et Hager (1992), Debabeche (2003) leurs études ont permis de trouver des relations fonctionnelles liant différentes propriétés et les vitesses de ressaut dans différents canaux.

Dans notre primordiale et dernier chapitre, où nous avons ciblé l'analyse et la synthèse des résultats obtenues après nos expérimentations. Nous avons divisé ce chapitre en deux parties qui sont les suivants ;

La première partie de notre étude expérimentale, nous a permis de mener une analyse détaillée des résultats des vitesses horizontales moyennes dans des profils longitudinaux en fonction de la position 'x' et transversaux par rapport à la position 'y', ces profils ont été exprimés dans des graphes et tableaux bien illustré précédemment.

La deuxième partie ; Un examen des relations a été effectué entre les vitesses relatives (V_f/V_1 et V_s/V_1) et la position relative (x/L_b). Cet examen nous a conduit à un coefficient de corrélation R^2 très élevé entre ces paramètres relatifs, ce qui signifie à une bonne relation entre la vitesse relative et la position relative. Ce coefficient R^2 a été déduit après un ajustement de

Chapitre IV : Étude Expérimentale

l'ensemble du nuage de points, par la méthode des moindres carrés non linéaire. Cette analyse donne des relations de la forme polynomiale entre $(V_i/V_1, V_s/V_1)$ et (x/L_b) .

PRICIPALES 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 | $[m]$ |
| F_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] |
| L_{rf} | Longueur du rouleau de fond | [m] |
| L_B | Longueur du bassin [m] | [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 côtés 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 $\beta = b/B$ | [-] |

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

| | |
|---|----|
| Figure 1.2.a : Ressaut ondulé..... | 3 |
| Figure 1.2.b : Le pré-ressaut..... | 4 |
| Figure 1.2.c : Le ressaut de transition..... | 4 |
| Figure 1.2.d : Le ressaut stable..... | 5 |
| Figure 1.2.e : Le ressaut clapoteux..... | 5 |
| Figure 1.3 : Représentation des forces agissantes sur le ressaut..... | 5 |
| Figure 1.4 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger (1828)..... | 8 |
| Figure 1.5 : Hauteur du ressaut..... | 9 |
| Figure 1.6 : Aspect du ressaut classique : a) Rouleau développé, b) Rouleau non développé..... | 9 |
| Figure 1.7 : Ligne de charge totale le long du ressaut classique..... | 11 |
| Figure 1.8 : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude $F1$ Courbe tracée selon la relation (1.25), courbe tracée Selon la relation (1.26)..... | 13 |
| Figure 1.9 : Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes selon Rand (1957): 0) Ressaut classique avec hauteurs conjuguées $h1$ et $h2$; 1) class 1, longueur Ls,min ; 2) class 2, longueur intermédiaire Ls ;3) class 3, longueur Ls,max ; s :..... | 14 |
| Figure 1.10 : Hauteurs conjuguées $h2$ $h1 \neq f(S,K)$ pour $F1 = 9$. Valeurs et courbes expérimentales : (----) limite d'influence de l'aval sur l'amont..... | 15 |
| Figure 1.11 : Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $F1 = 5,23$ et $S = 1,42$. a) Ressaut type A ; b) Ressaut type B ; c) Ressaut type B min ; d) Ressaut type C et e) onde. (Bretz, 1987)..... | 16 |
| Figure 1.12 : ressaut forcé par seuil selon Bretz (1965) : définition des termes. $H1$ Charge amont, $H2$ charge aval, ΔH perte de charge, $h1$ hauteur d'eau amont, $h2$ hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, $x0$ position du pied du ressaut, xs position du..... | 17 |

| | |
|---|----|
| Figure 1.13 : Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées $YA = f(F1,S)$ avec $0,5 \leq S \leq 6$. $S = s/h1$, courbe selon l'équation de Bélanger. Courbe du ressaut classique selon l'équation (1.13) | 18 |
| Figure 1.14 : Longueur relative $\lambda S = f(F1)$ pour le ressaut forcé : a) type A,..... | 19 |
| Figure 2.1 : Variation du nombre de Froude $F1$, en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et du coefficient de forme M | 21 |
| Figure 1.14 : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale..... | 23 |
| Figure 1.15: Représentation graphique de la relation (1.40) du rendement η en fonction du nombre de Froude $F1$. $M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire. | 25 |
| Figure 1.16 Définition des paramètres géométriques d'un canal de section rectangulaire composée. | 25 |
| Figure 1.17 : Définition des paramètres géométriques d'un canal de section trapézoïdal composée. | 26 |
| Figure 1.18: Structure tridimensionnelle de l'écoulement en lit composé droit, d'après Shiono et Knight (1991). | 28 |
| Figure 1.19: Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit. | 29 |
| Figure 1.20 Variation de Y , calculé par (3.1), en fonction de $F1$, (---) : $\beta = 1$; Khattaoui et Achour (2012). | 31 |
| Figure 1.21 : Variation de Y en fonction de $Fr1$. (o) : équation (1.50), (+) : équation (1.48)..... | 32 |
| Figure 1.22 : Variation de ε en fonction de $Fr1$. (- - -) : $\beta = 1$. Y est calculé par l'équation (3.4). | 33 |
| Figure 1.23 : Variation de ε en fonction de $F1$. (0) : équation (3.2), (+) : équation (3.1) | 33 |

Chapitre II

| | |
|---|----|
| Figure 2.1 : Notation pour l'écoulement interne du ressaut hydraulique..... | 37 |
| Figure 2.2 : Représentation adimensionnelle de la répartition de vitesse \bar{v} en fonction de Z , Selon SCHRODER (1963). | 37 |
| Figure 2.3 : Distribution des vitesses $u(z)$ dans la partie inférieure du ressaut | 40 |
| Figure 2.4 : Distribution des vitesses $U(Z)$, pour différentes longueurs relatives $X = x/L$ $F1 = 5,50$. $X = (,) 0,2; () 0,3; (\square) 0,4; (\cdot) 0,5; (\wedge) 0,6; (\vee) 0,7; (T) 0,8; (o) 0,9; (\bullet) 1.L$ | 41 |

La figure 2.6 montre la variation de la vitesse maximale inférieure relative $U_m = ((u_m - v_2)) / ((v_1 - v_2))$ en fonction de la longueur relative $X = x/L_r$, 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. 42

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. $F_1 = (o) 4,3$, (S) 4,95, (U) 5,5, (,) 6,85, (†) 8,9. La vitesse maximale relative de 42

Figure 2.7 : Ressaut hydraulique classique, vitesse maximale supérieure relative U_s en fonction de la longueur relative X 43

Figure 2.8 : Accroissement de la hauteur relative $\delta_0 / ((h_2 - h_1))$ en fonction de la longueur relative X 43

Figure 2.9 : Vitesse de surface adimensionnelle pour $0 < x < L_r$ et $x > L_r$ d'après les définitions Des vitesses très élevées dans le ressaut hydraulique de l'eau près du fond du V_f sont particulièrement importantes dans un cours d'eau, de graves dommages 44

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 4.10 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 (..... 45

Figure 2.11: Ressaut forcé par seuil : définition des termes. 46

Figure 2.12 : Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $IF_1 = 5,23$ et $S = 1,42$. a) ressaut type A ; b) ressaut type B ; c) ressaut type B minimum ; d) ressaut type C et e) onde. (Bretz, 1987) d) ressaut type (C et e) onde. (Bretz, 1987) Directio 48

Figure 2.13 : Distribution des lignes de courant pour les ressauts forcés de type A dans la zone du seuil : a) $z = 15$ mm 48

Chapitre III

Figure 3.1 : La forme géométrique du canal de mesure (trapézoïdal à base rectangulaire). 51

Figure 3.2 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal à base rectangulaire. 52

Figure 3.3.a: Photographie du model expérimentale du canal 52

Figure 3.3.b : Photographie de la forme du canal 53

Figure 3.5 : Photographie d'une boîte en charge. **Error! Bookmark not defined.**

| | |
|---|----|
| Figure 3.6 : Photographie d'une série de convergent. | 53 |
| Figure 3.7: Photographie du model expérimentale du canal | 54 |
| Figure 3.8: Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit..... | 55 |
| Figure 3.8 : Photographie de la Micro-moulinet et ses appareils annexe..... | 57 |
| Figure 3.9 : Micro-moulinet et ses appareils annexes | 57 |
| Figure 3.10 : Photographie des seuils minces testés est Support du seuil..... | 58 |
| Figure 3.11 : Maillage et système d'axes adoptés pour la mesure des vitesses horizontales. | 58 |

Chapitre IV

| | |
|---|----|
| Figure 4.1 : Ressaut forcé type A 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 | 63 |
| Figure 4.2 : Photographie d'un ressaut force de type A évoluant dans un canal trapézoïdal à base rectangulaire, $F=10.08$; $S_1=9$; $S_2=15\text{cm}$; $L_{s1}=185\text{cm}$, $L_b=254\text{cm}$; $h_2=26,7\text{cm}$, $h_1=2\text{cm}$. | 63 |
| Figure 4.3: Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=0\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)..... | 65 |
| Figure 4.5 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=-4\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)..... | 68 |
| Figure 4.6 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=4\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)..... | 69 |
| Figure 4.7: Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=-8\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)..... | 70 |
| Figure 4.8 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=+8\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)..... | 71 |
| Figure 4.9 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=-11\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)..... | 72 |
| Figure 4.10 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=+11\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm). | 73 |
| Figure 4.11 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 160\text{cm}$, pour différentes positions Y (cm), $F=10.085$, $x/L_b = 0,62$, $x < L_{s1}$ | 74 |

| | |
|--|----|
| Figure4.12 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 180\text{cm}$, pour différentes positions Y (cm), $F=10.085$, $x/Lb = 0,71$, $x < Ls1$ | 75 |
| Figure4.13 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 180\text{cm}$, pour différentes positions Y (cm) $x = 200\text{cm}$, $F=10.085$, $x/Lb = 0,79$, $x > Ls1$ | 75 |
| Figure4.14 : $x = 220\text{cm}$, $F=10.085$, $x/Lb = 0,85$, $x > Ls1$ Mêmes notations que la figure Figure4.14 | 76 |
| Figure4.15 : $x = 240\text{cm}$, $F=10.085$, $x/Lb = 0.93$, $x > Ls1$ Mêmes notations que la figure Figure4.14. | 76 |
| Figure4.16 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 260\text{cm}$, pour différentes positions Y (cm), $F=10.085$, $x/Lb = 1.007$, $x > Ls1$ | 77 |
| Figure4.17 : $x = 280\text{cm}$, $F=10.085$, $x/Lb = 1.08$, $x > Ls1$ Mêmes notations que la figure Figure4.16. | 78 |
| Figure4.18 : $x = 300\text{cm}$, $F=10.085$, $x/Lb = 1.16$, $x > Ls1$; Mêmes notations que la figure Figure4.16. | 78 |
| Figure 4.18 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=0\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)..... | 80 |
| Figure 4.19 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=-4\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)..... | 82 |
| Figure 4.20 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=4\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)..... | 83 |
| Figure 4.21 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=-8\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)..... | 84 |
| Figure 4.22 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=-8\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)..... | 85 |
| Figure 4.23 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=-11\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm). | 86 |
| Figure 4.24 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y=11\text{cm}$, pour différentes positions x_s (cm)..... | 87 |
| Figure4.25: Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 140\text{cm}$, pour différentes positions Y (cm), $F=6.91$, $x < Ls1$, $x/Lb = 0.59$ | 88 |

| | |
|--|-----|
| Figure4.26 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section transversale $x = 180\text{cm}$, pour différentes positions Y (cm), $F=6.91$, $x < Ls1$, $x/Lb = 0.76$ | 89 |
| Figure4.27 : $x = 260\text{cm}$, $F=6.91$, $x > Ls1$, $x/Lb = 1.1$ Mêmes notations que la figure4.29. | 89 |
| Figure 4.28 Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V_F/V_1) en fonction de la position relative x/Lb pour $Y=0$ | 93 |
| Figure 4.29 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V_F/V_1) en fonction de la position relative x/Lb pour $Y=+8$ | 95 |
| Figure 4.30 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V_F/V_1) en fonction de la position relative x/Lb pour $Y=-8$ | 97 |
| Figure 4.31: Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V_F/V_1) en fonction de la position relative x/Lb pour $Y=0$ | 99 |
| Figure 4.32 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V_F/V_1) en fonction de la position relative x/Lb pour $Y=+8$ | 101 |
| Figure 4.33 : Variation de la vitesse moyenne horizontale relative (V_F/V_1) en fonction de la position relative x/Lb pour $Y=-8$ | 102 |

LISTE DES TABLEAUX

Deuxième partie

Chapitre IV :

| | | | |
|------------|--|-------|----|
| Tableau 1 | Tableau 4.2 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale | Y = 0 | 65 |
| Tableau 2 | Tableau 4.3 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y = -4cm | | 67 |
| Tableau 3 | Figure 4.6 : Profil des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y=4cm, pour différentes positions xs (cm) | | 69 |
| Tableau 4 | Tableau 4.5 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale | | 70 |
| Tableau 5 | Tableau 4.6 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y = +8cm | | 71 |
| Tableau 6 | Tableau 4.7 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y = -11cm | | 72 |
| Tableau 7 | Tableau 4.8 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale | | 73 |
| Tableau 8 | Tableau 2.9 : conditions et paramètres hydraulique respectif au deuxième essai. | | 79 |
| Tableau 9 | Tableau 4.10 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y = 0 | | 79 |
| Tableau 10 | Tableau 4.11 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y = -4cm | | 81 |
| Tableau 11 | Tableau 4.12 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y = 4cm | | 82 |
| Tableau 12 | Tableau 4.13 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y = -8cm | | 83 |
| Tableau 13 | Tableau 4.14 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale Y = +8cm | | 84 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Tableau 14 | Tableau 4.15: Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = -11\text{cm}$ | 85 |
| Tableau 15 | Tableau 4.16 : Mesures expérimentales des vitesses moyennes horizontales pour la section longitudinale $Y = 11\text{cm}$ | 86 |
| Tableau 16 | Tableau 4.17 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x | 92 |
| Tableau 17 | Tableau 4.18 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x | 94 |
| Tableau 18 | Tableau 4.19 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x | 96 |
| Tableau 19 | Tableau 4.18 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x | 98 |
| Tableau 20 | Tableau 4.18 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x | 100 |
| Tableau 21 | Tableau 4.19 : Rapports adimensionnels ayant servi au traçage des courbes expérimentales pour différentes positions x | 101 |

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achour, B., Debabeche, M., (2003).* Ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire. Journal of Hydraulic Research 41(3), 319-325.
- Ackers P. (1991)* Hydraulic design of straight compound channels.SR281,HR Wallingford, Wallingford, U K, 1991.
- Andersen J, V. M., (1978).* Undular hydraulic jump, Proc, ASCE, j, Hydraulics Division, Vol.104, pp. 1185-1188.
- Bakhmeteff, B. A., Matzke, A E, (1936).* The Hydraulic Jump terms of dynamic similarity, Transactions, American society of civil engineers, Vol.101, pp, 630-647.
- Belanger, J.B., (1828).* Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au permanent des eaux courantes, Carilian-Goëury, Paris.
- Bellahcen, S.,(2016).* Etude numérique et expérimentale du champ de vitesse en canaux composés, thèse de doctorat, Université de Strasbourg.
- 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.
- 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.
- Bretz, N., V., (1988).* Ressaut Hydraulique Forcé par seuil, Laboratoire de constructions

Hydrauliques, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, Communication No. 2.

- Debabeche, M., Achour, B., (2006).* Effet du seuil sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. *Journal of Hydraulic Research* (article accepté pour publication en 2007).
- Debabeche, M., Achour, B., (2007).* Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45(1), pp. 135-139.
- Debabeche, M., Lakehal, M., Mansri, N. and Achour b., (2008).* Theoretical study of the forced hydraulic jump by positive step in a triangular channel. *Journal of fluid mechanics research*, Vol. 35(4), pp. 318-326.
- Debabeche, M., Lakehal, M., Mansri, N. and Achour b., (2006).* Ressaut hydraulique force par marche positive. The third international conference on the 'Water Resources in the Mediterranean Basin', watmed 3 – Tripoli – Lebanon.
- 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., Bretz N.V., (1986).* Hydraulic Jump at positive and negative step; *J. hydraulic research* 24(4), 237-253.
- Hager, W.H., Siniger, R., (1985).* Flow characteristics of the Hydraulic jump in Stilling Channel with an abrupt bottom rise, *J. Hydraulic Research* Vol. 23, 1985, No. 2 pp. 101-113; Vol. 24(3), pp. 207-215.
- Khattaoui, M. Achour, B (2012).* RESSAUT HYDRAULIQUE EN LIT COMPOSE. *Revue scientifique et technique, LJEE N°20.* Juin 2012.
- Otsu, I., (1976).* Free hydraulic jump and submerge hydraulic jump in trapézoïdal and Rectangulaire channels. *Trans. JSCE* 8, 122-125.
- Posey, C.J., Hsing, P.S. (1938).* The hydraulic jump in trapezoidal channel. *Engineering News Record* 121, 797-798.
- Proust (2005).* Ecoulements non-uniformes en lits composés effet de la variation de la largeur du lit majeur, thèse de doctorat, INSA Lyon, France.
- Rand W., (1957).* An approach to generalized design of stilling basin. *Trans. New York*

academy of Sciences. 1957. 20(2), 173-191.

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,