



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar D'El-Oued

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil



MEMOIRE

Présenté en Vue de l'Obtention du Diplôme du Master en Hydraulique

Option : Conception et Diagnostic des Systèmes d'AEP et d'Assainissement

L'intitulé du Thème :

Contribution à l'étude de l'effet de la marche positive sur les hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée

Présenté par :

- DAHA Othmane
- LASSOUED Abdelhafedh
- TARBAKH Younes

Encadreur :

RIGUET Ferhat

Soutenu publiquement le :

Devant le Jury composé de :

Dr. GHOMRI Ali

Président

Université d'El Oued

Dr. BEBOUKHA Yacine

Examineur

Université d'El Oued

Dr. RIGUET Ferhat

Encadreur

Université d'El Oued

Promotion : Juin 2022

REMERCIEMENT

*Nous tenons à remercier tous premièrement **ALLAH** le tout puissant pour la volonté, la force, le courage, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années d'étude.*

*La première personne que nous tenons à remercier est notre encadrant Mr. (**RIGUET Ferhat**), pour les conseils, la confiance et la patience qui ont constitué une grande contribution sans laquelle ce travail n'aurait pas été possible.*

*Nous adressons également nos remerciements à Mr. (**GHOMRI Ali**) pour ses bonnes explications qui nous ont guidés sur le chemin de la recherche et pour sa coopération avec nous dans l'accomplissement de ce modeste travail.*

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui, par leurs compétences, nous ont soutenus dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

OTHMANE, ABDELHAFEDH, YOUNES

Dédicace :

*A ma mère et mon père A tous mes frères et sœurs A tous
les membres de ma famille A tous mes amis et camarades, A
tous Mes professeurs et enseignants qui me passaient dans
ma carrière pédagogique.*

OTHMANE, ABDELHAFEDH, YOUNES

RESUME :

Le but de notre contribution est d'étudier l'effet de la marche positif sur les caractéristiques conjuguées du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée, Notre travail est divisé en deux parties principales, la première porte sur l'étude théorique et la seconde porte sur l'expérimentation de quelques caractéristiques d'un ressaut hydraulique aménagé dans un canal rectangulaire de section composée. Également de faire une comparaison entre les deux ressauts hydrauliques contrôlé par seuil mince et celui par marche positive.

Mots clés : Ressaut hydraulique, Canal rectangulaire de section composée, écoulement brusquement varié.

ABSTRACT:

The aim of our contribution is to study the effect of the positive step on the combined characteristics of the hydraulic jump in the rectangular channel of composed section. Our work is divided into two main parts, the first concerns the theoretical study and the second relates to the experimentation of some characteristics of a hydraulic jump fitted out in a rectangular channel of compound section. Also, to make a comparison between the two hydraulic jumps controlled by thin threshold and that by positive step.

Keywords: Hydraulic jump, rectangular channel of compound section, flow suddenly.

الملخص:

الهدف من مساهمتنا في هذه الدراسة هو تأثير الخطوة الإيجابية على الارتفاعات المجمعة للقفزة الهيدروليكية في القناة المستطيلة للقسم المركب، وينقسم عملنا إلى قسمين أساسيين، الأول يتعلق بالدراسة النظرية والثاني يتعلق بتجربة بعض خصائص القفزة الهيدروليكية المتطورة في قناة مستطيلة من قسم مركب، وأيضاً لإجراء مقارنة بين القفزة الهيدروليكية التي يتم التحكم فيها بعتبة رفيعة وذلك بخطوة موجبة.

الكلمات الرئيسية: القفز الهيدروليكي، القناة المستطيلة للقسم المركب، التدفق المتغير فجأة

SOMMAIRE.

LISTES DES FIGURES	
LISTES DES PHOTOS	
LISTES DES TABLEAUX.....	
LISTES DES ANNEXES	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
INTRODUCTION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE :	3

Chapitre I: La théorie du ressaut

I.1 Ecoulement à surface libre :	5
I.2 Ressaut hydraulique :	6
I.2.1 Définition :	6
I.2.2 Description du phénomène :	6
I.2.3 Apparition des ressauts :	7
I.2.4 Classification des ressauts :	7
I.2.4.1 Le Pré-ressaut ou le ressaut faible :	8
I.2.4.2 Le ressaut de transition ou oscillatoire :	8
I.2.4.3 Le ressaut stable ou établie :	9
I.2.4.4 Le ressaut agité (Fort) :	9
I.2.5 Caractéristiques du ressaut hydraulique :	10
I.2.5.1 Hauteurs conjuguées du ressaut :	10
I.2.5.2 Longueur du ressaut :	11
I.2.5.3 Dissipation d'énergie :	13
I.2.5.4 Utilisation du ressaut :	17
I.2.5.4.1 Définition de Dissipation d'énergie :	19
I.2.5.4.2 Généralités sur le phénomène :	19
I.2.5.4.3 Types de bassins de dissipation :	19
I.2.5.4.4.a Bassins de dissipation d'impact :	19
I.2.5.4.4.b Bassins de dissipation par rollerou par buckets :	20
I.2.5.4.4.c Bassins de dissipation par macro rugosité :	20
I.2.5.4.4.d Bassins de dissipation par ressaut hydraulique :	21
I.2.5.4.4.e Bassins à plan rectangulaire et fond horizontal :	21
I.2.5.4.4.f Bassins avec blocs de chute et seuil dentelé (Bassins de type IIUSBR):	22
I.2.5.4.4.g Bassins avec bloc de chute, blocs d'amortissement et seuil terminal continue (Bassins de type IIIUSBR) :	22
I.2.5.4.4.h Bassins avec déflecteurs et seuil terminal continue (Bassins de type IVUSBR) :	23

I.2.5.4.4 Localisation et Position du ressaut :	24
I.2.6 Cas où il n'y a pas de régime uniforme :	24
I.2.7 Cas où le régime aval est uniforme :	25
I.3 Conclusion :	27

Chapitre II : Ressaut hydraulique contrôlé dans un canal rectangulaire

II.1 Introduction :	29
II. 2 Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince.....	29
II.2.1. Approche de Forster et Skrinde (1950) :	29
II.2.2 Etude de Achour et al (2002)	30
II.2.2.1. Essais pour $X \approx L_r$:	30
II.2.2.2. Essais pour $X \cong L_j$:	32
II. 3 Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive	35
II.3.1. Approche de Forster et Skrinde (1950) :	35
II.4 Conclusion :	36

Chapitre III : Ressaut Hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée

III.1 Introduction :	38
III.2 APPROCHEDEKHATTAOUIET ACHOUR (2000)	38
III.2.1 Rapport des hauteurs conjuguées :	38
III.2.2 Rendement du ressaut :	42
III.3 Approche de Riguët (2020) :	43
III.3.1 Rapport des hauteurs conjuguées :	43
III.3.2 Rendement du ressaut hydraulique :	44
III.4 Conclusion :	45

Chapitre IV : Description du model expérimental

VI.1 Introduction :	47
VI.1.1 Description du canal :	47
VI.2 Limnimètre:	50
VI.3 Le seuil à paroi mince :	50

Chapitre V: Etude expérimentale

V.1 INTRODUCTION :	53
V.1.1 Détermination expérimentale de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en lit composé :	53
V.1.2 Description des essais :	53
V.2: Analyse des résultats expérimentaux :	54
V.2.1 Rapport des hauteurs conjuguées :	54
V.3 Rendement du ressaut :	59

V.4 CONCLUSION :	63
CONCLUSION DE LA PARTIE EXPERIMENTALE	64
CONCLUSION GENERALE	65
REFERENCE ET BIBLIOGRAPHIE :	67

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1 : Ecoulement à surface libre.....	5
Figure 1.2 : ressaut hydraulique	6
Figure 1.3: Description du ressaut.....	7
Figure 1.4: Ressaut ondulé	8
Figure 1.5 : Le Pré-ressaut.....	8
Figure 1.6 : Le ressaut de transition	9
Figure 1.7 : Le ressaut stable.....	9
Figure 1.8 : Ressaut agité	9
Figure 1.9 : Schéma d'un ressaut classique	10
Figure 1.10 : Schéma d'un ressaut hydraulique.....	10
Figure 1.11: Courbe expérimentale de l'USBR obtenue par Peterka ,1964 pour la détermination du rapport L/y_2 en fonction de F	12
Figure 1.12 : Courbe expérimentale pour la détermination de la longueur du ressaut tirée de L'encastre.	13
Figure 1.13 : Dissipation d'énergie.....	13
Figure 1.14 : Rendement du ressaut en fonction du nombre de Froude amont par Hager rapport E_2/E_1 , peut aussi être évalué de façon graphique par projection du nombre de Froude amont sur la courbe expérimentale obtenue par l'USBR pour la détermination rapide de l'efficacité de dissipation d'énergie.	15
Figure 1.15 : Courbe expérimentale obtenue par l'USBR pour la détermination du rapport E_2 /E_1 en fonction du nombre de Froude	16
Figure 1.16 : Détermination rapide des caractéristiques du ressaut	16
Figure. 1.17 : Seuil denté de REHBOCK.....	17
Figure 1.18 : Fosse de stabilisation	18
Figure 1.19 : Partiteur à ressaut.....	18
Figure 1.20 : Bassin de dissipation par impact.....	20
Figure 1.21 : Bassin de dissipation par Roller	20
Figure 1.22 : Bassin de dissipation par macro rugosité	21
Figure 1.23 : Bassin avec blocs de chute et seuil dentelé (Bassin de type II USBR)	22
Figure 1.24 : Bassin avec bloc de chute, blocs d'amortissement et seuil terminal continue (Bassin de type III USBR)	23
Figure 1.25 : Bassin avec déflecteurs et seuil terminal continue (Bassin de type IV USBR)	24
Figure 1.26 : Récapitulation des bassins de types USBR Bassins à plan rectangulaire, murs verticaux et fond incliné.....	24
Figure 1.27 : Détermination de la position du ressaut	25

Figure 1.28 : Localisation du ressaut	26
Figure 2.1: ressaut contrôlé par seuil mince.....	29
Figure 2.2: Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince pour quelques valeurs de x/h_2 , selon Forster et Skrinde (1950).	30
Figure 2.3 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de x/h_2	31
Figure 2.4: Variation expérimentale de C_o en fonction de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince.....	31
Figure 2.5 : Contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour $X \cong L_j$	32
Figure 2.6: Variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince($X \cong L_j$)	33
Figure 2.7 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident ($X \cong L_j$).	33
(- - -) courbe tracée selon la relation (2.7).....	33
Figure 2.8 : Variation expérimentale de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude incident F_1 lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ($X \cong L_j$).	34
Figure 2.9: Variation expérimentale de la position relative X/h_1 du seuil à paroi mince en fonction de $(F_1 - 1)$ lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ($X \cong L_j$).....	34
(- - -) courbe tracée selon la relation (2.7).....	34
Figure 2.10 : Résultats expérimentaux de Forster et Skrinde (1950).....	35
Figure 3.1 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit	38
Figure 3.2 : Variation de Y , calculé par (1), en fonction de F_1 : $\beta = 1$	41
Figure 3.3 : Variation Y en fonction de F . (0) : équation 2, (+) : équation 1	41
Figure 3.4 : Variation en fonction de F : $\beta = 1$. Y est calculé par l'équation (3).....	42
Figure 3.5 : Variation en fonction de F_1 . (0) : équation 2, (+) : équation 1	43
Figure.3.6: Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour les deux lits du canal composée.	43
Figure 3.7 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . (0)points de mesures expérimentales en lit majeur ; ($\square$) points de mesures expérimentales en lit mineur.....	44
Figure 4.1 : Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composé	47
Figure 4.2 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.	50
Figure 5.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince.....	53
Figure.5.2 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F pour les deux lits du canal, (Δ) points de mesures expérimentales en lit majeur ; ($\square$) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement	55

Figure.5.3 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F pour les deux cas du canal, (Δ) points expérimentaux ($\square$) Courbes d'ajustement	57
Figure 5.4: Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F pour l'ouverture.....	60
Figure 5.5: Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F pour l'ouverture ($\square$) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement	60
Figure 5.6: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F , pour les quarts configurations. Pour $h_2 / h_1 \geq 1$ et ($h_2 / h_1 < 1$).....	61
Figure 5.7: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F , pour les deux configurations. Pour $h_2 / h_1 \geq 1$. ($\square$) seuil mince, (Δ) marche positive.	61
Figure 5.8: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F , pour les deux configurations. Pour $h_2 / h_1 < 1$	62
Figure 5.9: Variation du rapport η des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F , pour les deux configurations. Pour $h_2 / h_1 < 1$. et $h_2 / h_1 \geq 1$ ($\square$) seuil mince, (Δ) marche positive.	62

LISTES DES PHOTOS

Photo 4.1 : Photographie du model expérimentale du canal.....	48
Photo 4.2 : Pompe centrifuge axial.....	48
Photo 4.3 Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit	49
Photo 4.4 : Section de contrôle.....	49
Photo 4.5 : Photographie de convergent.....	49
Photo 4.6 : Photographie d'une boîte en charge.....	49
Photo 4.7 : Photographie des seuils minces testés.....	51
Photo 4.8 : Photographie des marches positives	51

LISTES DES TABLEAUX

Tableau III.1: Symboles et Notation	39
Tableau V.1: Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(F)$ pour $h_2 / h_1 \geq 1$ et $h_2 / h_1 < 1$	56
Tableau V.2 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(F)$ pour $h_2 / h_1 \geq 1$ et $h_2 / h_1 < 1$	58
Tableau V.3 : les résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du F pour chaque ouverture h	59
Tableau V.4 : les résultats expérimentaux de rendement η en fonction du F pour chaque ouverture h et les mesures de (h_1/B) :.....	60

LISTES DES ANNEXES

Annexe I : Détermination du rapport des hauteurs du ressaut en fonction du nombre de Froude en amont pour un canal rectangulaire horizontal :	69
Annexe II : Dimensionnement des seuils de sortie pour les bassins de dissipation de type UBSR III:	69
Annexe III : Symboles et Notations :	70
Annexe V.1 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(F)$ pour $h_2/h_1 \geq 1$ et $h_2/h_1 < 1$	71
Annexe V.2 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(F)$ pour $h_2/h_1 \geq 1$ et $h_2/h_1 < 1$	73

INTRODUCTION GENERALE

Le ressaut hydraulique est obtenu, suite à la transition de l'écoulement d'un régime torrentiel à un régime fluvial. Ce phénomène peut se produire dans un bassin de dissipation à l'aval d'un ouvrage hydraulique. C'est le moyen le moins onéreux et le plus pratique pour dissiper l'énergie emmagasinée dans cet ouvrage, afin d'éviter d'importantes modifications du lit de la rivière situé à l'aval.

Ces dernières années, le ressaut hydraulique a fait l'objet de nombreuses recherches fondamentales et appliquées. Les recherches expérimentales ont d'abord confirmé que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale.

La bibliographie montre que la modification des conditions à l'amont (débit, hauteurs, ...etc.) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur, ...etc.), peut conduire à différentes configurations de ressaut hydraulique.

Léonard de Vinci, dans l'un des 13000 feuillets où il consignait ses observations sur la Nature, notait : " L'eau qui tombe en ligne perpendiculaire par un tuyau arrondi sur un lieu plan, tracera une onde circulaire autour de l'endroit percuté, à l'intérieur de ce cercle, l'eau se mouvra très rapidement et s'étalera en une couche fort mince autour du point frappé, puis finira par heurter la vague qu'elle a produite qui cherche à retourner au lieu de la percussion."

Le phénomène décrit par De Vinci 500 ans auparavant n'est autre que le Ressaut hydraulique. Ce dernier est le passage d'un régime d'écoulement à forte énergie cinétique à un autre beaucoup plus calme en dissipant de l'énergie et il n'a suscité l'intention des scientifiques qu'au début du XVIIIème siècle. Mais depuis ces cinquante dernières années, le ressaut hydraulique a fait l'objet de nombreuses recherches fondamentales et appliquées tant du point de vue théorique qu'expérimental. En pratique ce sont surtout les dimensions géométriques du bassin de dissipation d'énergie qui intéressent les scientifiques, ces dimensions sont étroitement liées aux caractéristiques du ressaut et à la forme géométrique du canal dans lequel il évolue.

Les recherches expérimentales ont d'abord validé le fait que le ressaut hydraulique soit régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. C'est-à-dire l'application de la seconde loi de Newton, énonçant que la variation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut hydraulique est égale à la résultante des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement. L'application de cette dernière a eu pour but d'évaluer

Introduction générale

le rapport des hauteurs du ressaut en fonction du nombre de Froude caractérisant l'écoulement amont. La résolution la plus simple de ce système est celle obtenue par BELAN GER en an 1828. Les scientifiques ont aussi établi des relations permettant la détermination des autres caractéristiques du ressaut tel que la longueur et la quantité de dissipation d'énergie.

Le but de notre travail est l'étude de l'effet de la marche positive sur les hauteurs Conjuguées du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée
Pour notre cas il s'agit contribution à l'étude de l'effet de la marche positive sur les hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée

Par ailleurs, le ressaut hydraulique contrôlé par marche n'a connu que très peu d'études, ces derniers concernent surtout le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive en canal rectangulaire. Les études les plus connues dans ces domaines sont certainement celles de Forster et Skrinde (1950), de Hager et Sinniger (1985) et de Hager et Bretz (1987), qui ont concerné le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive dans un canal de section droiterectangulaire.

Ce travail est composé de deux parties principales qui se résument comme suit :

- ***Première partie : étude bibliographique.***

Deuxième partie : étude expérimentale, qui a été faite au sien du **Laboratoire d'Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS) Université BISKRA**

Ce travail est composé de deux parties principales qui se résument comme suit :

- **Introduction générale**
- **Première partie :** étude bibliographique
- **Deuxième partie :** étude expérimentale. Au sien de Laboratoire d'Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS) Université BISKRA
- Ce travail est composé de cinq chapitres :
- **Chapitre I :** La théorie du ressaut
- **Chapitre II :** Ressaut hydraulique contrôlé dans un canal rectangulaire
- **Chapitre III :** Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée
- **Chapitre IV :** Description du model expérimental
- **Chapitre V :** Etude expérimentale
- **Conclusion générale**

INTRODUCTION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE :

La première partie de notre étude bibliographique a pour but principal, de passer en revue les travaux les plus intéressants, ayant abordé le ressaut hydraulique dans quelques canaux prismatiques cités sous les trois chapitres cités dans la partie bibliographique suivante :

- **Chapitre I : La théorie du ressaut**
- **Chapitre II : Ressaut hydraulique contrôlé dans un canal rectangulaire**
- **Chapitre III : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée**

Chapitre I: La théorie du ressaut

I.1 Ecoulement à surface libre :

Nous désignons par écoulements à surface libre, les écoulements dans lesquels le fluide qui s'écoule est en contact avec l'atmosphère. Cette configuration apparaît dans les canaux, les rivières ou les grandes étendues d'eau, la difficulté majeure que revêt ce type d'écoulement est la détermination des caractéristiques de la surface libre à savoir : position, forme, vitesse...etc. Les écoulements à surface libre sont classés en différents types :

- Ecoulement uniforme et non-uniforme : L'écoulement est uniforme si pour une longueur donnée du canal, la vitesse, la profondeur, la pente et la section du canal restent constantes :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad , \quad \frac{\partial Y}{\partial t} = 0$$

Dans ce cas la ligne de charge, la surface d'eau ainsi que le radier sont parallèles. Dans le cas contraire l'écoulement est dit non uniforme.

- Ecoulement permanent et non-permanent : Si les caractéristiques de l'écoulement à savoir Vitesse, profondeur, débit, restent constantes dans une section du canal, et ne changent pas par rapport au temps, l'écoulement est dit permanent :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad , \quad \frac{\partial Y}{\partial t} = 0$$

Ces écoulements peuvent être graduellement ou brusquement variés. Si les dimensions, les formes, la rugosité, la pente du canal varient de façon progressive alors l'écoulement est dit graduellement varier, dans le cas contraire, il est appelé brusquement ou rapidement varié.

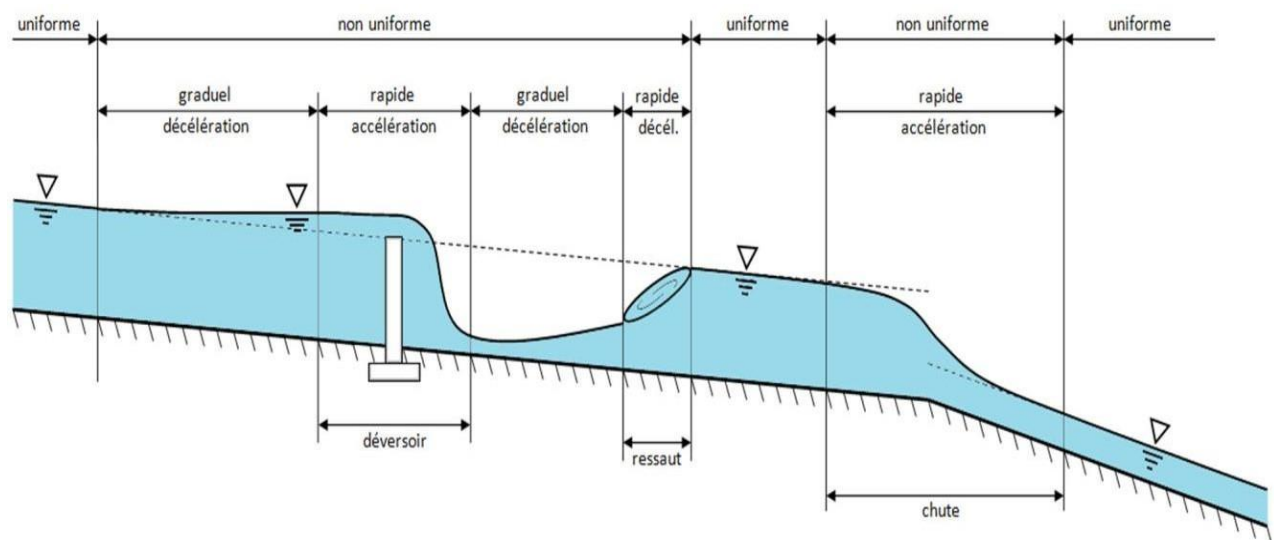


Figure 1.1 : Ecoulement à surface libre

I.2 Ressaut hydraulique :

I.2.1 Définition :

Le ressaut hydraulique est un phénomène couramment observé lors d'écoulements hydrauliques à ciel ouvert représentés par une surélévation brusque (écoulement rapidement varié) de la surface libre d'un écoulement permanent, qui se produit lors du passage du régime torrentielle (Super - critique) au régime fluvial (sous-critique). Cette transition est souvent brutale et turbulente avec généralement inclusion dans l'eau de multiples bulles d'air donnant au ressaut un aspect bouillonnant. Selon B.N. Hewakan damby et W.B. Zimmerman(2000), ce phénomène est accompagné d'une agitation marquée et d'une grande perte d'énergie.



Figure 1.2 : ressaut hydraulique

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse, continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative. Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau à l'aval, de contrôler sa position lors du changement des paramètres de l'écoulement tels que le débit et de contribuer en fin à une meilleure compacité du bassin (S Kateb, 2013).

L'étude du ressaut contrôlé a concerné essentiellement le canal rectangulaire en raison sans doute de sa simplicité géométrique et de sa facilité de mise en œuvre. Elle a eu pour but principal de définir la relation fonctionnelle liant les divers paramètres influençant le phénomène. Les principales études connues à l'heure actuelle ont certainement celle de Forester et Skrinde et celle encore plus récente de Achour et Khattaoui.

I.2.2 Description du phénomène :

D'après Frédéric Murzy et Hubert Chanson(2009), lorsque le fluide subit une perte importante de vitesse, la surface de l'écoulement s'élève brusquement. L'énergie cinétique est transformée en énergie potentielle et en turbulence, qui se traduit par des pertes irréversibles de charge. Le flot, qui était

rapide, ralentit et s'empile sur lui-même à la manière d'une onde de choc supersonique.

Ce phénomène dépend de la vitesse initiale du fluide. Si cette vitesse est inférieure à la vitesse critique, aucun ressaut n'est possible. Lorsque la vitesse du liquide n'est pas nettement supérieure à la vitesse critique, la transition apparaît comme un système d'ondes. Si la vitesse du flot devient plus grande, la transition est de plus en plus abrupte, jusqu'à ce que la zone de transition se brise et s'enroule sur elle-même. Lorsque ce phénomène se produit, le ressaut apparaît, en conjonction avec une violente turbulence, la formation de rouleaux et de vagues. Nous passerons donc d'une profondeur $h < h_c$ à une profondeur $h > h_c$ où h est la hauteur critique au niveau du ressaut comme le démontre la figure I.3.

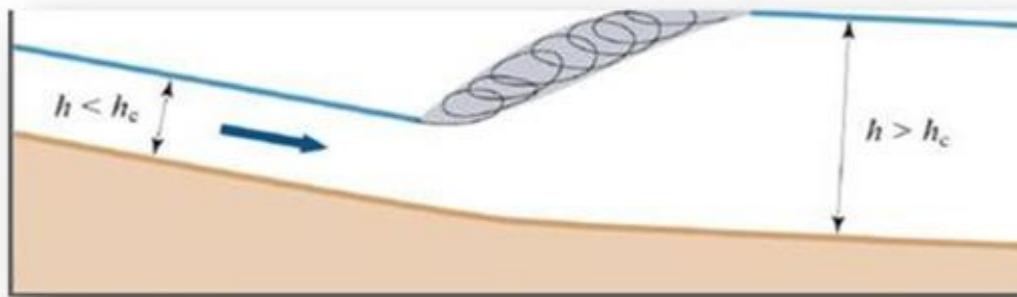


Figure 1.3: Description du ressaut

I.2.3 Apparition des ressauts :

Les ressauts apparaissent fréquemment dans la nature, par exemple dans les torrents de montagne ou dans les rivières, à ne pas confondre avec les mascarets qui se produisent en mer.

Ils peuvent aussi se produire dans un évier ou un lavabo, où nous observons la formation d'un ressaut circulaire. Nous pouvons aussi recréer des ressauts hydrauliques en laboratoire. Ces ressauts dits "classique" se forment dans un canal horizontal, de section rectangulaire et dont le fond est lisse. C'est ce type de ressaut qui sera étudié dans ce document.

Ils peuvent aussi apparaître lors de la rupture de la digue d'un barrage, du déversement de l'excédent d'eau d'un barrage, de l'évacuation du débit d'une crue ou de l'écoulement à travers un barrage déversoir.

De façon générale, le ressaut nécessite que certaines conditions soient rencontrées afin qu'il se réalise. Ces conditions sont le respect de l'équation de continuité et de l'équation dite "impulsion-quantité de mouvement".

I.2.4 Classification des ressauts :

La classification du ressaut est basée sur la variation du nombre de Froude F caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut.

Pour les valeurs de $F=1$, le régime est lent, ou critique, et il n'y a pas de ressaut.

D'après Andersen (1978), Pour des valeurs du nombre de Froude compris entre 1 et 1.7, la différence des profondeurs conjuguées en amont et en aval est très faible, et le ressaut est caractérisé par de légères rides à la surface libre, ce type de ressaut est dit ondulé.

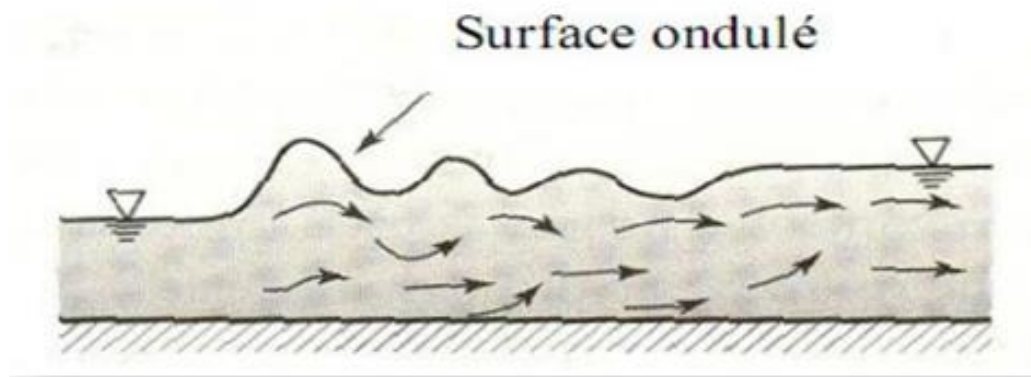


Figure 1.4: Ressaut ondulé

Selon Armando L'encastre, le ressaut hydraulique peut prendre plusieurs formes et approuve la classification de Bradly et Peterka (1957) qui préconisent quatre formes du ressaut hydrauliques el on le même principe d'Andersen (1978):

I.2.4.1 Le Pré-ressaut ou le ressaut faible :

Il sévit lorsque $1,7 < F < 2,5$. Pour un nombre de Froude avoisinant les 1.7, La surface du ressaut est alors composée d'une série de petits rouleaux, ces derniers s'intensifient au fur et à mesure qu'elle nombre de Froude F augmente.

La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement de dissipation obtenu est très faible.

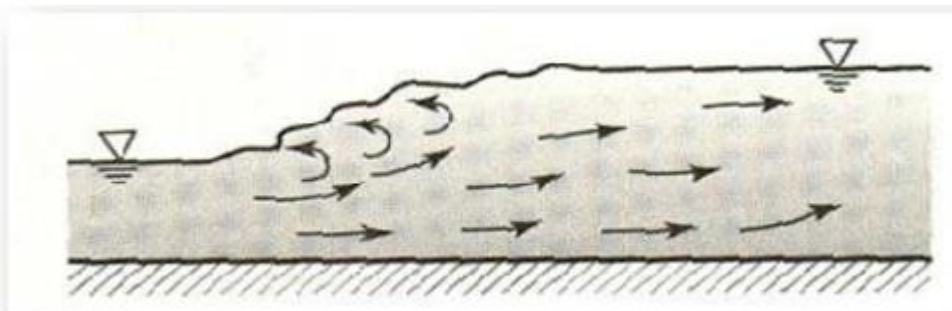


Figure 1.5 : Le Pré-ressaut

I.2.4.2 Le ressaut de transition ou oscillatoire :

Il est remarqué pour $2,5 < F < 4,5$ Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

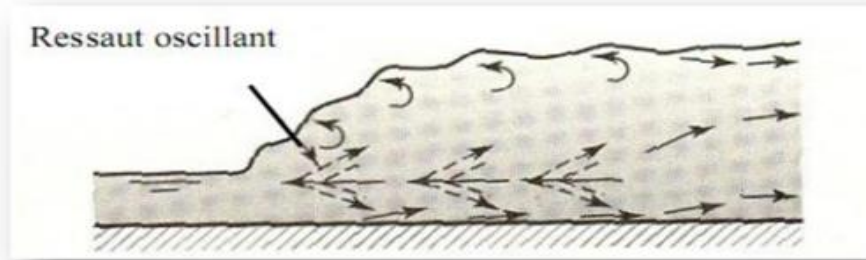


Figure 1.6 : Le ressaut de transition

I.2.4.3 Le ressaut stable ou établi :

Obtenu pour $4,5 < F < 9$. Ce type de ressaut est dit établi et est souvent utilisé dans les bassins de dissipation et ce pour plusieurs raisons, entre autres :

- Pour son rendement élevé lors de la dissipation d'énergie et qui peut atteindre les 70%.
- Pour la compacité des formes.
- Pour sa stabilité.

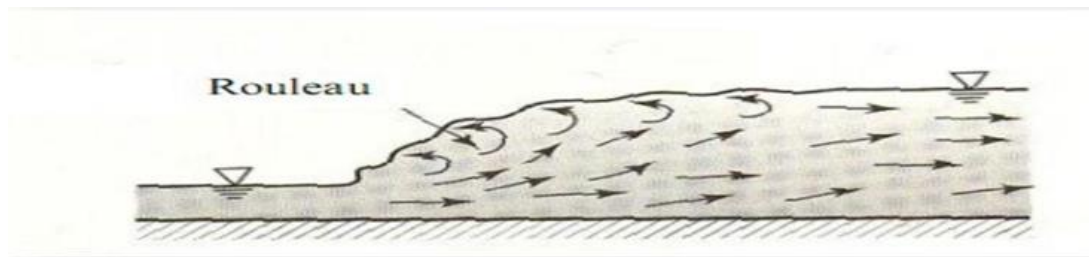


Figure 1.7 : Le ressaut stable

I.2.4.4 Le ressaut agité (Fort) :

Il se vit pour $F > 9$. Il est caractérisé par un écoulement amont ayant une très faible profondeur et une vitesse relativement élevée. Il présente une instabilité verticale du moment qu'il ne peut pas adhérer constamment au fond du canal ainsi qu'une surface libre irrégulière et très écumeuse.

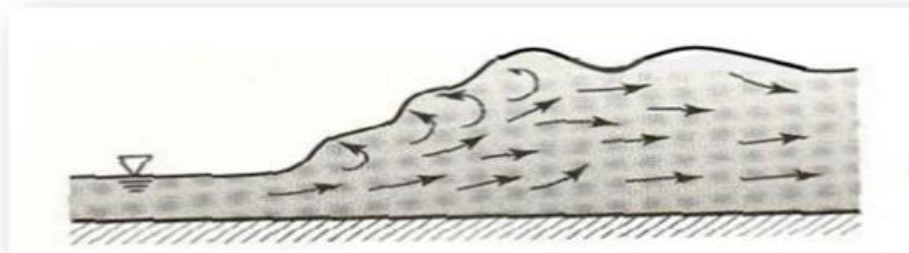


Figure 1.8 : Ressaut agité

Remarque :

Le ressaut considéré dans cette étude est le ressaut dit classique, celui étudié dans un canal horizontal rectangulaire ayant un fond lisse et dont le débit et la rugosité de meurent constants.

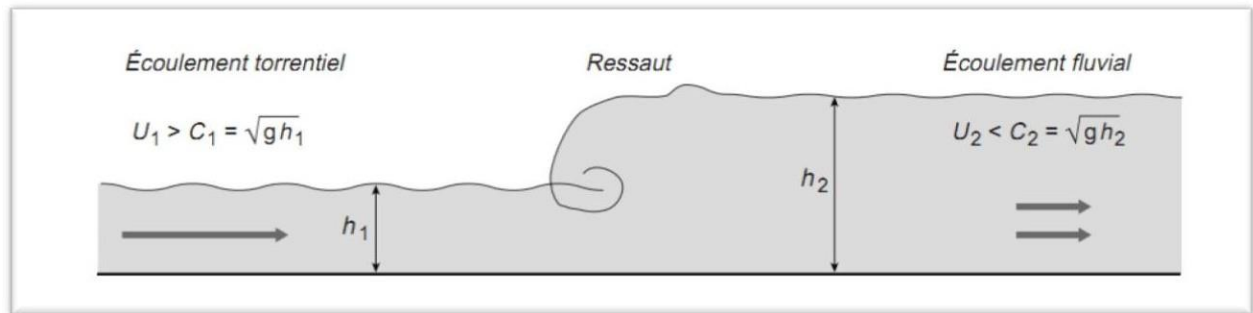


Figure 1.9 : Schéma d'un ressaut classique

I.2.5 Caractéristiques du ressaut hydraulique :

Le ressaut hydraulique est caractérisé par trois (03) paramètres à savoir :

- Ses hauteurs conjuguées.
- Sa longueur.
- Sa capacité de dissipation d'énergie.

I.2.5.1 Hauteurs conjuguées du ressaut :

Le ressaut est un phénomène qui suscite une perte de charge très importante et indéfinie aux abords de ses sections initiales et finales ce qui rend l'équation de Bernoulli inutilisable pour la détermination des paramètres du ressaut. Cela dit le théorème d'Euler sera d'un grand secours pour la résolution du problème posé par l'identification des paramètres d'un ressaut et ce, parce que le théorème d'Euler fait intervenir les forces extérieures qui ne mettent pas en cause la perte de charge due à la turbulence et aux remous intérieures à la masse liquide.

D'après Michel Carlier (1972) le ressaut est analogue à un élargissement brusque qu'il est donc parfaitement justiciable du théorème d'Euler et donc la variation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut sera égale à la somme des forces extérieures s'agissant sur l'écoulement d'où l'importance de l'équation de continuité.

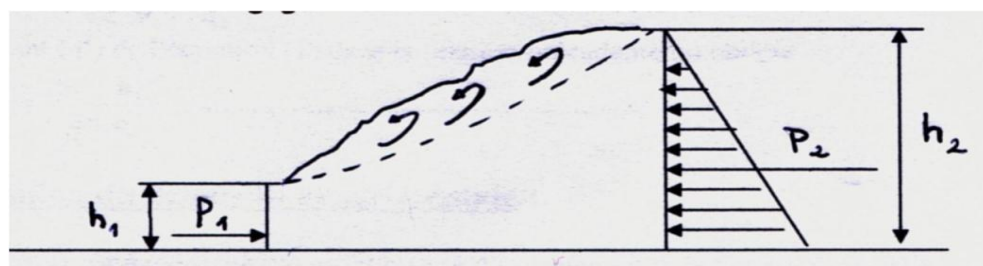


Figure 1.10 : Schéma d'un ressaut hydraulique

La hauteur du ressaut a été définie comme étant égale à : $h = h_2 - h_1$

La validité de ces solutions a été vérifiée par plusieurs auteurs notamment De Babèche et Achour (2007).

Le rapport des hauteurs conjuguées a fait l'objet de nombreuses mesures. La mesure de la Profondeur

Après le ressaut est rendue ardue par les fluctuations de la surface libre d'un ressaut qui se répercutent assez loin en aval de celui-ci.

La profondeur en amont du ressaut est stable ; en revanche, sa valeur peut être très faible, ce qui pose un problème de précision de mesure. Des études existent quant à la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude, nous citons notamment Achour(2007).

Un abaque pour la détermination du rapport des hauteurs du ressaut en fonction du nombre de Froude en amont est donné en (**Annexe I**)

Plusieurs auteurs notamment (Leutheusser & Kartha, 1972), (Resch & Leutheusser, 1971, 1972), (Resch *et al*, 1976) ont mentionné une tendance des mesures expérimentales du rapport des hauteurs conjuguées à être légèrement inférieures aux valeurs prévues par la relation de Belanger.

I.2.5.2 Longueur du ressaut :

La longueur du ressaut dite L est la distance entre les deux hauteurs conjuguées h_1 et h_2 , de toute évidence, si le début d'un ressaut est relativement facile à identifier, la fin d'un ressaut est très difficile à définir. De nombreux critères ont été proposés par divers auteurs et dont l'avis diverge quant à l'identification de la fin du ressaut, en effet Hager (1990) a conseillé de laisser la position de la fin du ressaut là où l'ébullition de surface disparaît. A ce stade, les poches de bulles d'air remontent à la surface indiquant la fin de la zone de dégazage, de toute évidence, le niveau de turbulence diminue ensuite de manière significative et indique la fin du ressaut. Tandis que Posey et Hsing (1938) qui avaient travaillé sur les canaux trapézoïdaux ont stipulé que la fin du ressaut était compatible avec la diminution des grosses perturbations de la surface libre.

La longueur L sur laquelle s'effectue le ressaut détermine la longueur de protection qu'il faut assurer aux berges du cours d'eau ou encore la longueur du bassin de dissipation.

Cette valeur n'a pu être évaluée analytiquement, d'où l'utilisation de relations empiriques ou de courbes expérimentales. Analytiquement parlant, les formules les plus utilisées sont :

- Formule MIAMIDISTRICT: $L=5.(H_2-H_1)$
- Formule de SAFRANEZ: $L=0,45. H_2$
- Formule de SMETANA : $L=6.(H_2-H_1)$

Les essais de Bradly et Peterka (1957) ont permis à Hager et al. (1990) de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur du ressaut en fonction de la hauteur conjuguée en amont et qui peut s'écrire :

$$L/h = 220.Tgh [(F-1)/22] \quad (1.1)$$

Ces mêmes essais lui ont aussi permis d'émettre une relation donnant la longueur du ressaut par rapport la hauteur conjuguée mais applicable seulement pour $Fr > 4$:

La longueur du ressaut peut aussi être déterminée via des courbes expérimentales indiquant la variation du rapport L/y_1 , L/y_2 ou $L/(y_2-y_1)$ en fonction de F .

Les courbes obtenues par l'U.S. Bureau of Réclamation (Peterka, 1964) sont les mieux connues. Elles donnent le rapport L/y_1 ou L/y_2 en fonction de F .

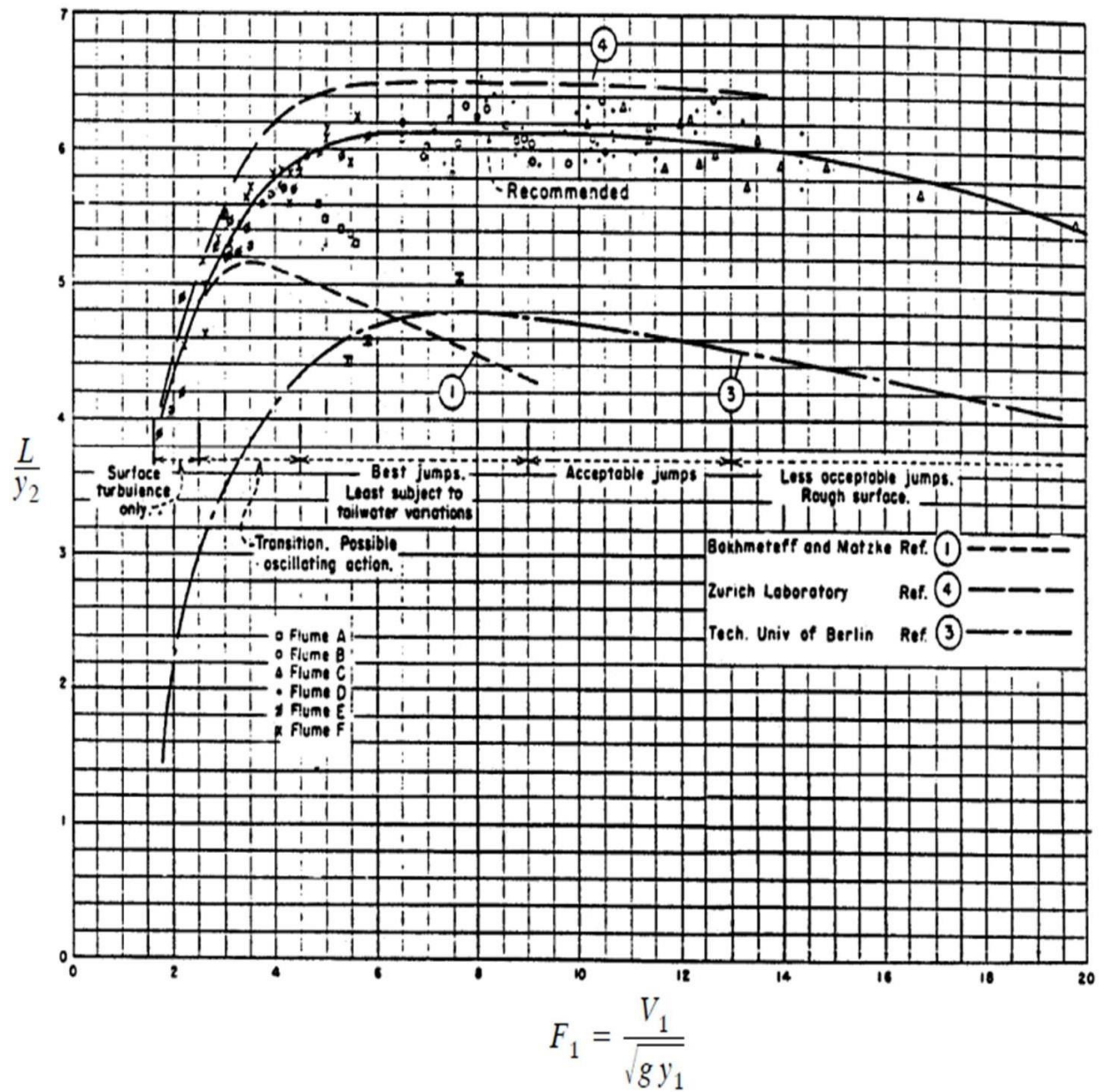


Figure 1.11: Courbe expérimentale de l'USBR obtenue par Peterka ,1964 pour la détermination du rapport L/y_2 en fonction de F

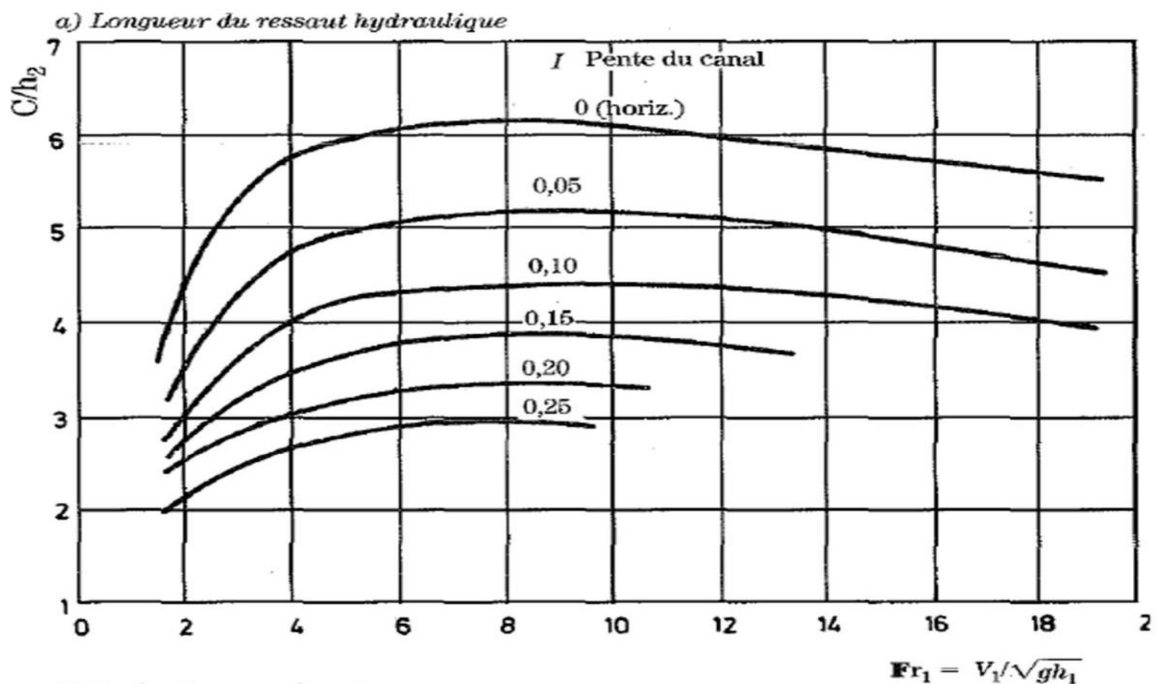


Figure 1.12 : Courbe expérimentale pour la détermination de la longueur du ressaut tirée de L'encastre.

I.2.5.3 Dissipation d'énergie :

L'une des caractéristiques majeures du ressaut est sa capacité de dissipation d'énergie. En effet l'écoulement à la base torrentiel doit dissiper son énergie pour gagner en hauteur et se transformer en un écoulement fluvial.

La perte d'énergie due au ressaut est la différence entre les énergies spécifiques à l'amont et à l'aval du ressaut soit $\Delta H = H_1 - H_2$.

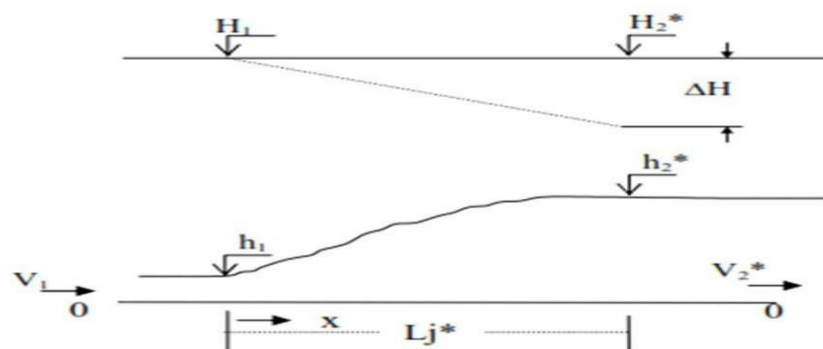


Figure 1.13 : Dissipation d'énergie

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

$$F = Q\sqrt{gb^2 h_1^3} \quad (1.2)$$

Le rendement du ressaut représente sa capacité de dissipation, et est égale au rapport de la perte de charge totale entre le pied et la fin du ressaut et de la charge totale au pied de celui-ci (*Hager et Sinniger, 1985, 1986*).

$$\eta = \Delta H / H_1 \quad (1.3)$$

Ou: $\Delta H = H_1 - H_2 \quad (1.4)$

Avec :

$$H_1 = h_1 + \alpha_1 \quad (1.5)$$

$$H_2 = h_2 + \alpha_2 \quad (1.6)$$

- α_1 et α_2 étant les paramètres de Coriolis.
- H : Charge critique (m)
- h_1 : Hauteur initiale du ressaut [m]
- h_2 : Hauteur finale du ressaut [m]

Nous aurons donc :

$$\Delta H = h_1 + \alpha_1 - h_2 + \alpha_2 \quad (1.7)$$

En raison du caractère permanent de l'écoulement

$$Q = \Leftrightarrow A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1.8)$$

Ou: $A_1 = b h_1$ et $A_2 = b h_2$

Injectons les relations (1.4), (1.5) et (1.6) dans l'équation (1.3) :

$$S_1 = b \cdot h_1 \text{ et } S_2 = b \cdot h_2$$

Or d'après l'équation de quantité de mouvement, pour un canal rectangulaire en remplace :

$$\Delta H = (h_1 - h_2) + (h_1^{-1} - h_2^{-1}) \quad Q^2 = 2g \quad (1.9)$$

$q = Q/b$, est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'équation de la quantité de mouvement ;

$$\frac{q}{2q} = h_1 h_2^2 + h_1 h_2 / 4 \quad (1.10)$$

Ainsi, en tenant compte de (1.8), l'équation (1.9) s'écrit sous sa forme définitive :

Nous aurons au final :

$$\Delta H = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 h_1 h_2} \quad (1.11)$$

La relation (1.11) exprime la perte de charge due au ressaut classique en fonction des hauteurs conjuguées de celui-ci.

Prenons en compte l'équation (1.2) ainsi que l'équation de continuité. Les charges totales initiale et finale du ressaut, définies par les équations (1.6), peuvent s'écrire respectivement : $v = QA$. Peuvent s'écrire respectivement :

$$H_1 = h_1 (1 + F_1^2) / 2 \quad (1.12)$$

$$H_2 = h_1 (Y + F_1^2 / 2Y^2) \quad (1.13)$$

Où, est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par l'équation :

($Y = h_2 / h_1 = 0.5 \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1$) de *Belanger*. Ainsi, le rendement s'écrit : $Y = h_2 / h_1$

$$\eta = \Delta H / H_1 = (H_1 - H_2) / H_1 = 1 - H_2 / H_1 \quad (1.14)$$

Soit :

$$\eta = 1 - \frac{Y + F_1^2 / 2Y^2}{1 + F_1^2 / 2} \quad (1.15)$$

Nous exprimons souvent la capacité de dissipation du ressaut par le rapport $\eta \Delta H / H$ qui représente son rendement, L'efficacité de dissipation η est alors égale à :

$$\eta = \frac{(1 - \sqrt{2})^2}{F_1} \quad (1.16)$$

Cette efficacité peut être évaluée de façon analytique et ne dépend que de F_1 . En effet, dans le cas du canal rectangulaire, le rapport E_2 / E_1 peut s'exprimer ainsi :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (1.17)$$

Toutefois, Hager et Sinniger ont proposé une expression approchée du rendement de dissipation applicable pour $F_1 > 2$, cette expression s'écrit :

$$\eta = (1 - \sqrt{2F})^2$$

Cette même formule a donné naissance à un abaque permettant de déterminer le rendement pour des nombres de Froude amont au-delà de 2.

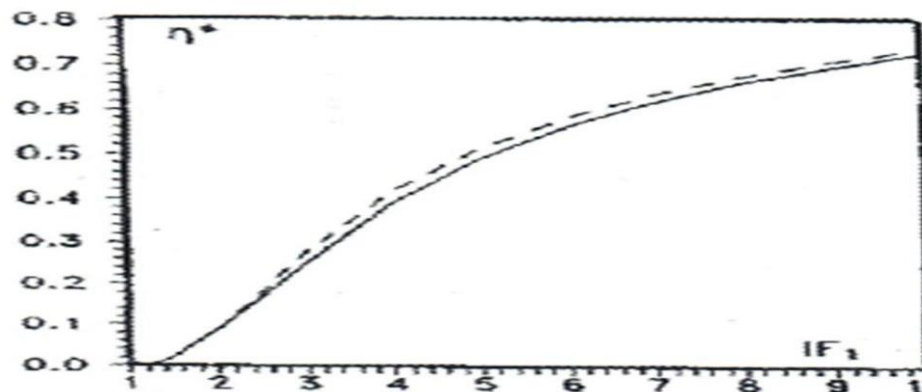


Figure 1.14 : Rendement du ressaut en fonction du nombre de Froude amont par Hager rapport E_2/E_1 , peut aussi être évalué de façon graphique par projection du nombre de Froude amont sur la courbe expérimentale obtenue par l'USBR pour la détermination rapide de l'efficacité de dissipation d'énergie.

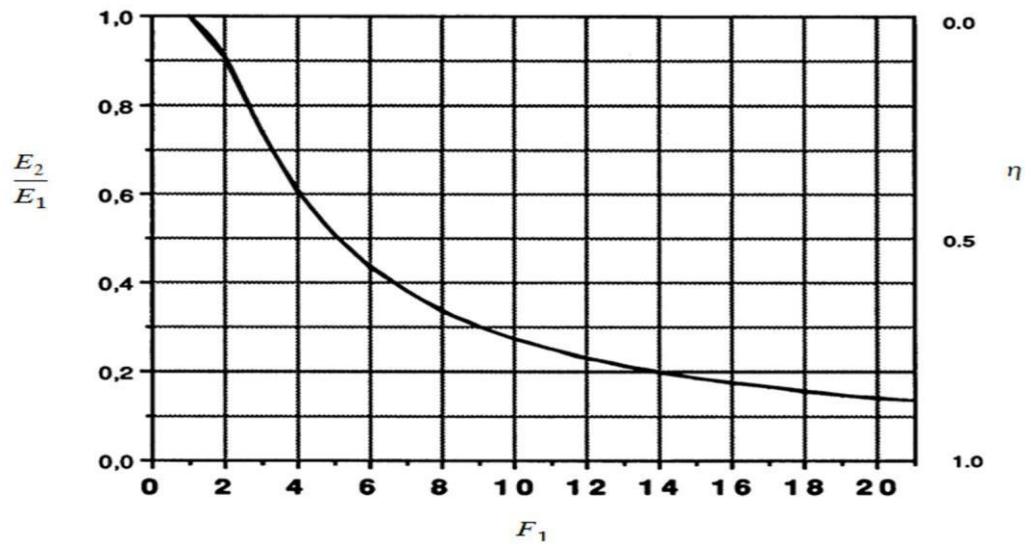


Figure 1.15 : Courbe expérimentale obtenue par l'USBR pour la détermination du rapport E_2/E_1 en fonction du nombre de Froude

Remarque : Plusieurs abaques existent pour la détermination rapide des caractéristiques d'un ressaut par projection simple du nombre de Froude de l'écoulement torrentiel, ces abaques permettent de déterminer à la fois le type du ressaut, sa longueur ainsi que la perte d'énergie provoquée.

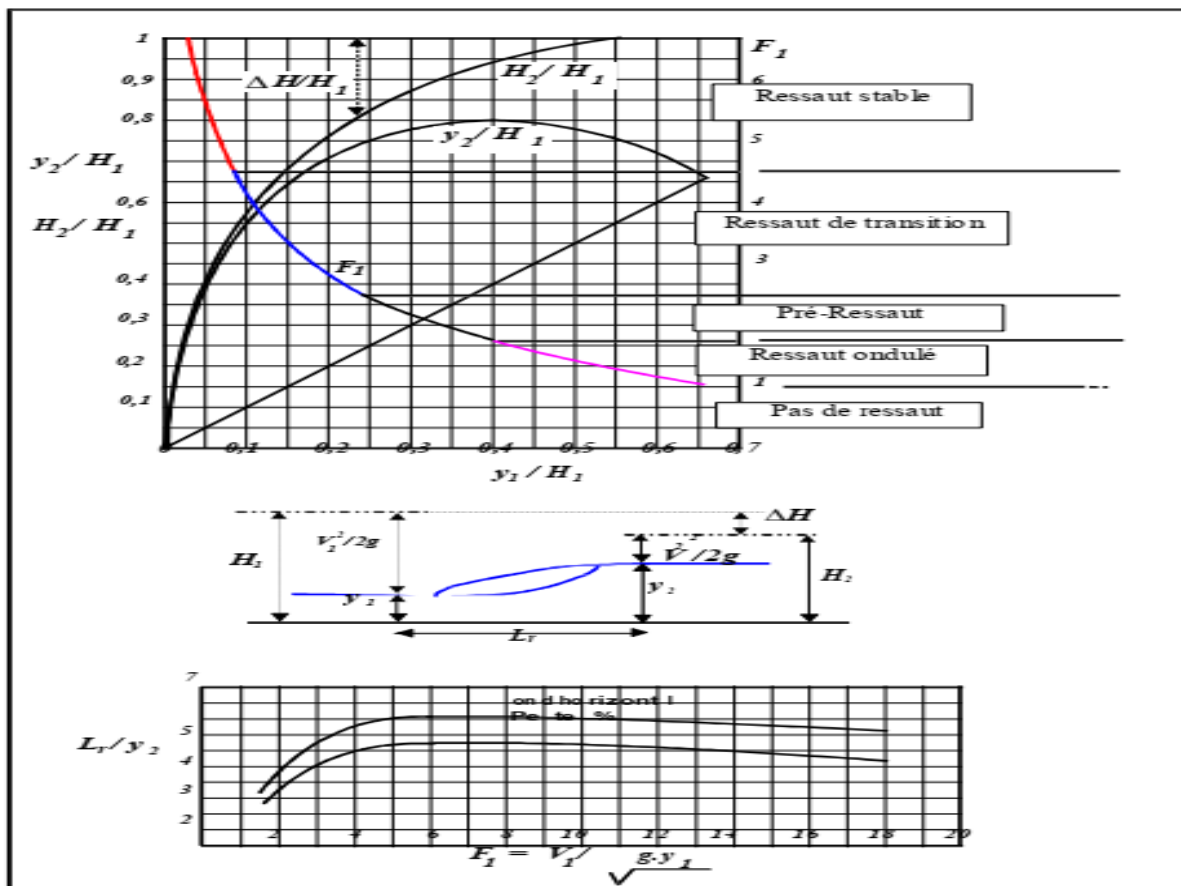


Figure 1.16 : Détermination rapide des caractéristiques du ressaut

I.2.5.4 Utilisation du ressaut :

Comme nous l'avons mentionné en section, le ressaut entraîne une perte d'énergie appréciable, par ailleurs les vitesses à l'aval du ressaut autrement dit en régime fluvial sont très inférieures aux vitesses issues de la section amont c'est-à-dire en régime torrentiel.

Ces propriétés font utiliser le ressaut comme dissipateur d'énergie quelle qu'elle soit cinétique ou bien totale, par exemple pour réduire la vitesse de la lame d'eau en aval du coursier d'un évacuateur de crue ou d'une vanne de fond.

Nous nous heurtons alors à deux types de difficultés. La première est que la plupart des canaux ont une pente non-négligeable et les formules établies précédemment en chapitre I donnent alors des résultats douteux. Dans ce cas, il faut procéder à une étude sur modèle réduit pour avoir des résultats précis.

Une deuxième difficulté réside dans le fait que la position et la longueur du ressaut varient en fonction du débit, il est donc intéressant d'essayer de stabiliser dans la zone protégée.

Pour stabiliser le ressaut au voisinage du pied d'ouvrage pour les différents débits possibles REHBOCK a préconisé un dispositif en forme des évidente. Nous pouvons aussi approfondir le radier du canal en réalisant une fosse de stabilisation du ressaut.

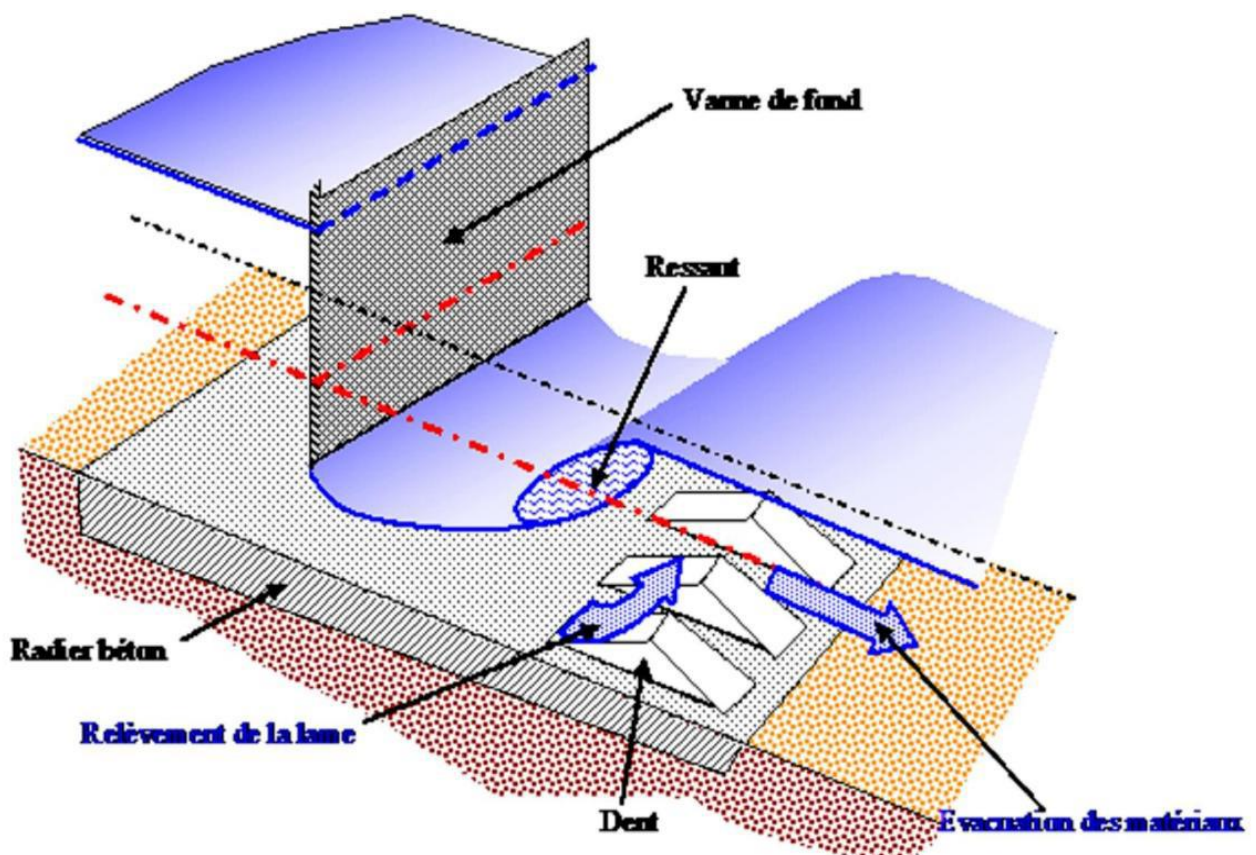


Figure. 1.17 : Seuil denté de REHBOCK

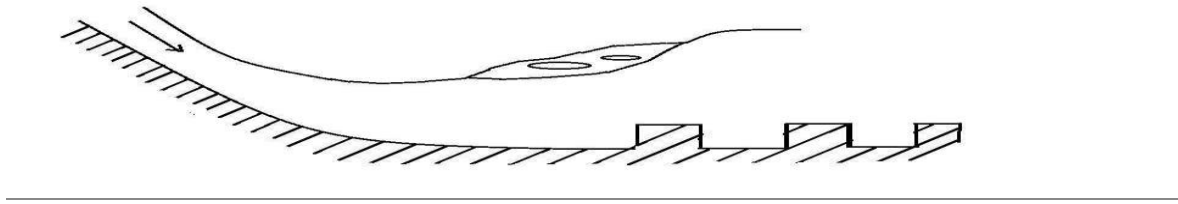


Figure 1.18 : Fosse de stabilisation

Par ailleurs, le ressaut obligeant la surface libre à traverser brusquement le niveau critique, réalise de ce fait une sorte de coupure hydraulique entre les deux biefs, en particulier pour un débit et une section de forme donnée, la profondeur critique est imposée. Si la profondeur h_1 est fixée, la profondeur conjuguée h_2 sera unique et donnée par l'équation.

Cette propriété a été mise à profit dans un partiteur pour canaux d'irrigation réalisé par une société française de fabrication d'équipements hydraulique nommée "NEYRPRIC".

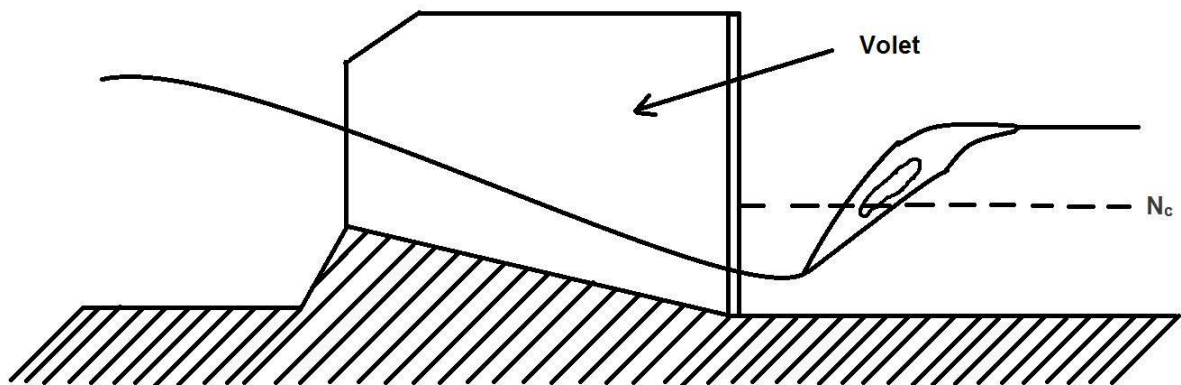


Figure 1.19 : Partiteur à ressaut

Les débits dérivés à l'aval du partiteur sont indépendants de la pente ou du niveau dans le bief aval, ce qui évite la fraude des usagers qui tenteraient d'augmenter artificiellement la pente du bief aval pour accroître le débit dérivé dans leurs rigoles. En effet la ligne d'eau à l'amont du ressaut en régime torrentiel est sous la dépendance de l'amont et la ligne d'eau en aval du ressaut c'est-à-dire en régime fluviales sous la dépendance de l'aval.

Dans ces conditions, toutes perturbations apportées à l'aval par exemple en modifiant la pente de la rigole provoquent une modification de la ligne d'eau aval et un léger déplacement du ressaut au droit du volet où se produit la répartition des débits, les débits dérivés ne sont donc pas modifiés.

Nous trouvons une application analogue du ressaut dans le module à masque où la présence d'un ressaut à l'aval du masque réalise la coupure hydraulique qui interdit la fraude. Le ressaut est aussi utilisé comme mélangeur du fait de son action violente dans les rouleaux qui brassent l'eau avec l'air ou avec un autre fluide contenant des produits chimiques ajoutés par exemple.

I.2.5.4.1 Définition de Dissipation d'énergie :

La dissipation désigne le phénomène selon lequel un système dynamique perd de l'énergie au cours du temps. Cette perte est principalement des eaux frottements et aux turbulences, et l'énergie correspondante est alors dégradée en chaleur, une forme d'énergie qui ne pourra pas être intégralement retransformée en énergie mécanique, comme l'affirme le deuxième principe de la thermodynamique.

I.2.5.4.2 Généralités sur le phénomène :

Afin de minimiser les effets des perturbation traduites dans les régimes naturels par l'exécution d'un aménagement hydraulique il faut que la restitution des débits s'effectue dans des conditions qui sera approchante plus possible des conditions naturelles, ainsi il est nécessaire que l'excédent d'énergie créée par l'exécution de l'aménagement se dissipe, sans que se produisent dans le lit du fleuve en aval des ouvrages des érosions significatives qui pourraient affecter la stabilité de l'ouvrage en question, cette dissipation d'énergie est la transformation d'une partie de l'énergie mécanique de l'eau en énergie de turbulences et à la fin en chaleur, sous l'effet du frottement intense de l'écoulement et du frottement de celui-ci sur les parois.

Les types de structures les plus souvent adoptés pour atteindre cet objectif ont les suivants :

- a) Bassins de dissipation par impact
- b) Bassins de dissipation par roller
- c) Bassins de dissipation par Macro rugosité
- d) Bassins de dissipation par ressaut hydraulique

Outre ces types, il est également adopté des structures du type saut de ski, chute libre, et jets croisés. Pour choisir le type de structure de dissipation d'énergie il faut tenir compte de tout un ensemble de facteurs par miles quels les plus importants sont : la topographie, la géologie, l'hydrologie, le type de barrage et naturellement les considérations d'ordre économique.

Remarque :

Dans ce document, nous allons citer les différents bassins de dissipation mais, nous allons seulement nous intéresser à ceux dits par ressaut hydraulique.

I.2.5.4.3 Types de bassins de dissipation :

I.2.5.4.4.a Bassins de dissipation d'impact :

Ce sont des structures de petites dimensions mises au point par l'USBR, elles sont recommandées pour les décharges de fond et les structures de drainage, La vitesse d'entrée ne doit pas dépasser 9m/set le diamètre de la conduite peut aller jusqu'à 1.80 m. cette structure n'exige pas d'enrochement de protection en aval.

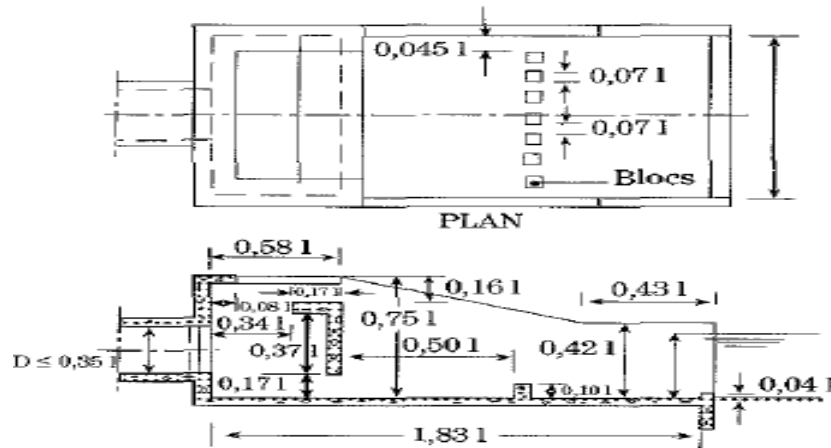


Figure 1.20 : Bassin de dissipation par impact

I.2.5.4.4.b Bassins de dissipation par rollerou par buckets :

Lorsque le niveau d'eau en val est substantiellement plus élevé que le niveau conjugué du ressaut qui se formerait dans un bassin de dissipation avec fond sensiblement à la cote du lit, il est recommandé d'utiliser des structures de dissipation du type Bucket submergé deux types de buckets submergées ont été fréquemment adoptés :

- Des buckets Solides ;
- Des buckets avec déflecteurs ;

Dans les buckets solides, l'écoulement à la sortie de la lèvre est entièrement dirigé vers le haut et forme à la surface de l'eau un matelas et deux rouleaux l'un situé sur le bucket et l'autre immédiatement en aval près du lit. Dans les buckets avec déflecteurs, l'écoulement à la sortie est en partie dirigé vers le haut par les déflecteurs, il passe en partie entre les déflecteurs et est dirigé davantage horizontalement que vers le haut, nous obtenons ainsi une grande dispersion de l'écoulement.

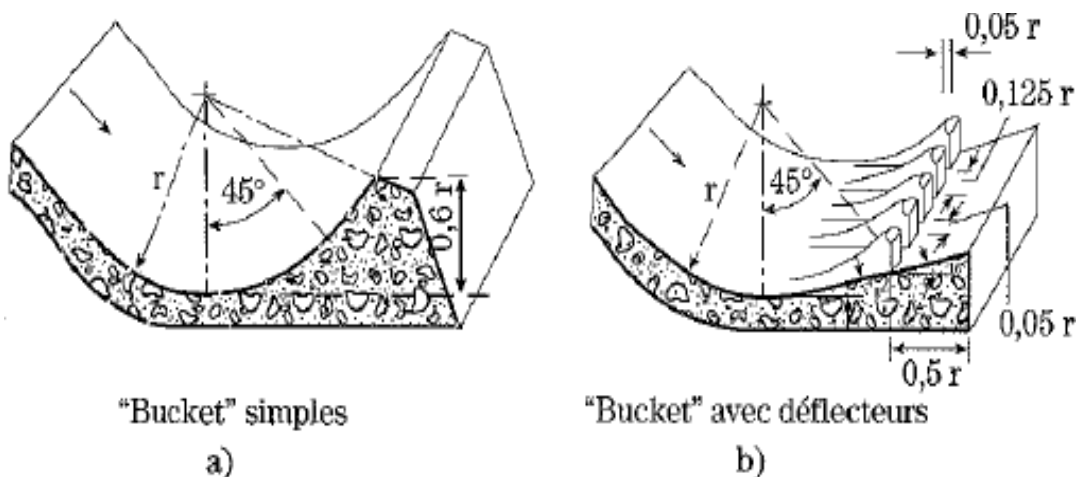


Figure 1.21 : Bassin de dissipation par Roller

I.2.5.4.4.c Bassins de dissipation par macro rugosité :

Elles ont été principalement utilisées dans les canaux, la structure la plus fréquemment adoptée pour ce type est celui correspondant à la Macro rugosité à blocs, leur emploi est limité à de faibles débits

par unités de largeur et aux régions où il ne se forme pas de glace et où nous ne prévoyons pas la présence de corps flottants. La possibilité de cavitation sur les blocs impose une limitation du débit max admissible.

D'après Le castre, Le débit déversé par unité de largeur "q" ne doit pas dépasser les $5.6 \text{ m}^2/\text{s}$ et la vitesse d'amenée "U" doit être inférieure à la vitesse du régime critique :

$$Q < 5.6 \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{et} \quad U = (g \times q)^{1/3}$$

Les conditions optimales de fonctionnement correspondent à $U = (g \times q)^{1/3}$

Le même auteur a préconisé une hauteur minimum le des blocs sensiblement égaux à $0.8 \times$ la hauteur d'eau critique dans le bassin c'est dire $H_{\min} = 0.8 \times h_c$.

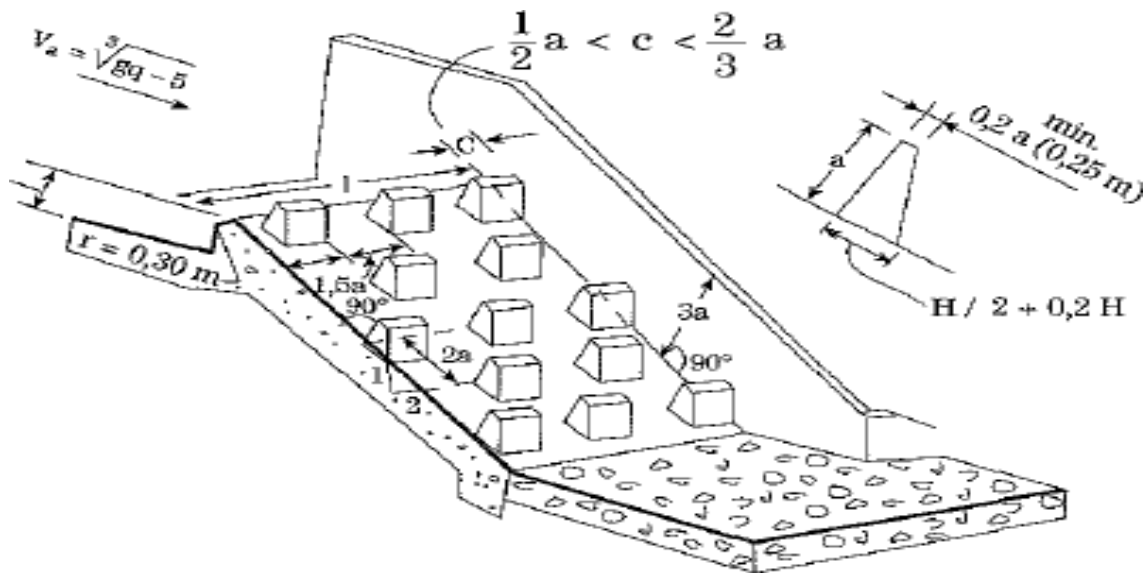


Figure 1.22 : Bassin de dissipation par macro rugosité

I.2.5.4.4.d Bassins de dissipation par ressaut hydraulique :

Dans ce document nous allons nous pencher sur les bassins de dissipation par ressaut hydraulique, ce sont des bassins qui utilisent le ressaut comme moyen de dissipation de l'énergie en aval des ouvrages hydrotechniques, il en existe deux catégories :

- Bassins à plan rectangulaire et fond horizontal ;
- Bassins à plan rectangulaire, murs verticaux et fond incliné,

I.2.5.4.4.e Bassins à plan rectangulaire et fond horizontal :

Ces bassins auront les dimensions nécessaires pour confiner le ressaut formé dans les limites du débit de dimensionnement, il convient d'en vérifier le comportement pour les débits inférieurs, le mode de détermination des profondeurs conjuguée sa été exposé en section

La hauteur des murs la téraux est fonction des caractéristiques du ressaut, en particulier des oscillations de la surface libre comme ordre de grandeur de la marge des écrite à adopter nous pour ronsprend relava leur de $0.25 h_2$.

Ce type de ressaut est utilisé pour des chutes supérieures à 60 mètres et pour des débits par unité de

largeur $q > 45 \text{ m}^2/\text{s}$. Le degré de submersion du ressaut dans ce type de bassin devra avoir une valeur de 0.1 soit de 10%, Le ressaut est très sensible à l'abaissement des niveaux aval qui ne peuvent en aucun cas être inférieures au niveau conjugué du ressaut.

Pour cela la "United state bureau of réclamations "a préconisé 3 types de bassins :

I.2.5.4.4.f Bassins avec blocs de chute et seuil dentelé (Bassins de type II USBR):

Utilisable pour des chutes inférieures à 65m et des débits par unité de largeur inférieure à $45 \text{ m}^2/\text{s}$ grâce à ce procédé nous pouvons réduire jusqu'à 70 % la longueur du bassin par rapport à celle d'un bassin simple de Type I USBR par exemple, toute fois il ne faut jamais les adopter pour une valeur de $FR_1 < 4.5$.

Le dimensionnement est effectué conformément à la figure, Ou h_1 représente la profondeur d'eau, FR_1 le nombre de Froude correspondant au régime torrentiel immédiatement en amont du bassin et h_2 la profondeur conjuguée du ressaut en aval donnée par des formules ou de sa baques.

Nous recommandons un degré de submersion du ressaut égal à 0.15 au minimum au trament dit la profondeur d'eau en aval devra être supérieure à $1.05 h$. La longueur "L" du bassin peut être égale à 0.7 fois la longueur du ressaut s'il n'y a ni blocs ni seuil c'est à dire à 0.7 fois la valeur donnée par l'abaque en figure et pour une pente du canal égale à $i = 0$.

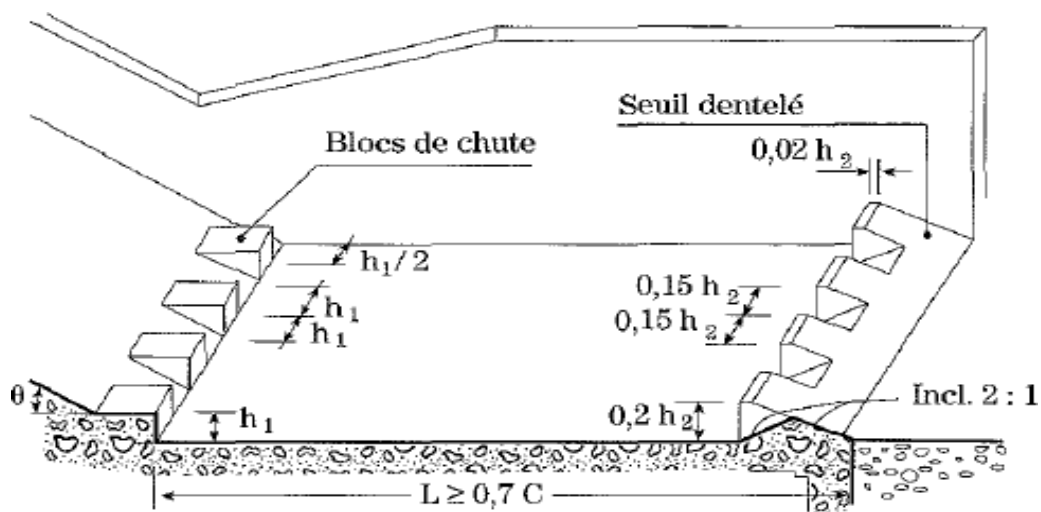


Figure 1.23 : Bassin avec blocs de chute et seuil dentelé (Bassin de type II USBR)

I.2.5.4.4.g Bassins avec bloc de chute, blocs d'amortissement et seuil terminal continue (Bassins de type III USBR) :

Nous utilisons ce type de bassin quand en amont du ressaut nous avons $U_1 < 18 \text{ m/s}$ et $q < 18 \text{ m}^2/\text{s}$, pour des vitesses supérieures, la cavitation peut se produire sur les blocs d'amortissement.

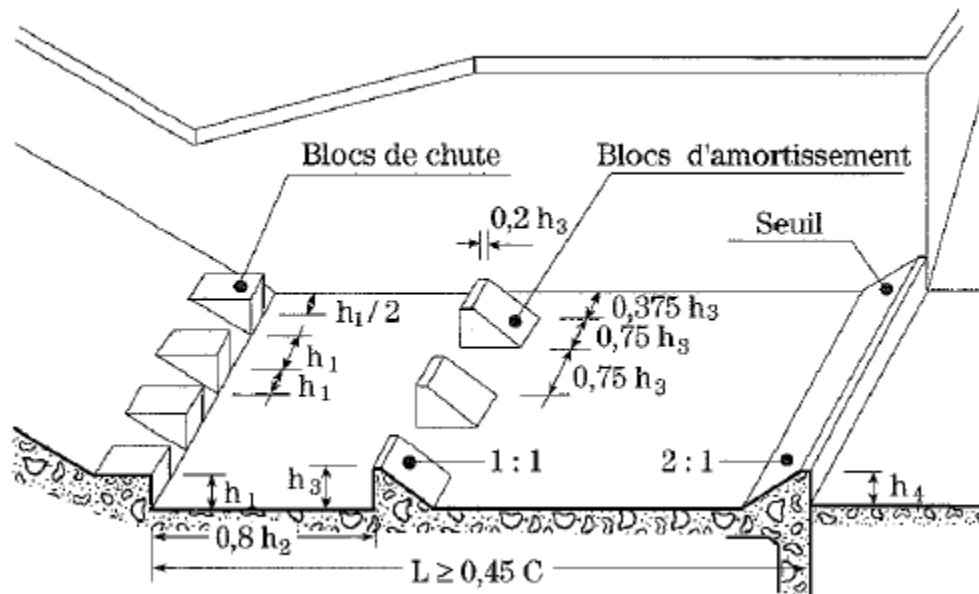


Figure 1.24 : Bassin avec bloc de chute, blocs d'amortissement et seuil terminal continue (Bassin de type III USBR)

Les blocs de chute correspondant à la première ligne à partir de l'amont sur la figure sont identiques à ceux du bassin de type II les blocs d'amortissement et le seuil de sorties ont dimensionnés en accord avec l'abaque en (**Annexe II**).

Les blocs d'amortissement peuvent être utilisés pour de plus grandes chutes si nous modifions leur configuration et leur écartement, cette solution permet de réduire jusqu'à 45% la longueur du bassin par rapport à un bassin simple, nous ne pouvons l'utiliser pour $Fr < 4.5$ car le niveau minimum en aval compatible avec la fixation du ressaut est celui qui correspond à $0.83h_2$.

I.2.5.4.4.h Bassins avec déflecteurs et seuil terminal continue (Bassins de type IV USBR) :

Ces bassins sont spécialement indiqués dans le cas où le ressaut est oscillant, ce qui arrive quand le nombre de Froude dans la section de première profondeur conjuguée est compris en 2.5 et 4.5. Leur efficacité dans les limites de ces valeurs du nombre de Froude réside dans l'action des déflecteurs qui atténuent d'une manière significative les ondulations.

La longueur L de la structure sera égale à celle qui a été définie pour le bassin rectangulaire simple et le degré de submerge ce du ressaut sera égal à 0.1.

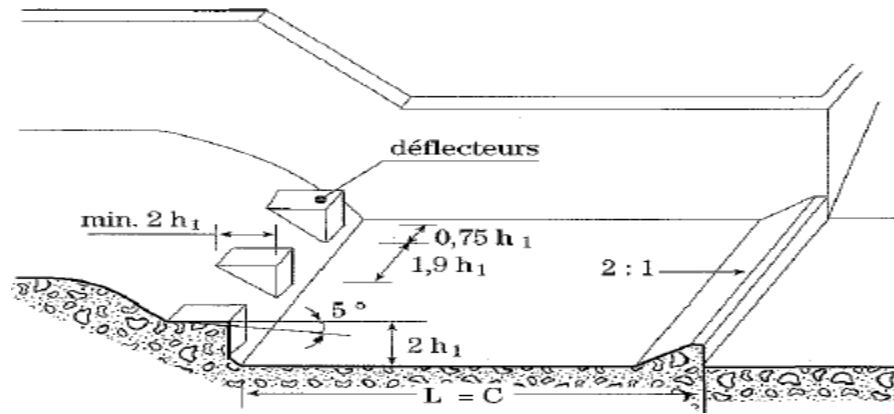


Figure 1.25 : Bassin avec déflecteurs et seuil terminal continue (Bassin de type IV USBR)

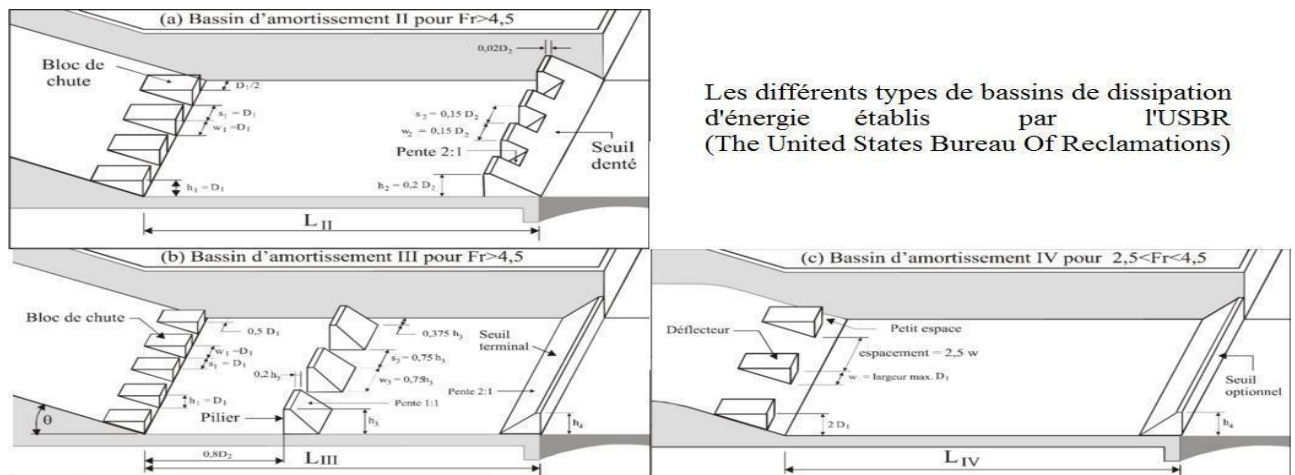


Figure 1.26 : Récapitulation des bassins de types USBR Bassins à plan rectangulaire, murs verticaux et fond incliné

Pour le calcul des dimensions du bassin de dissipation de ce type, il faut tenir compte des considérations formulées précédemment. Nous avons toujours intérêt à installer à l'extrémité du bassin un seuil triangulaire continu d'une hauteur de l'ordre de 0.05 à $0.1 \cdot h_2$ et avec le parement amont incliné de $3/1$ à $2/1$.

I.2.5.4.4 Localisation et Position du ressaut :

D'après Laborde (2007), Le ressaut apparaît lorsqu'une courbe de remous doit traverser le niveau critique pour passer d'un régime super critique à un régime infra critique. La recherche de la position d'un ressaut a fait l'objet de plusieurs études mais en vain, il n'existe pas la son aucune formule empirique permettant la détermination de la position exacte du ressaut, néanmoins la méthode graphique permet de connaître de façon justifiable la position d'un ressaut. Dans ces conditions, nous pouvons calculer une courbe de remous amont supra critique et une courbe de remous avalin fra critique. Le ressaut se produira à une abscisse telle que ses sections limites S_1 et S_2 aient des hauteurs h_1 et h_2 conjuguées et que la longueur soit égale à la longueur "L" est aimée empiriquement.

La détermination pratique de cette position peut se faire de deux façons :

I.2.6 Cas où il n'y a pas de régime uniforme :

Nous procéderons par voie graphique en traçant les deux courbes de remous amont et aval (en canal à faible pente M_3 et M_2). Au-dessus de la courbe M_3 , Nous tracerons la courbe M'_3 des hauteurs conjuguées de M_3 . Le ressaut se situera entre les points A et B de façon à ce que la longueur A'B soit égale à celle du ressaut.

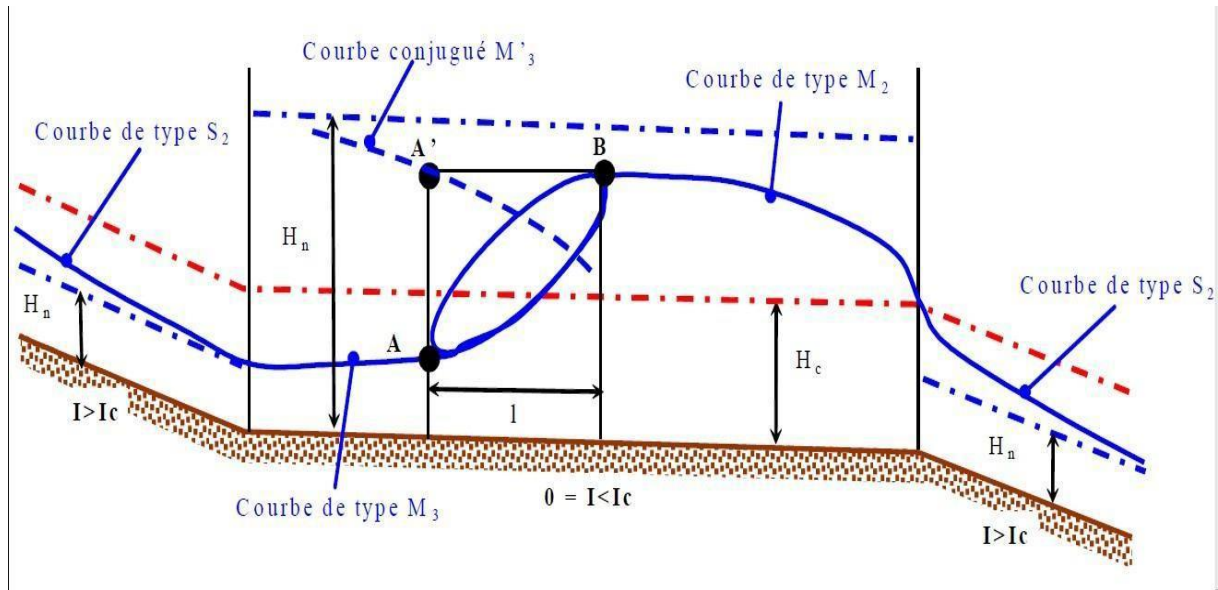


Figure 1.27 : Détermination de la position du ressaut

I.2.7 Cas où le régime aval est uniforme :

Dans ce cas, Nous connaissons la hauteur d'eau aval, il suffit alors de calculer la hauteur conjuguée, puis de déterminer d'après la courbe de remous amont, l'abscisse où nous rencontrons cette hauteur. La connaissance de l'en droit exact où se produit le ressaut après l'ouvrage de contrôle (incliné ou verticale) est très importante. Dans le cas du ressaut libre (cas de notre étude), cette position est déterminée par la hauteur de l'écoulement h_3 du cours d'eau en aval du ressaut. En effet, celui-ci ne peut avoir lieu que si la condition donnée par l'équation est respectée. Trois cas peuvent alors se présenter :

- Si la hauteur de l'écoulement aval h_3 et la hauteur conjuguée du ressaut h_2 sont égales, alors le ressaut s'effectue immédiatement après l'ouvrage et sa longueur "L" est calculée empiriquement. Ce cas est idéal mais ne peut se présenter (sauf coïncidence) pour tous les débits rencontrés dans un cours d'eau.
- Si la hauteur h_3 en aval est inférieure à la hauteur conjuguée du ressaut h_2 , le ressaut se déplace vers l'aval. Ain si immédiatement après l'ouvrage de control, l'écoulement sera torrentiel et graduellement varié. La hauteur d'eau h_1 avant le ressaut augmentera jusqu'à ce qu'elle respecte l'équation de Bélanger. La hauteur d'eau sera alors $h_1' > h_1$, la vitesse $u_1' < u_1$ et le nombre de Froude sera également plus petit. Connaissant la hauteur d'eau de l'écoulement aval h_3 , nous calculerons la hauteur h_1' à laquelle devrait s'initier le ressaut. À l'aide des courbes de remous et

de la valeur de h_1 , la position à laquelle le ressaut s'effectue peut-être calculée. Dans ce cas, la longueur totale nécessaire à la réalisation du ressaut est supérieure à celle obtenue dans le premier cas.

- Si la hauteur d'eau en aval h_3 est supérieure à la hauteur conjuguée du ressaut h_2 , le ressaut est submergé. Dans ce cas également, la longueur nécessaire à la réalisation du ressaut est supérieure à celle obtenue dans le premier cas. Cependant, ce troisième cas est plus sécuritaire que le deuxième cas car le ressaut se forme en partie dans la région protégée du canal et n'est pas repoussé vers l'aval du canal.

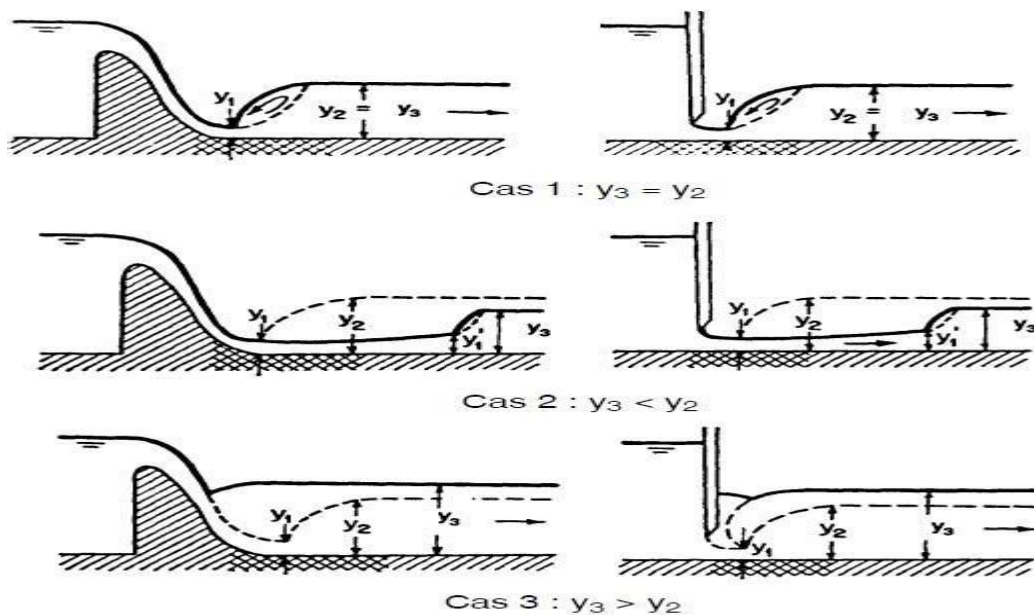


Figure 1.28 : Localisation du ressaut

I.3 Conclusion :

L'appréhension de la position exacte du ressaut après l'ouvrage de contrôle a une valeur très importante dans le domaine hydraulique, en effet, c'est grâce à cette position que le concepteur détermine la longueur du bassin de dissipation pour assurer la stabilité du fond et des berges en aval d'un ouvrage hydrotechnique.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce chapitre, en effet nous avons pu définir les multiples utilisations du ressaut hydraulique et comment que l'homme a su dompter ce phénomène naturel et l'utiliser dans sa vie quotidienne, nous avons aussi vu la capacité de dissipation d'énergie des ressauts ainsi que les différents ouvrages de dissipation qui utilisent le ressaut comme procédé d'atténuation d'énergie.

En dernier lieu, nous avons entamé la localisation du ressaut et expliqué la méthode graphique de la détermination de la position exacte du ressaut vu qu'il n'y a pas de formule empirique à cet effet. Bien entendu, ce chapitre facilitera l'établissement d'un protocole expérimental qui contribuera à la localisation du ressaut dans un canal rectangulaire et qui sera l'objet du prochain chapitre.

***Chapitre II : Ressaut hydraulique
contrôlé dans un canal rectangulaire***

II.1 Introduction :

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse (Forster et Skinde, 1950; Achour, 1997), continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative (Hager et Sinniger, 1985). Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau aval, de contrôler sa position lors des changements des paramètres de l'écoulement et contribuent enfin à une meilleure compacité du bassin amortisseur (Bretz, 1987 ; Hager et Li, 1992).

Dans ce chapitre nous allons donner un bref aperçu sur les travaux les plus intéressants entrepris sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire.

II. 2 Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince

II.2.1. Approche de Forster et Skrinde (1950) :

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

Pour chaque essai effectué, le rapport x/h_2 est maintenu constant tout en assurant la formation complète du ressaut. La longueur du bassin amortisseur est à la limite égale à la position x du seuil comptée à partir du début du ressaut (figure 2.1).

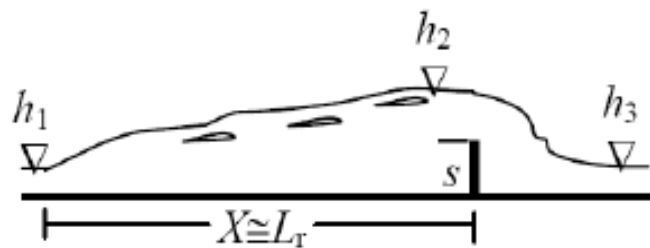


Figure 2.1: ressaut contrôlé par seuil mince

Le seuil de hauteur s est dénoyé et fonctionne comme un déversoir ; la profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval n'a ainsi aucune influence sur le débit franchissant le seuil. Cette condition est satisfaite lorsque :

$$h_3 < h_2 - 0,75.s \quad (2.1)$$

La Figure 2.2 montre la variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les valeurs de la position relative x/h_2 du seuil testé ($x/h_2 = 3 ; 5$ et 10).

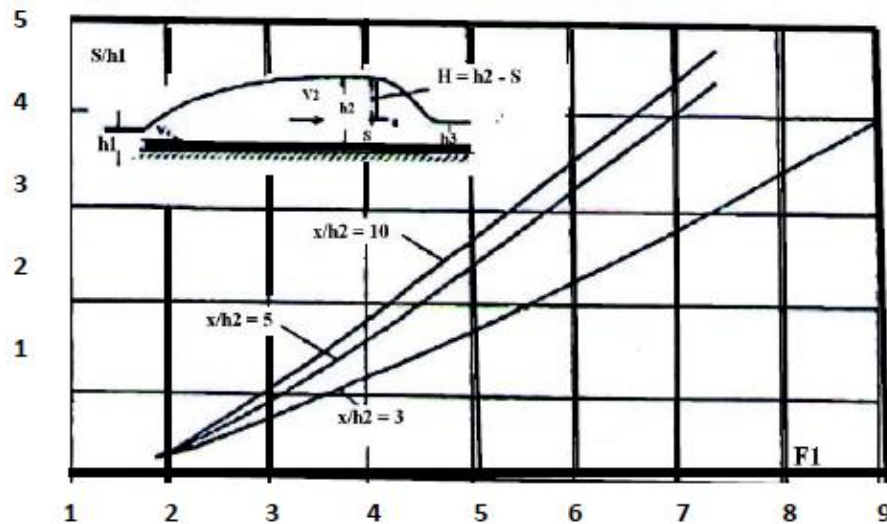


Figure 2.2: Variation expérimentale du nombre de Froude F_1 en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince pour quelques valeurs de x/h_2 , selon Forster et Skrinde (1950).

Trois courbes sont alors obtenues. Chaque courbe correspond à une valeur de x/h_2 bien déterminée. On peut remarquer que pour toute la gamme des valeurs du nombre de Froude IF_1 testés, les courbes expérimentales obtenues se rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que x/h_2 augmente. Certainement les courbes correspondant à x/h_2 compris entre 5 et 10, ce qui signifie que la hauteur relative s/h_1 du seuil ne subit pas de grandes variations. En pratique, on considère que la position relative x/h_2 du seuil est approximativement égale à 6.

Le diagramme de la figure 2.2 représente la méthode approuvée pour le dimensionnement des bassins d'amortissement contrôlé par seuil à paroi mince. Tous ces considérations ont incité Achour *et al* (2002) qui ont mené une étude expérimentale dans le but de compléter les essais de Forster et Skrinde (1950), et ainsi de définir une relation explicite $f(F_1, S, x/h_2) = 0$.

II.2.2 Etude de Achour et al (2002)

II.2.2.1. Essais pour $X \approx L_r$:

La première configuration de Achour et al (2002) répond aux conditions expérimentales de Forster et Skrinde (1950) ($X = L_r$).

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

L'expérimentation a montré que la relation qui lie la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil au nombre de Froude F_1 est de type puissance :

$$S = C_0 (F_1 - 1)^\beta \quad (2.2)$$

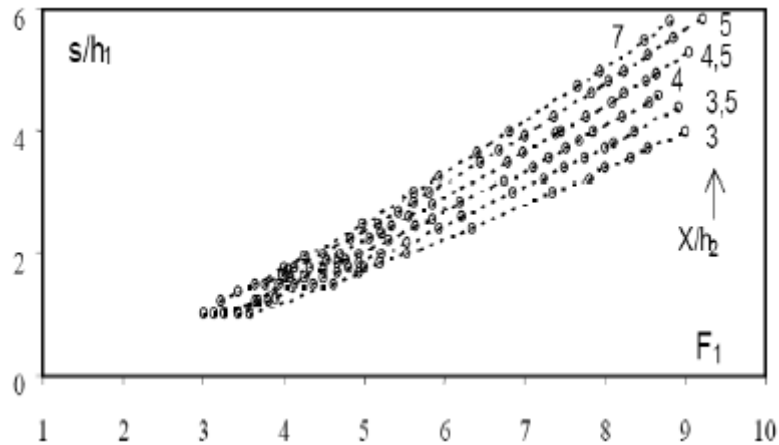


Figure 2.3 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de x/h_2 .

Le résultat principal obtenu montre que l'exposant β figurant dans la relation (2.2) prend une valeur quasi constante d'environ $5/4$ pour toute la gamme $3 \leq X/h_2 \leq 10$; En revanche, le paramètre C_0 varie en fonction de la position relative X/h_2 du seuil par la relation expérimentale $C_0 = \psi(X/h_2)$.

La figure (2.4), montre que la courbe de variation $C_0 = \psi(X/h_2)$ peut être assimilée à deux tronçons de droites D_1 et D_2 sur l'ensemble de l'intervalle $3 \leq X/h_2 \leq 10$.

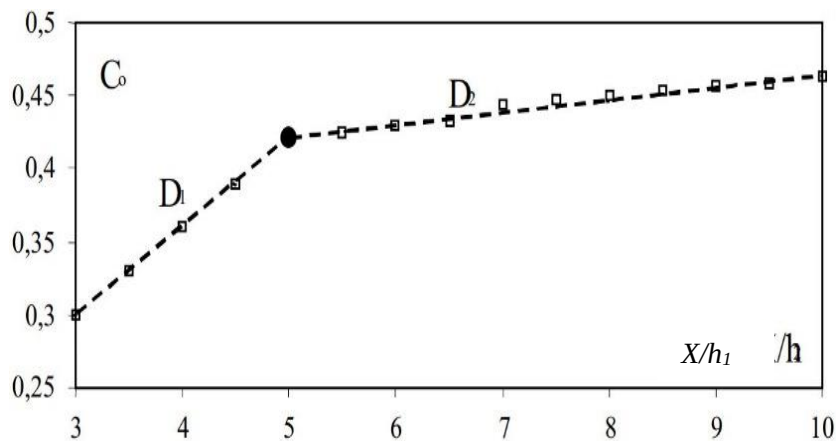


Figure 2.4: Variation expérimentale de C_0 en fonction de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince.

Une analyse complémentaire a permis d'écrire :

$$S = 0,0604(x/h_2) + 0,1186(F_1 - 1)^{1,25} \quad \text{Pour } 3 \leq x/h_2 \leq 5. \quad (2.3)$$

$$S = 0,0086(x/h_2) + 0,379(F_1 - 1)^{1,25} \quad \text{Pour } 5 \leq x/h_2 \leq 10. \quad (2.4)$$

II.2.2.2. Essais pour $X \cong L_j$:

Dans cette partie le seuil à paroi mince est placé à une distance X environ égale à la longueur L_j du ressaut (figure 2.5).

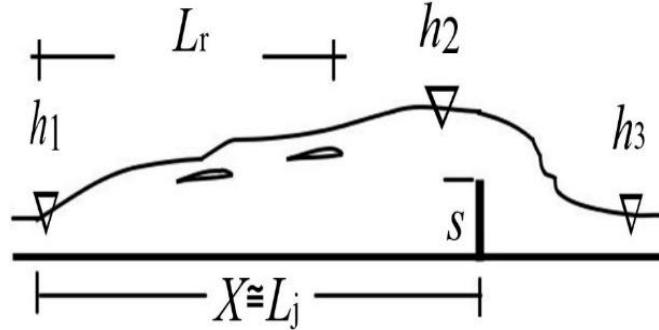


Figure 2.5 : Contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour $X \cong L_j$

Dans la gamme de valeurs $3 \leq F_1 \leq 9$, aucun effet de frottement n'a été montré et le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées peut donc être évalué par application de la relation :

$$Y = \frac{1}{2} \left[\left(1 + 8F_1^2 \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (2.5)$$

Au début, le but de cette étude est de déterminer expérimentalement la hauteur relative s/h_1 du seuil nécessaire à la formation du ressaut comme il est représenté sur la figure 2.5 et pour la gamme pratique ci-dessus indiquée de F_1 . Les figures 2.6 et 2.7 montrant respectivement la variation de ξ ($Y, s/h_1$) = 0 et ζ ($F_1, s/h_1$) = 0. Ainsi, des courbes uniques sont obtenues et un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés a permis de corrélérer avec une excellente approximation les paramètres $Y, s/h_1$ et F_1 :

$$Y = 2,37 \left(s / h_1 \right)^{0,8} + 1 \quad , R^2 = 0,996 \quad (2.6)$$

$$s / h_1 = 0,562 \left(F_1 - 1 \right)^{1,225} \quad , R^2 = 0,993 \quad (2.7)$$

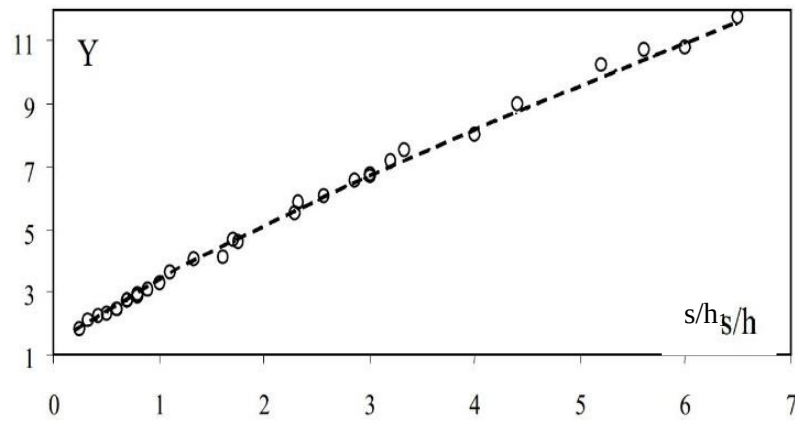


Figure 2.6: Variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince ($X \cong L_j$)

(- - -) courbe tracée selon la relation (2.6).

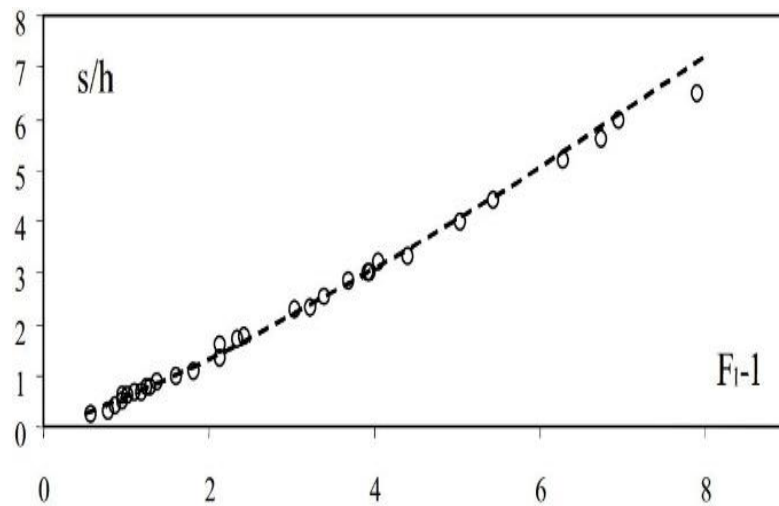


Figure 2.7 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident ($X \cong L_j$).

(- - -) courbe tracée selon la relation (2.7).

L'étude s'est enfin intéressée à l'évaluation de la position X du seuil nécessaire à la formation complète du ressaut. Lorsque le seuil est placé à une distance $X = L_j$, le ressaut peut être considéré comme un ressaut classique caractérisé par un rapport X/h_2 environ égal à 6 (*Peterka, 1983*). Cette tendance semble être confirmée par les mesures expérimentales représentées graphiquement sur la figure (2.8), notamment pour les valeurs élevées du nombre de Froude incident F_1 .

La figure (2.8) indique que la position relative X / h_2 du seuil est indépendante de F ($F_1 > 3$). A ces valeurs élevées de F_1 , la perturbation de la surface libre rend la pression de la mesure limnimétrique de la profondeur h_2 très difficile ($\Delta h_2 = \pm 1,5$ cm).

Les mesures expérimentales obtenues se traduisent alors par un nuage de points réparti toutefois autour de la valeur moyenne $X/h_2 = 6$. La figure (2.8) montre la variation expérimentale de la fonction $\varphi(F_1, X/h_1) = 0$ le nombre de Froude F_1 est lié à la hauteur relative $S = s/h_1$ par la relation (2.7). Un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés a permis d'écrire :

$$X/h_1 = 10 (F_1 - 1) \quad , R^2 = 0,995 \quad (2.8)$$

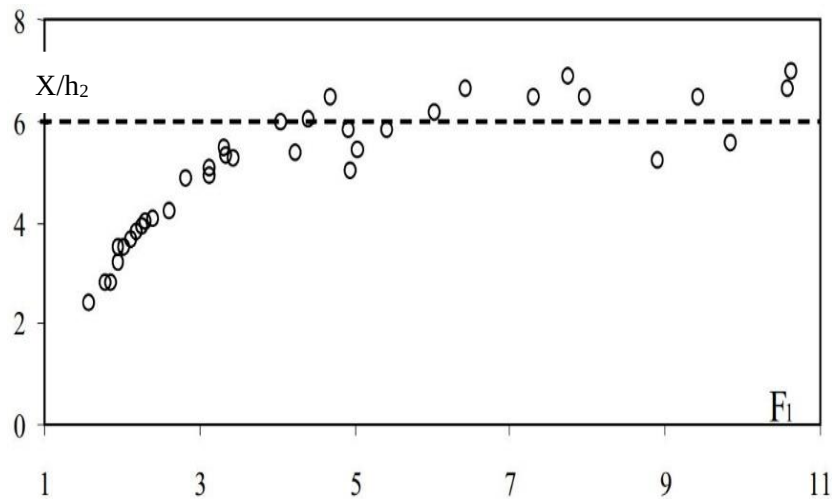


Figure 2.8 : Variation expérimentale de la position relative X/h_2 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude incident F_1 lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ($X \cong L_j$).

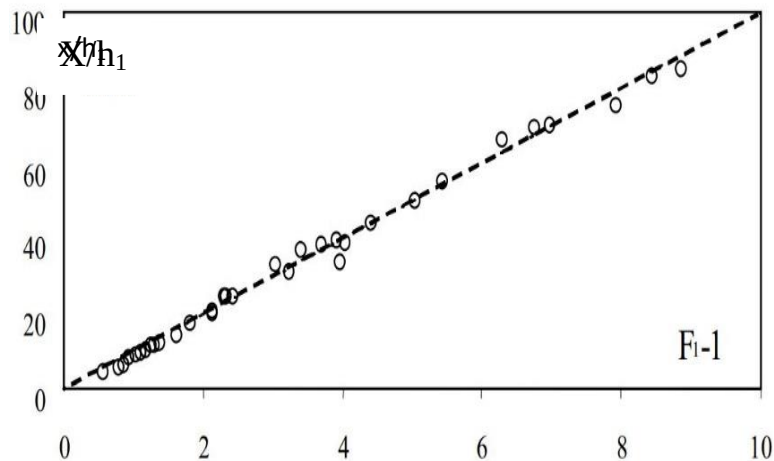


Figure 2.9: Variation expérimentale de la position relative X/h_1 du seuil à paroi mince en fonction de $(F_1 - 1)$ lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ($X \cong L_j$).

(- - -) courbe tracée selon la relation (2.7).

II. 3 Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive

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

Forster et Skrinde ont analysé en 1950 les écoulements sur une marche positive et sur un seuil sans considération des conditions à l'aval, l'écoulement est libre au – delà du seuil. En supposant une répartition hydrostatique des pressions sur la marche pour l'application du théorème de la quantité de mouvement, ils ont obtenu une relation entre $Y=h_2/h_1$, $S=s/h_1$ et F_1 . Représente la courbe théorique pour $S = 4$ et les points expérimentaux pour $S=0,5, 1, 2$ et 4 . Les points expérimentaux sont sur des courbes parallèles à celles théoriques mais décalées, et plus S est grand, plus l'écart augmente, pour un même nombre de Froude F_1 , la valeur expérimentale est inférieure à celle théorique.

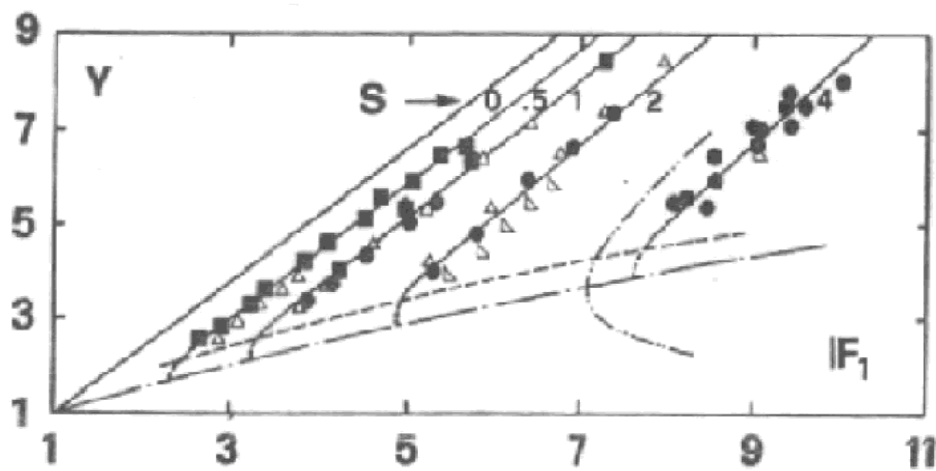


Figure 2.10 : Résultats expérimentaux de Forster et Skrinde (1950).

Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 pour différentes hauteurs relatives S de marches positives : (■) 23.8 mm, 36.3 mm, (●) 53.9 mm et (A) 7.9 mm Courbe théorique pour $S = 4$ Limite inférieure de ses sais et Limite théorique.

II.4 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré aux principaux travaux entrepris dans le domaine de ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince et par marche positive dans un canal de section rectangulaire. Nous avons abordé dans cette étude, les travaux de Forster et Skrinde (1950). Les auteurs ont défini la variation de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 pour des valeurs données de x/h_2 , dont trois courbes ont été établies expérimentalement.

Achour et al (2002), montrent, dans un premier temps que le rapport des hauteurs conjuguées varie pour la marche positive en fonction du nombre de Froude amont F_1 et de la hauteur a dimensionnelle de la marche $S=s/h_1$.

Dans un second temps, les auteurs montrent que L'analyse des mesures expérimentales a permis de corréler de manière plus significative la position relative X/h_1 du seuil au nombre de Froude incident F_1 .

Le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive, où nous avons cité les travaux de *Forster et Skrinde (1950)*, ils ont élaboré un diagramme qui montre la variation du nombre de Froude F_1 , en fonction du rapport h_3/h_1 , pour différentes valeurs des hauteurs relatives s/h_1 de la marche positive.

***Chapitre III : Ressaut Hydraulique dans
un canal rectangulaire de forme
composée***

III.1 Introduction :

L'étude des écoulements uniformes, ou plus encore les écoulements non uniformes en lit composés ont très compliqués à cause du transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al. 2005). Ces deux phénomènes, se manifestant de différentes façons, sont des sources de dissipation d'énergie supplémentaire de l'écoulement. Il peut être donc intéressant de voir la grandeur de ces dissipations dans le cas où il se produit un ressaut hydraulique dans le lit composé. Il est plus intéressant d'autant plus que le ressaut hydraulique est utilisé justement pour la dissipation d'énergie. Cette dissipation supplémentaire est donc la bienvenue. En s'inspirant du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, une approche théorique est proposée dans ce présent travail pour déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en lit composé. Le rendement du ressaut est lui aussi quantifié. Toutes les équations sont présentées en termes adimensionnel sa fin de leur donner un caractère de validité général.

III.2 APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR (2000)

III.2.1 Rapport des hauteurs conjuguées :

La figure (3.1) montre les différentes caractéristiques géométriques et hydrauliques du ressaut hydraulique en lit composé droit.

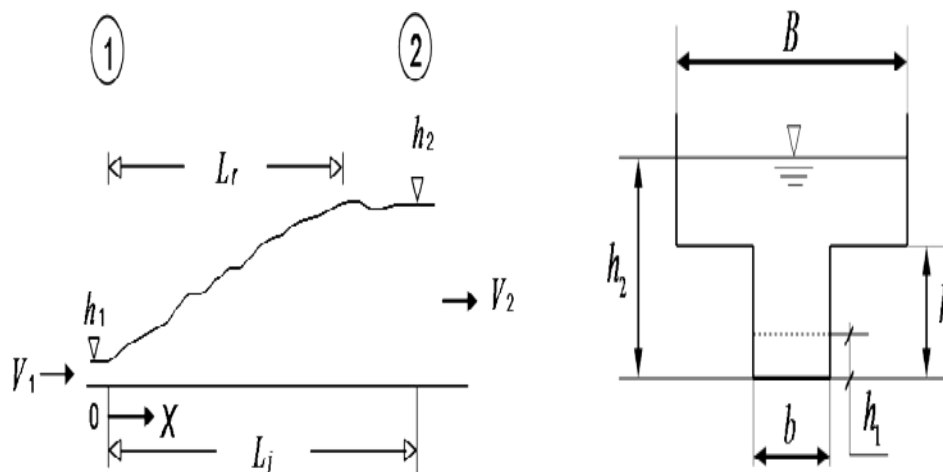


Figure 3.1 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit

Tableau III.1: Symboles et Notation (ANNEXE III)

f_x : Force de résistance	b : Largeur du lit mineur
$Y=h_2/h_1$: Rapport des hauteurs conjuguées	B : Largeur du lit majeur
$\tau=h_1/h$: Rapport des hauteurs	h_1 et h_2 : 1 ^{ère} et 2 ^{ème} hauteur conjuguée du ressaut
$\beta=b/B$: Rapport de l'élargissement	h : Hauteur de plein bord du lit mineur
F_1 : Nombre de Froude de l'écoulement incident	L_j : Longueur du ressaut
f_1 et f_2 : Forces hydrostatiques au pied et à la fin du ressaut	L_r : Longueur du rouleau
A_1 et A_2 : Aires de la section au pied et à la fin du Ressaut	V_1 et V_2 : Vitesses moyennes au pied et à la fin du ressaut
H_1 et H_2 : Charges totales au pied et à la fin du ressaut	Q : Débit
ΔH : Pertes de charge dues au ressaut	g : Accélération de la pesanteur
ω : Poids spécifique du liquide	k : Coefficient
η : Rendement du ressaut	

Le transfert de masse et de quantité de mouvement se produit à l'interface entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al. 2004).

L'équation de la quantité de mouvement appliquée entre le pied et la fin du ressaut, défini par la figure (3.1), s'écrit comme suit :

$$\rho Q(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = f_1 - f_2 \quad (3.1)$$

En s'inspirant de l'article de Achour (2000), par analogie à la relation de Borda-Carnot et à la vue de la forme de la relation 1, il paraît admissible de rajouter une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement aurait comme expression :

$$f_x = -k \omega (h_2 - h) h_1 (B - b) \quad (3.2)$$

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 :

$$\rho Q^2(1/A_2 - 1/A_1) = f_1 - f_2 + f_x \quad (3.3)$$

Analysons l'équation pour la fonction :

$$f_x = (1/2) \cdot \varpi(h_2 - h)h_1(B - b):$$

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

$$f_1 = \varpi(h_1/2)bh_1 \text{ et } f_2 = \varpi(h_2 - h/2)bh + \varpi[(h_2 - h)/2]B(h_2 - h). \quad (3.4)$$

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

$$2F_1^2 \left(\frac{\beta}{Y - (1 - \beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} - \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (3.5)$$

$$\text{Où : } F_1 = Q / \sqrt{b^2 h_1^3 g} \quad (3.6)$$

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

Les relations (3.3) et (4.3) sont des équations fonctionnelles de forme $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$. Notons que les équations (4.3) et (6.3) peuvent s'écrire sous la forme $Y^3 + aY^2 + bY + C = 0$

En faisant le changement de variable $Y = x - a/3$, l'équation de troisième degré devient sous la forme $Y^3 + pY + q = 0$ dont la résolution peut se faire aisément en utilisant la méthode trigonométrique

La figure (3.2) illustre la variation de Y , calculé par l'équation 6, 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 reproduise effectivement dans le canal composé ($h_2 > h$), les valeurs de F_1 à considérer doivent être tristement supérieures à la valeur minimale $F_{1\min} = [12\sqrt{2}] \sqrt{(2\tau+1)^2 - 1}$ correspondant à $h_2 = h$.

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

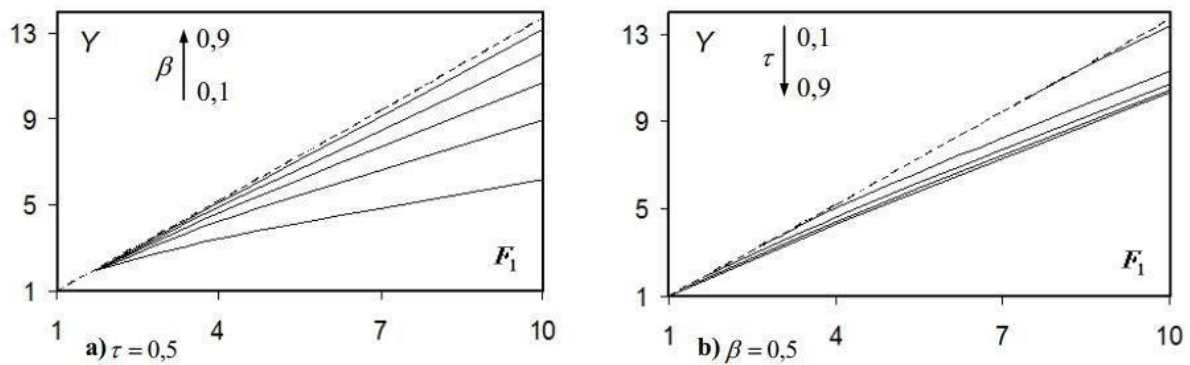


Figure 3.2 : Variation de Y , calculé par (1), en fonction de F_1 : $\beta = 1$

Sur la figure (3.2) 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 la négligeant. La différence est plus claire au fur et à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente. La force f_x traduit les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

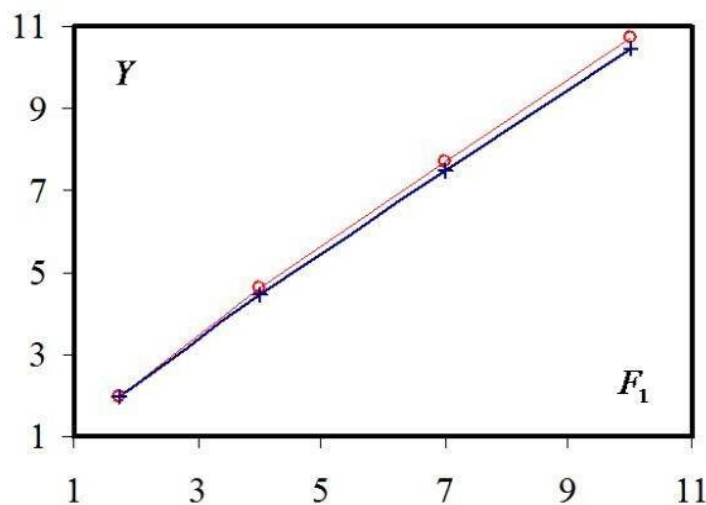


Figure 3.3 : Variation Y en fonction de F . (0) : équation 2, (+) : équation 1

III.2.2 Rendement du ressaut :

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

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (3.7)$$

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 (3.6), nous avons représenté sur la figure (3.4) la variation de η en fonction de F_1 . Pour un τ et un β fixés, il est clairement illustré sur la figure que le rendement η d'un ressaut hydraulique dans un lit composée, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de F . Pour un τ connu, en fixant F , η diminue avec l'augmentation de β . Pour un β et un F_1 fixé, on peut aisément voir que le η augmente avec l'accroissement de τ .

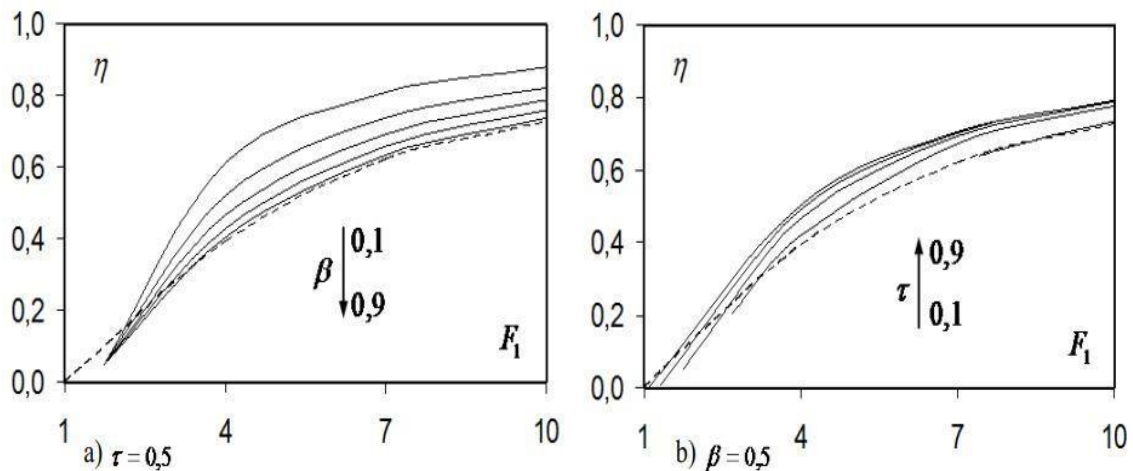


Figure 3.4 : Variation en fonction de F : $\beta = 1$. Y est calculé par l'équation (3).

Sur la figure (3.5): est représentée la variation de η en fonction de F_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. Il est bien illustré que les η calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont supérieures à celles calculées en la négligeant.

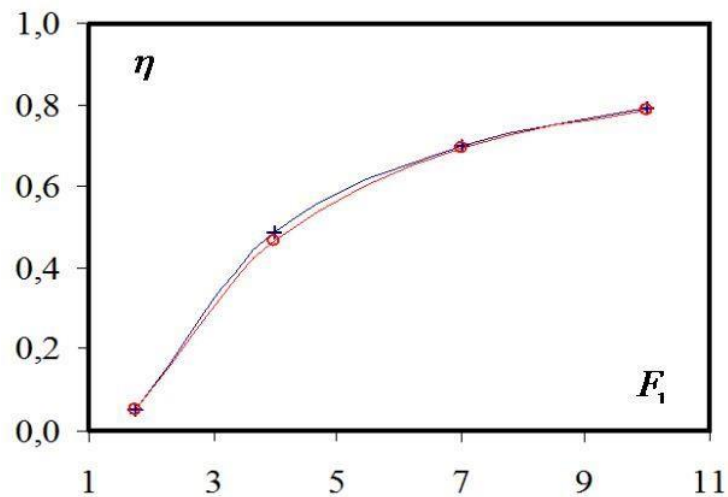


Figure 3.5 : Variation en fonction de F_1 . (0) : équation 2, (+) : équation 1

III.3 Approche de Riguet (2020):

III.3.1 Rapport des hauteurs conjuguées :

Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y est le rapport de la hauteur d'eau h_2 sur la Hauteur initiale h_1 ($Y = h_2/h_1$) du ressaut hydraulique

Les représentations graphiques des points expérimentaux ci-dessous illustrent clairement la variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y en fonction du nombre de Froude F , pour les cinq ouvertures h_1 : 2 ; 2,5 ; 3 ; 3,5 et 4cm pour les deux lits du canal composée.

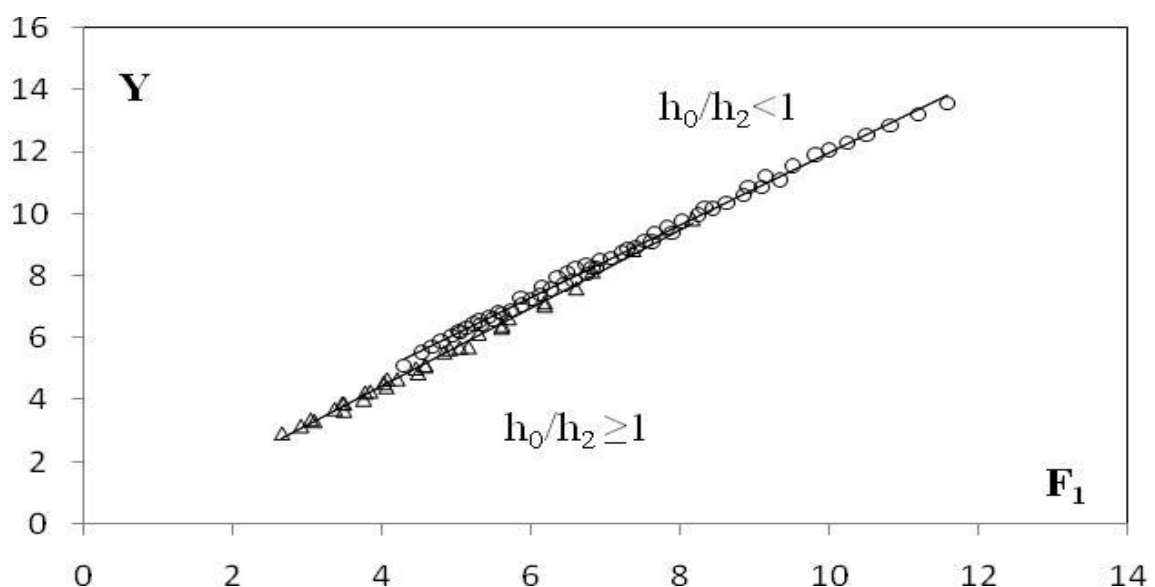


Figure.3.6: Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour les deux lits du canal composée.

(0) points de mesures expérimentales en lit majeur ; (Δ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (□) Courbes d'ajustements.

Cette figure montre que le rapport Y des hauteurs conjuguées est moindre en lit mineur que celui dans le lit majeur.

L'analyse des points de mesures expérimentales, montre clairement que pour chaque valeur de h_0/h_2 , un ajustement linéaire est possible, de la forme $Y = a F_1 + b$.

L'équation liant le rapport des hauteurs conjuguées au nombre de Froude incident s'écrit alors :

Pour $h_0/h_2 \geq 1$: $2,64 < F_1 < 8,14$ $Y = 1,258 F_1 - 0,573$ (3)

Pour $h_0/h_2 < 1$: $4,27 < F_1 < 11,58$ $Y = 1,165 F_1 + 0,328$ (4)

III.3.2 Rendement du ressaut hydraulique :

En tenant compte des relations précédentes, le rendement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composé, s'écrit comme suit :

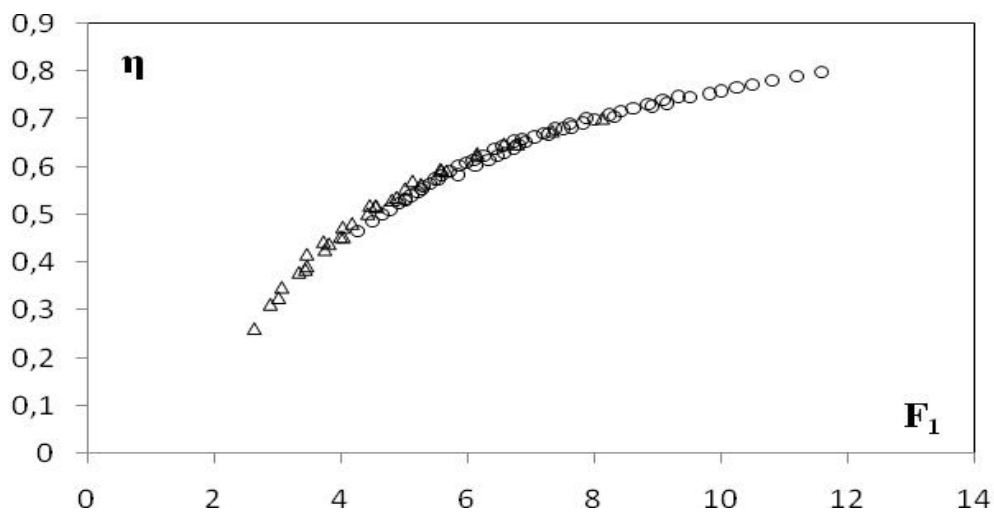


Figure 3.7 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . (○) points de mesures expérimentales en lit majeur ; (△) points de mesures expérimentales en lit mineur.

Cette figure montre la variation du rendement « η » en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les deux lits du canal composé. Il est noté que le rendement augmente avec l'augmentation du nombre de Froude.

En effet, pour des nombres de Froude F_1 comprise entre 4 et 6, les points de mesure en lit majeur se trouvent légèrement au-dessous du lit mineur, au-delà de 6 tous les points de mesures se rejoignent pour former un seul nuage de points.

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé, au premier lieu, les travaux de Khattaoui et Achour (2012). L'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal composé droit a abouti à une équation fonctionnelle de la forme $\phi(F_1, \lambda, r, \beta) = 0$

Une nouvelle approche a été proposée par Khattaoui et Achour (2012) en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans leurs développements, les valeurs de Y et η se sont révélées interdépendantes en augmentant ou en diminuant et se sont certainement rapprochées de la réalité.

Nous avons présenté par la suite l'approche de Riguet et Al (2020), qui a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire composé droit. Des relations expérimentales liant les rapports Y , L_j , L_r en fonction du nombre de Froude ont été obtenues.

A partir des essais et des résultats obtenus au niveau du laboratoire, il ressort que l'effet de l'ouverture h_1 n'apparaît pas sur la relation hauteur relative du ressaut hydraulique et du nombre de Froude F_1 incident.

Dans un premier temps, l'étude s'est intéressée à la variation de Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour cinq ouvertures différentes dans les deux lits du canal composé. En remarque en premier lieu que l'augmentation du nombre de Froude F_1 entraîne celle du rapport Y des hauteurs conjuguées pour les deux sections du canal. On constate que le rapport Y augmente avec l'augmentation du nombre de Froude F , et que pour le même nombre de Froude F , Y est plus grand dans le lit majeur

Nous pouvons dire, que pour une gamme des nombres de Froude et des différentes ouvertures testées h_1 , le ressaut hydraulique en canal rectangulaire de forme composée, présente deux approches expérimentales globales $Y = f(F_1)$ par lesquelles on pourrait dimensionner le bassin d'amortissement.

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un second temps, à l'évaluation des longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique à savoir la longueur du ressaut et la longueur du rouleau de surface. Il a été montré que pour chaque lit du canal une relation de type linéaire est obtenue. On conclue que le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée a un **effet réducteur** aux caractéristiques de l'écoulement **en lit mineur** plus que **en lit majeur**.

Chapitre IV : Description du model expérimental

VI.1 Introduction :

Avant d'aborder l'étude expérimentale, nous allons exposer une description détaillée du modèle expérimental, et faire la description des essais des différents appareillages des mesures utilisés.

VI.1.1 Description du canal :

Les expériences ont été conduites dans un canal à surface libre représenté sur la figure (4.1) et la photo (4.2). Il s'agit d'un canal de 12 m de longueur, ayant une hauteur de 0,6m, et des parois latérales en verre. Il est constitué d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure par une conduite circulaire en PVC d'un diamètre de 115 mm. L'ensemble fonctionne en circuit fermé. L'écoulement est assuré par une pompe photo (4.3) qui alimente un convergent en charge (permettant de générer un écoulement à grande vitesse) photo (4.6), débouchant dans le canal de mesure. On dispose ici d'un canal horizontal de section rectangulaire composée, de longueur 5 m et de hauteur $h_1 = 2$ cm à la largeur de lit mineur $b = 20$ cm de lit majeur $B = 60$ cm.

Il est relié à sa partie aval à un second canal de section droite rectangulaire dont le fond présente une pente nulle. Un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle est inséré avec contraction latérale dans le circuit d'écoulement photo (4.5), permettant la mesure du débit.

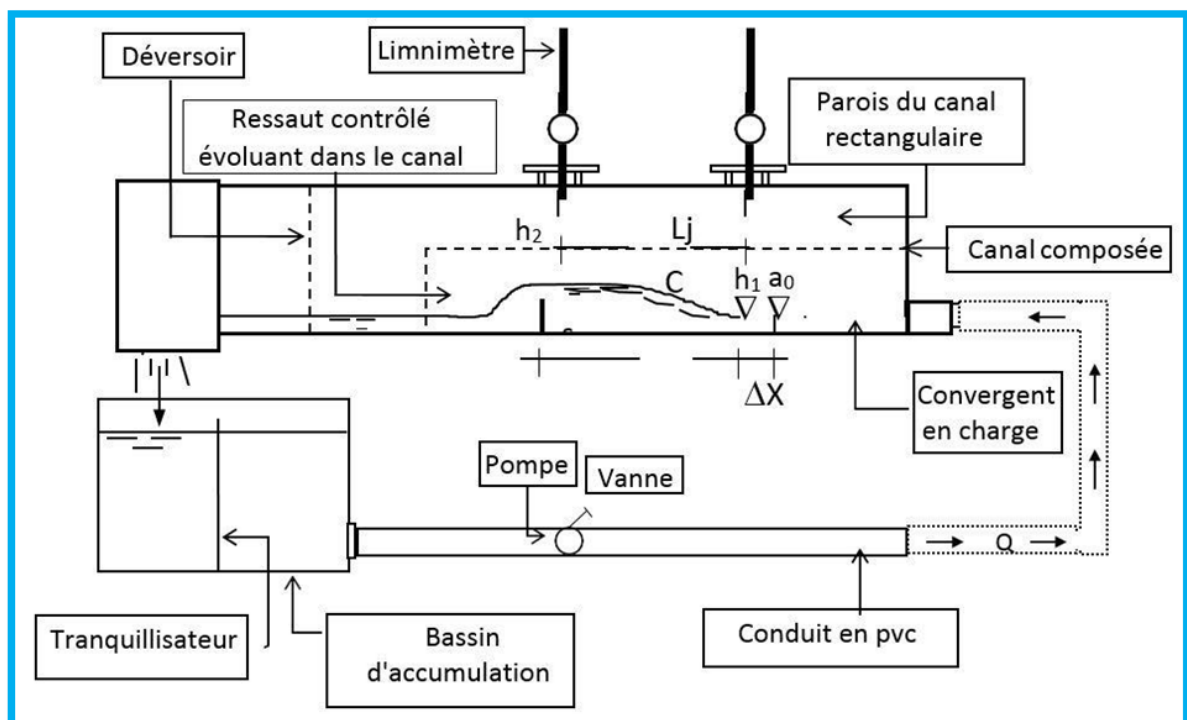


Figure 4.1 : Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composé



Photo 4.1 : Photographie du model expérimentale du canal



Photo 4.2 : Pompe centrifuge axial



Photo 4.3 Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit

En ce qui concerne les mesures des débits Q , nous avons utilisé le débit mètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de Hachemi Rachedi . (2006).



Photo 4.4 : Section de contrôle



Photo 4.5 : Photographie de convergent

Photo 4.6 : Photographie d'une boîte en charge.

VI.2 Limnimètre:

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à l'ouverture due à la section de sortie du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été évaluées par un limnimètre. L'instrument est formé d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnimétrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau figure (4.2).

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

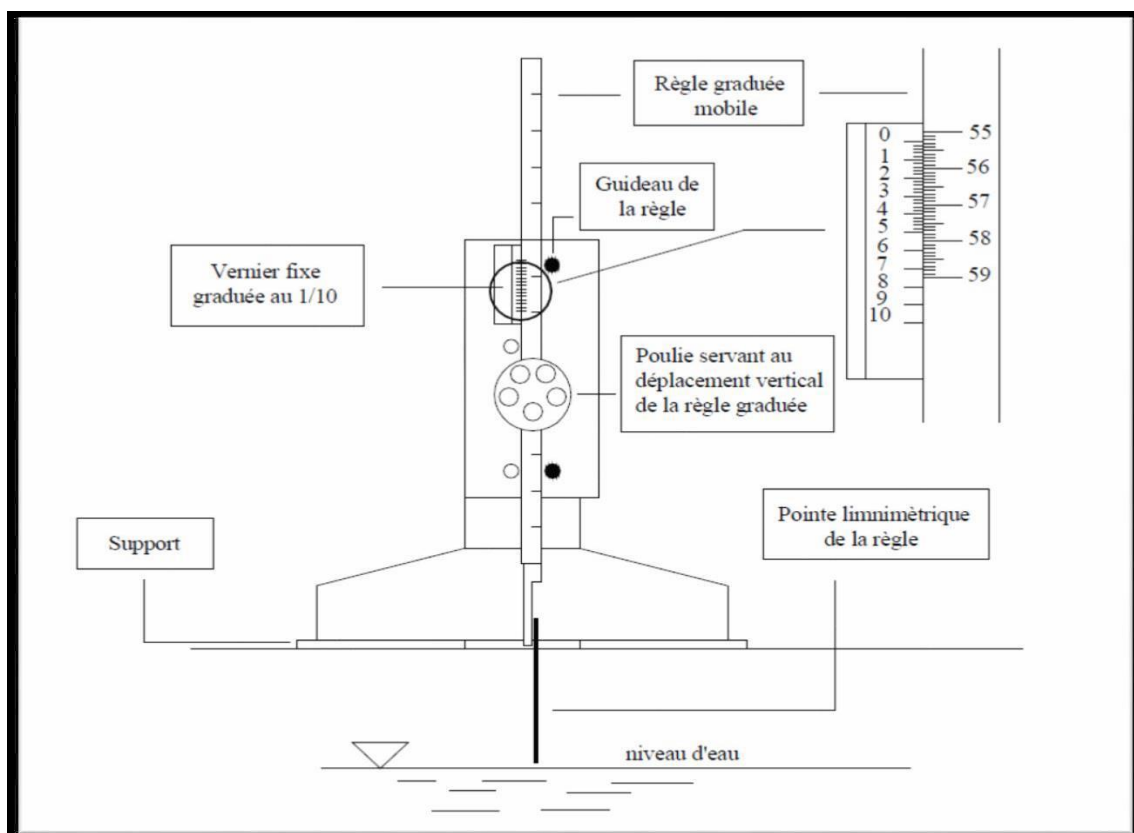


Figure 4.2 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.

VI.3 Le seuil à paroi mince :

Les seuils utilisés dans notre dispositif expérimental, sont façonnées de fer en forme rectangulaire. Dans le but d'obtenir un nombre important de points de mesures, nous avons préparé 18 seuils minces de différentes hauteurs photo (4.7) :

$s = (2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20)\text{cm}$



Photo 4.7 : Photographie des seuils minces testés



Photo 4.8 : Photographie des marches positives

Chapitre V: Etude expérimentale

V.1 INTRODUCTION :

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire de section composée. Pour une gamme pratique de nombres de Froude incident a été ainsi obtenue : $3 < F < 11$

V.1.1 Détermination expérimentale de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en lit composé :

Les caractéristiques adimensionnelles essentielles, intervenant au phénomène du ressaut dans un canal rectangulaire en lit composé sont :

- le nombre de Froude F_1 ou le débit relatif Q^* ;
- le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut ;

La figure (5.1) montre clairement les différents paramètres qui constituent le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince.

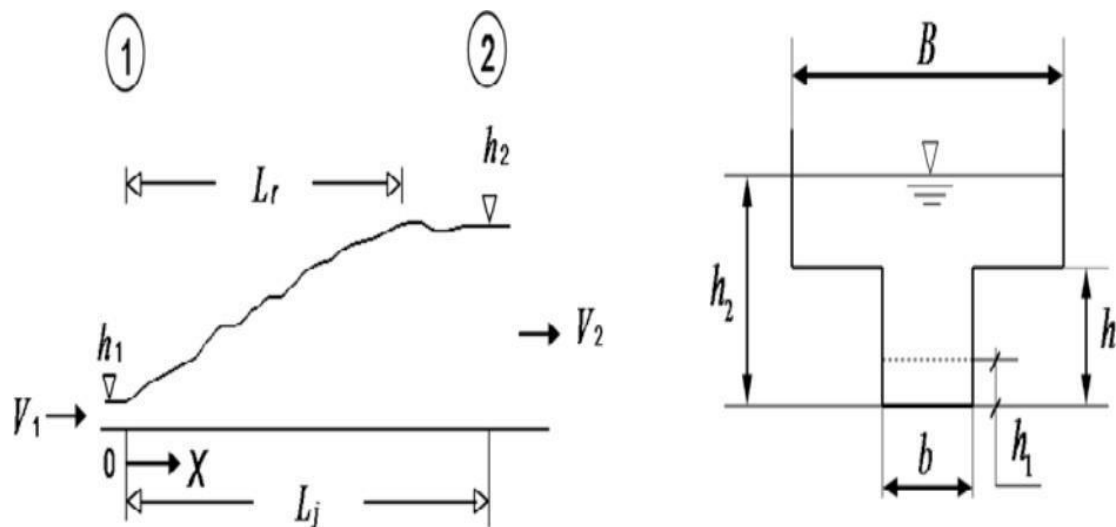


Figure 5.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince

V.1.2 Description des essais :

Un échantillon constitué de plus de 92 points de mesures expérimentales, pour chacun des paramètres intervenant au phénomène, a permis également pour ce type de ressaut, d'aboutir à des résultats significatifs. Ces paramètres sont : le débit Q , la hauteur initiale h_1 , la hauteur finale h_2 , la hauteur du seuil s . Ceux-ci permettent de composer les produits adimensionnels suivants : le nombre de Froude F de l'écoulement incident, le rapport $Y = h_2 / h_1$ du seuil.

Le nombre de Froude F est tel que : $Fr^2 = Q^2/b^2h_1^3(1)$

Ainsi lorsque nous obtenons une configuration du ressaut contrôlé (figure 5.1), nous effectuons, pour une hauteur initiale h_1 et une position x de seuil fixées, les opérations suivantes :

1. Lecture de la hauteur déversant h_q du déversoir rectangulaire.
2. Calcul du débit volume correspondant, par application de la relation du débitmètre rectangulaire (Hachemi . Rachedi L.2006):

$$Q = 0.3794B\sqrt{2g\beta} (1 + 0.16496\beta^{2.0716})^{3/2} h_{dev}^{3/2} (2)$$

Avec :

Q : le débit en (m^3/s).

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

B : le lit majeur (m).

g : l'accélération de la pesanteur (m/s^2).

$Y = h_2 / h_1$: Rapport des hauteurs.

h_{dev} : La hauteur de la lame déversoir en (m).

3. Calcul du nombre de Froude F de l'écoulement incident.

4. Mesure de la hauteur finale h_2 du ressaut.

V.2: Analyse des résultats expérimentaux :

Détermination expérimentale du rapport de la hauteur relative du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince et contrôler par marche positive.

V.2.1 Rapport des hauteurs conjuguées :

Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y est le rapport de la hauteur d'eau aval du ressaut hydraulique h sur la hauteur initiale du ressaut hydraulique h_1 ($Y = h_2 / h_1$).

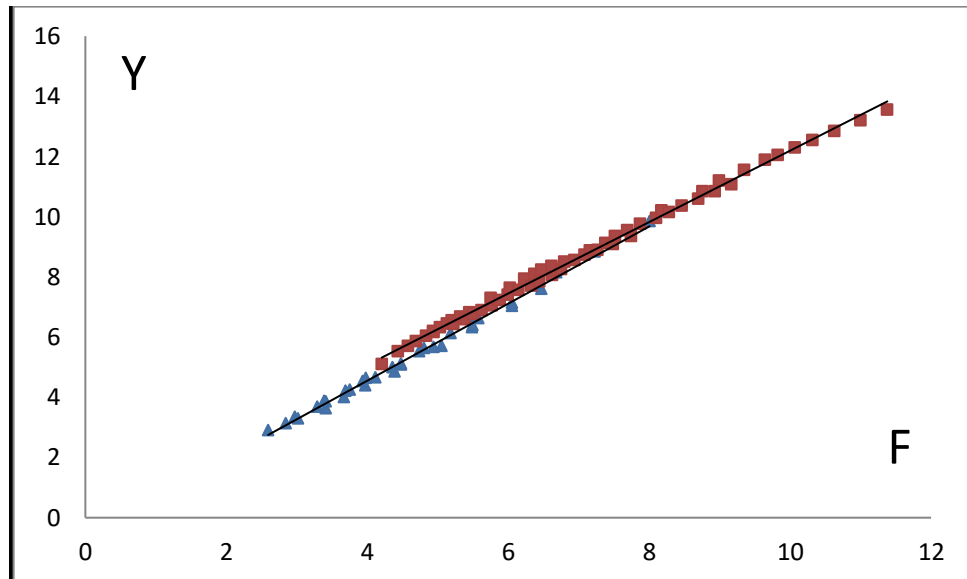


Figure.5.2 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F pour les deux lits du canal, (Δ) points de mesures expérimentales en lit majeur ; ($\square$) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement

La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que la relation $Y = f(F)$ suit une courbe linéaire pour chaque configuration du ressaut.

Par ailleurs, l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir également à une relation linéaire d'équation :

Pour ($h_2/h_1 \geq 1$) : $Y = 1,186F + 0,328$ $R^2=0,997$ (5.1)

$2.59 < F < 8$

Pour ($h_2/h_1 < 1$) : $Y = 1,281F - 0,573$ $R^2=0,995$ (5.2)

$4.20 < F < 11.37$

Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(F)$ pour chaque valeur de $h_2/h_1 \geq 1$ et $h_2/h_1 < 1$ sont consignées dans le tableau (5.1).

Tableau V.1: Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(F)$ pour $h_2/h_1 \geq 1$ et $h_2/h_1 < 1$
1. (Annexe V.1)

$h_2/h_1 \geq 1$		$h_2/h_1 < 1$	
F	Y	F	Y
2.59343184	2.9	4.20429778	5.1
2.84175859	3.14285714	4.43484959	5.525
2.97163878	3.35	4.5751372	5.7
3.019257	3.3	4.69315091	5.875
3.2881268	3.68571429	4.83608347	6.05
3.38786968	3.875	4.9424944	6.17142857
3.40915469	3.64	4.93216286	6.2
3.40915469	3.86666667	5.02887023	6.325
3.66801123	4	5.12620153	6.45
3.68986627	4.225	5.19960706	6.55
3.75569048	4.25714286	5.22064389	6.42857143
3.9689164	4.4	5.32272009	6.675
3.93310676	4.53333333	5.38995396	6.6
3.9778857	4.65	5.44678974	6.825
4.11323196	4.65714286	5.5038239	6.77142857
4.38841161	4.85	5.61848462	6.88571429
4.3575436	5	5.76291431	7.05714286
4.48145022	5.08	5.74841641	7.3
4.48145022	5.11428571	5.87933464	7.22857143
4.80533485	5.62857143	5.99652854	7.4
4.73271091	5.53333333	6.02104084	7.63333333
4.93698335	5.68	6.14410104	7.57142857
5.05314472	5.7	6.22825478	7.93333333
5.18326467	6.13333333	6.32275944	7.71428571
5.48669286	6.32	6.36769012	8.1
5.4966838	6.4	6.44280985	7.85714286
5.58017685	6.63333333	6.47293988	8.23333333
6.055414	7.15	6.62429088	8.05714286
6.055414	7.04	6.68515702	8.24
6.47293988	7.6	6.61416458	8.36666667
6.68515702	8.15	6.74620845	8.25714286
7.22557851	8.85	6.79211828	8.5
8.00531877	9.85	6.9356108	8.56666667
		7.08009982	8.73333333
		7.15999105	8.88
		7.26210203	8.9
		7.37938895	9.12
		7.48252756	9.1
		7.51208328	9.36
		7.74245221	9.36666667
		7.69023087	9.56
		7.86976486	9.76
		8.0961158	9.96
		8.17584272	10.2
		8.2787307	10.16

		8.46269833	10.36
		8.69454513	10.6
		8.75283246	10.85
		8.92847134	10.84
		8.98727565	11.2
		9.16445865	11.08
		9.34279096	11.55
		9.6425456	11.9
		9.82390715	12.05
		10.0674682	12.3
		10.3130096	12.55
		10.6226968	12.85
		10.9983307	13.2
		11.37829081	13.55

Détermination expérimentale de la hauteur relative du ressaut hydraulique contrôlé par marche positive :

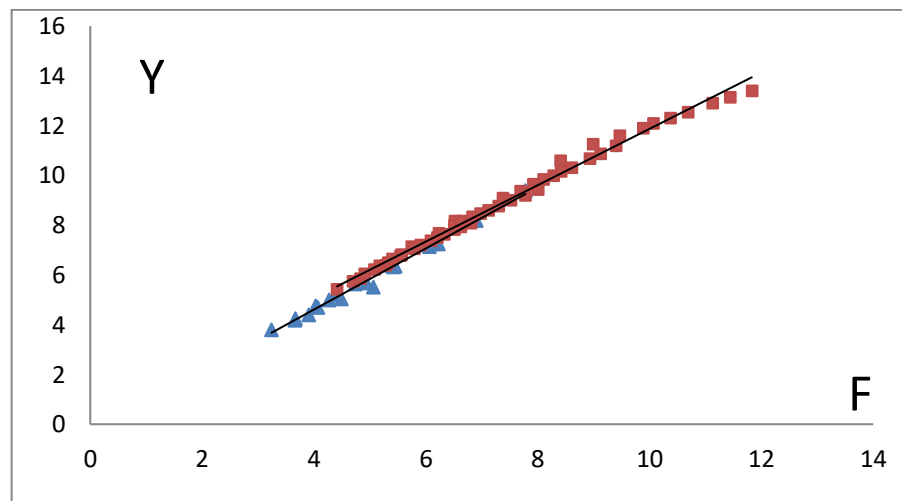


Figure.5.3 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F pour les deux cas du canal, (Δ) points expérimentaux ($\square$) Courbes d'ajustement

La figure 5.3 montre la représentation graphique des résultats expérimentaux de la variation du rapport des hauteurs conjuguées Y et le nombre de Froude F1 de l'écoulement incident.

Pour ($h_2/h_1 \geq 1$) : $Y = 1,133F + 0,540$ $R^2=993.....$ (5.2)

$3,24 < F < 7.77$

Pour ($h_2/h_1 < 1$) : $Y = 1,228F - 0,305$ $R^2=0,991$ (5.3)

$4.41 < F < 11.82$

Les points de mesures expérimentales de la figure 5.3 sont regroupés dans les tableaux (V.2).

Tableau V.2 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(F)$ pour $h_2/h_1 \geq 1$ et $h_2/h_1 < 1$ (Annexe V.2)

$h_2/h_1 \geq 1$		$h_2/h_1 < 1$	
F	Y	F	Y
3.24012543	3.8	4.41161023	5.425
3.65554207	4.17142857	4.69315091	5.75
3.66801123	4.25	4.83266373	5.85714
3.90334815	4.4	4.90808398	6.05
4.0228333	4.75	5.07745814	6.225
4.06149357	4.68571429	5.17509991	6.375
4.26537657	5	5.27688033	6.4
4.37517357	5.2	5.32272009	6.5
4.48145022	5.04	5.39704756	6.65
4.73271091	5.63333333	5.54672929	6.775
4.93698335	5.68	5.56105575	6.82857143
5.05314472	5.5	5.74841641	7.13333333
5.38050067	6.4	5.79194659	7.05714286
5.40698382	6.32	5.90856079	7.2
5.44678974	6.35	6.08492857	7.37142857
6.055414	7.15	6.20346408	7.51428571
6.22131006	7.24	6.22825478	7.66666667
6.89964398	8.2	6.32275944	7.62857143
7.77982523	9.4	6.51520055	8.16
		6.50311672	7.82857143
		6.50815074	8
		6.62429088	7.94285714
		6.64962922	8.16666667
		6.8074446	8.08571429
		6.82789761	8.33333333
		6.9716399	8.46666667
		7.11637697	8.6
		7.29868688	8.76666667
		7.37938895	9.08
		7.51947828	9
		7.69023087	9.36
		7.77982523	9.2
		7.91486373	9.64
		8.00531877	9.43333333
		8.0961158	9.84
		8.2787307	10
		8.41658015	10.16
		8.40506373	10.6
		8.60155584	10.32
		8.92847134	10.68
		8.98727565	11.25
		9.11709716	10.88
		9.4024892	11.2
		9.46231404	11.6
		9.88461089	11.9
		10.0674682	12.1
		10.3747024	12.3

		10.6849999	12.55
		11.1245059	12.9
		11.4420346	13.15
		11.8269805	13.4

Tableau V.3 : les résultats expérimentaux du rapport Y en fonction du F pour chaque ouverture h

Des mesures expérimentales permettent de tracer les courbes ci-dessus (Figure 5.1 à 5.2), qui relie le

A	B	Equation d'ajustement	R ²
1.133	0.540	$Y=1.113x+0.540$	0.993
1.186	0.328	$Y=1.186x+0.328$	0.997
1.228	-0.305	$Y=1.228x-0.305$	0.991
1.281	-0.573	$Y=1.281X-0.573$	0.995

rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du saut en fonction de nombre de Froude F pour le créneau h, les résultats obtenus sont convertis en tableau ci-dessous

D'après le tableau (V.1) ; les valeurs moyennes des A et B, $A=\Sigma a_i/n$, $B=\Sigma b_i/n$ $n=4$

$$A= 1.207 / B= - 0.01$$

En remplaçant les paramètres A et B par leurs valeurs respectives dans la relation $Y= A (F) + B$, on obtient l'approche expérimentale de la relation générale suivante :

$$Y_{relation} = 1.207 (F) - 0.01 \quad (5.3)$$

Pour : $2 < F < 11$

La représentation graphique (5.2) et (5.3) montre clairement que toutes les mesures expérimentales tournent autour de la première bissectrice qui fiabilisent la relation expérimentale globale obtenue (5.4).

V.3 Rendement du ressaut :

Le rendement η du ressaut est défini par le rapport de la perte de charge Δh qu'il occasionne à la charge totale dans sa section initiale :

$$\eta = \Delta h / h_1 \quad \text{avec: } \Delta h = h_1 - h_2 \quad \eta = \Delta h^*/h_1 = (h_2 - h_1^*)/h_1$$

Bien que la relation (4) permette le calcul explicite du rendement η , Hager et Sinniger (1986) proposent une expression approchée, applicable pour $F > 2$:

$$\eta = (1 - \sqrt{2/F})^2 \quad (5.4)$$

h_1 et h_2 désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut.

Les représentations graphiques des points expérimentaux ci-dessous (Figure 5.4 à 5.5) illustrent clairement la variation de rendement du ressaut η en fonction du nombre de Froude F

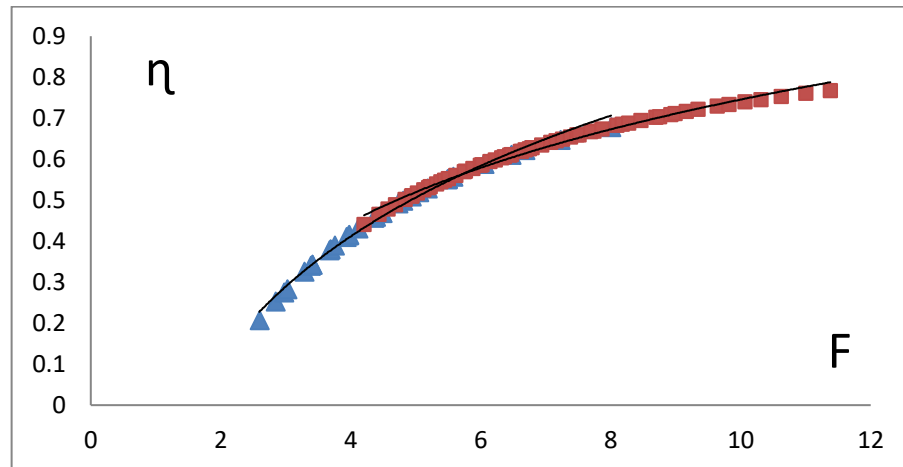


Figure 5.4: Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F pour l'ouverture

(□) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement

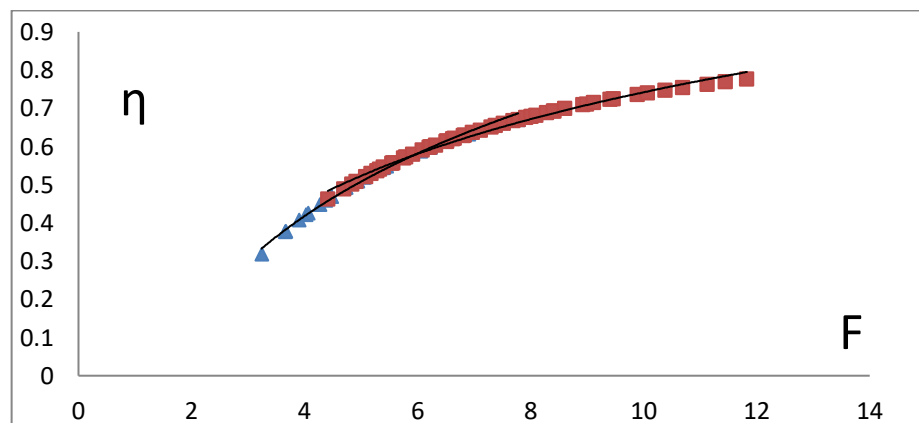


Figure 5.5: Variation de rendement η en fonction du nombre de Froude F pour l'ouverture (□) points expérimentaux, (—) Courbes d'ajustement

L'ajustement des mesures expérimentale des rendements variée en fonction de nombre de Froude différent ouverture est par la méthode moindre carrée est type logarithmique. Nous à donner des résultats qui sont mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Tableau V.4 : les résultats expérimentaux de rendement η en fonction du F pour chaque ouverture h et les mesures de (h_1/B) :

A	B	h/b	Equation d'ajustement	R^2
0.315	0.015	0.2	$0.315\ln(x) + 0.015$	0.990
0.325	- 0.005	0.175	$0.325\ln(x) - 0.005$	0.990
0.404	- 0.143	0,2	$0.404\ln(x) - 0.143$	0.994
0.425	- 0.177	0,15	$0.425\ln(x) - 0.177$	0.993

En injectant les expressions A et B dans la relation globale de forme **η relation** = **A** ln (F) + B, on obtient l'approche expérimentale de la relation générale suivante :

$$\eta \text{ relation} = [0.725 (h_1/B) + 0.367] \ln(F1) + [-0.31 (h_1/B) + 3.967]$$

A partir de ces résultats nous avons d'établir de relation expérimentale qui liée tous les coefficients de a_i et b_i en fonction de hauteur initiale relative.

Etude comparative :

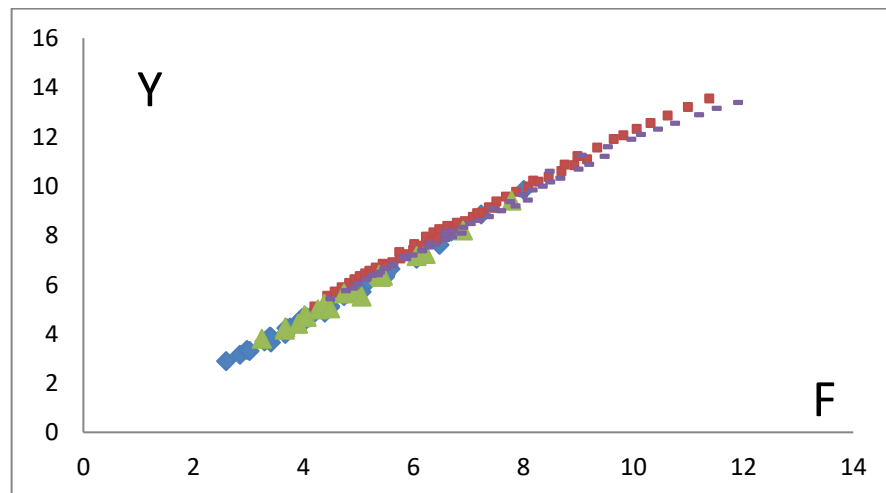


Figure 5.6: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F , pour les quarts configurations. Pour $h_2/h_1 \geq 1$ et ($h_2/h_1 < 1$)

Premier cas : ($h_2/h_1 \geq 1$)

La figure (5.4) montre la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour les deux configurations du ressaut citées précédemment.

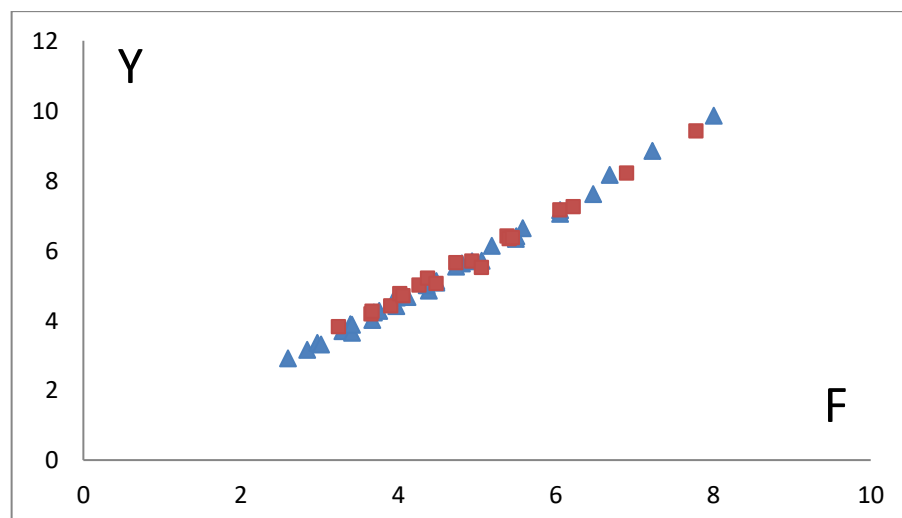


Figure 5.7: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F , pour les deux configurations. Pour $h_2/h_1 \geq 1$. ($\square$) seuil mince, (Δ) marche positive.

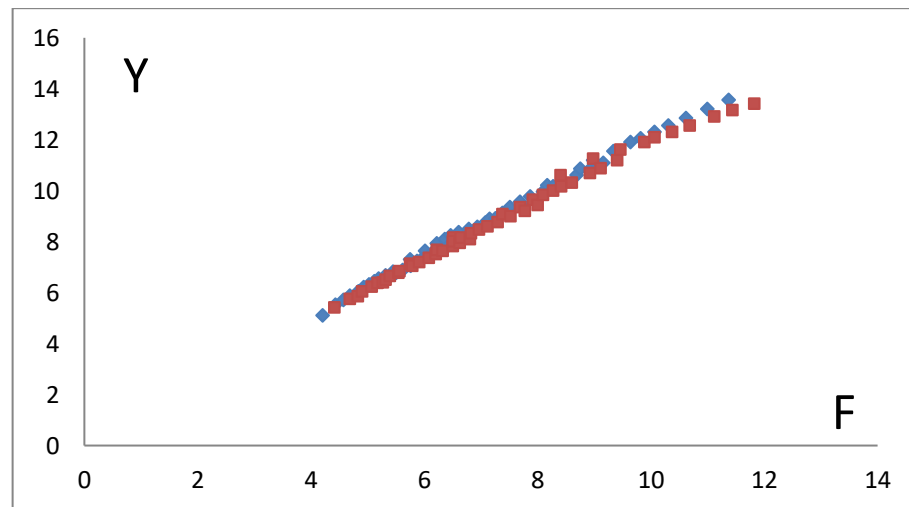
Deuxième cas : ($h_2/h_1 < 1$)

Figure 5.8: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F , pour les deux configurations. Pour $h_2/h_1 < 1$.

($\square$) seuil mince, (Δ) marche positive.

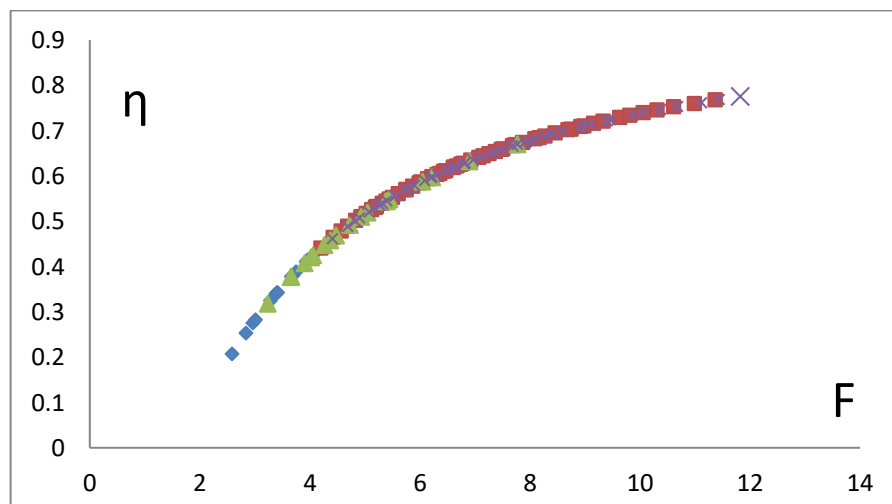
Troisième cas : Pour $h_2/h_1 < 1$ et $h_2/h_1 \geq 1$ 

Figure 5.9: Variation du rapport η des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F , pour les deux configurations. Pour $h_2/h_1 < 1$. et $h_2/h_1 \geq 1$ ($\square$) seuil mince, (Δ) marche positive.

En constate clairement que les mesures expérimentales dans la plus partie tourne de la première bissectrice qui justifier la fiabilité de nos mesures expérimentales obtenu au niveau de laboratoire "LARHYSS" (**BISKRA**). Les figures montrent que les courbes des ressauts contrôlés par seuil mince et épais sont quasiment confondus pour pratiquement toute la gamme des nombres de Froude.

V.4 CONCLUSION :

La deuxième partie de notre étude a concerné l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince et marche positive dans un canal rectangulaire de la forme composé

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F du ressaut contrôlé par seuil mince.

L'analyse des résultats expérimentaux nous a permis de trouver des approches expérimentales globales très acceptables.

Ce présent chapitre a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de la forme composé et contrôlé par seuil à paroi mince et marche positive

Dans un premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie par les essais.

Concernant la relation du rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2 / h_1$ en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident F , nous avons constaté qu'elle est linéaire de la forme $Y = A(F) + B$ et on a tenté de trouver une approche expérimentale globale de hauteur conjuguée ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée variant en fonction de nombre de Froude F et que cette relation a été justifier la première bissectrice.

Aussi on a essayé de trouver une relation globale de rendement η variée en fonction du nombre de Froude F et de l'ouverture h_1 .

Cette relation globale obtenue justifier toutes les mesures expérimentales par la première bissectrice. L'étude comparative montre que la hauteur relative du ressaut hydraulique reste le même pour les deux seuils testés. Ce qui montre que le type de seuil n'a pas d'influence sur la hauteur relative du ressaut hydraulique.

CONCLUSION DE LA PARTIE EXPERIMENTALE

Cette deuxième partie de notre étude a concerné, notre propre contribution dans l'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée par voie expérimentale.

Il a été procédé, une analyse expérimentale permettant de trouver deux relations fonctionnelles de la forme respectivement $f(Y, F)$ et $f(\eta, F)$ pour le canal rectangulaire de section composée.

Ces deux relations permettent de trouver le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient du nombre de Froude F de l'écoulement incident. Et aussi de du rendement en fonction du nombre de Froude incident F .

Par ailleurs, une étude expérimentale pour les ressauts hydrauliques évoluant dans ce type de canal a été effectuée.

L'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée, a été conduite pour quelques ouvertures h_1 , l'expérimentation a été menée sous quelques ouvertures de hauteurs : $2\text{cm} \leq h_1 \leq 4\text{cm}$ avec plusieurs seuils. Une large gamme de débit et de nombre de Froude a été obtenue. Dans un premier temps nous nous sommes intéressés la variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut h_2/h_1 en fonction du nombre de Froude incident. Il a été obtenu que le rapport des hauteurs conjuguées augmente avec l'augmentation du nombre de Froude. En outre, l'ajustement statistique des points de mesures, a permis d'aboutir, avec une assez bonne corrélation, à une équation linéaire liant Y , F .

L'étude expérimentale s'est intéressée ensuite à la dissipation de l'énergie cinétique.

Celle-ci étant représentée par le rendement. En effet, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que le ressaut dans un canal rectangulaire de section composée dissipe mieux l'énergie et que l'ajustement par la méthode des moindres carrés est de type logarithmique liant le rendement η , l'ouverture h_1 et le nombre de Froude incident F

CONCLUSION GENERALE

Notre mémoire de mastère a été consacré l'étude " **contribution à l'étude de l'effet de la marche positive sur les hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée**" Le manuscrit est divisé en deux parties : une première partie bibliographique et une seconde partie ayant concerné notre propre contribution.

- **La première partie a été divisée en trois chapitres :**

A travers le premier chapitre nous avons abordé les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique évoluant **dans un canal de section droite rectangulaire**. Nous avons examiné les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F à l'amont du ressaut.

- **Dans le deuxième chapitre :**

De la partie bibliographique nous avons traité le ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince dans un canal rectangulaire a été expérimentalement testé. Lorsque le seuil est placé à une distance X environ égale à la longueur L_r du ressaut, l'analyse des mesures expérimentales a montré que la hauteur relative S du seuil est telle que $= Co. (F_1 - 1)^{5/4}$. Le paramètre Co est linéairement dépendant de la position relative X/h_2 du seuil.

Pour le cas d'un seuil dénoyé placé à une distance X environ égale à la longueur L_j , du ressaut, l'étude a pu définir les fonctions $\xi(Y, S) = 0$ et $\zeta(F_1, S) = 0$, ainsi que la position relative X/h_1 du seuil nécessaire à la formation complète du ressaut.

- **Le dernier chapitre :**

de la partie bibliographique a mis l'accent sur l'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal composé droit à aboutit à une équation fonctionnelle de forme $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

Une nouvelle approche est proposée en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans nos développements, les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , augmentant, se sont certainement rapprochées de la réalité.

CONCLUSION GENERALE

• La deuxième partie de notre travail :

A concerné notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans le canal rectangulaire de section composée.

Nous avons consacré **pour le quatrième chapitre** à l'étude du modèle expérimental, qui a servi de base dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée, muni d'un seuil. Dans ce chapitre nous avons abordé les appareils de mesure utilisés dans ce travail au laboratoire. Nous les avons illustrés par des photographies, dans le but de prendre toutes les mesures nécessaires qui concernent les caractéristiques du ressaut hydraulique. Pour les mesures des débits, nous avons utilisé le débitmètre à déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale de Rachedi. Hachemi (2006) vu son efficacité et nous avons abouti à des résultats acceptables.

• Le cinquième chapitre de notre mémoire :

A concerné l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince et épaisse dans un canal rectangulaire en lit composée. L'analyse des résultats expérimentaux nous a permis de trouver des approches expérimentales globales très acceptables.

Dans un premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie par les essais. Passant en second temps aux résultats expérimentaux, qui ont été testées par vingt (20) seuil mince et dix-sept (17) seuils épais des hauteurs différentes. Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue.

En dernier temps Concernant la relation du rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident F , nous avons constaté qu'elle est linéaire de la forme $Y = A(F) + B$ et on a tenté de trouver une approche expérimentale globale de la deuxième hauteur conjuguée variant en fonction de nombre de Froude F et que cette relation a été justifié par la première bissectrice.

Aussi on a essayé de faire une comparaison entre la hauteur relative des deux types de seuil testés, on est abouti à dire que L'étude comparative montre que la hauteur relative du ressaut reste le même pour les deux seuils testés. Ce qui montre que le type de seuil n'a pas d'influence sur la hauteur relative du ressaut.

On espère bien qu'on a contribué à l'expérimentation de ce type du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée **et on recommandera de continuer les travaux de recherche dans ce type du canal en but d'élaborer d'autres approches expérimentales à caractère général servent au dimensionnement des bassins d'amortisseur**

REFERENCE ET BIBLIOGRAPHIE :

- Andersen J.V. M., 1978.** Un dular hydraulic jump, Proc, ASCE, j, Hydraulics Division, Vol.104.
- ACHOUR B. (2000)** Ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. JHR 2000; 38(4): 307-311.
- ACKERS P. (1991)** Hydraulic design of straight compound channels. SR281, HR Wallingford, Wallingford, U K, 1991.
- Achour B., Debabèche M., Khattaoui M., Bedjaoui A., 2002.** Ressaut hydraulique classique et contrôlé dans quelques profils de canaux. LARHYSS Journal 3eme Edition du 2 Mai 2002. Vol N°1, 37-72.
- Achour B., Khattaoui M., 2007.** Hystérésis du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire, Courier du savoir, 22-31.
- Belanger J. B., 1828.** Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes, Carilian- Goeury, Paris.
- Bradley J.N., 1957.** The hydraulic design of stilling basins: Hydraulic jumps on a horizontal apron, paper 1401, Proc. ASCE, J. Hyd. Div., Vol. 83.
- Bensidi Ahmed H., 2016.** Modélisation de l'écoulement dans un canal rectangulaire. Mémoire de Master. ENSH/Blida.
- BOUSMARD, 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.
- BOUSMAR D, WILKIN N, JACQUEMART, J H, ZECH Y. (2004)** Overbank flow in symmetrically narrowing flood plains. J H Eng 2004; 130(4): 305-312.
- Chow V.T., 1959.** Open- channel Hydraulics. McGraw Hill, New York.
- Carlier M., 1972.** Livre d'Hydraulique générale et appliquée, édition Eyrolles. Paris.
- Chanson H., 2009.** Development of the Bélanger Equation and Backwater Equation by Jean- Baptiste Bélanger (1828). J. Hydraulic. Eng., ASCE.
- Kateb, S., Ghomri, A., Debabeche, M.,** Experimental Study of The Hydraulic Jump In A Sloped Rectangular Channel, Journal of Fundamental and Applied Sciences, Université d'El Oued, pp. 10(1), 216-225,2018
- Ghomri, A., Debabeche, M., Riguet, F.,** l'étude semi théorique du Ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en "U" à fond rugueux, Revues des sciences fondamentales et appliquées, centre universitaire d'Oued Souf, No 01, pp.40-57, 2009.
- Forester J.W., Skrinde R.A., 1950.** Control of the hydraulic jump by sills. ASCE Transactions, 115(2415) : 973--987.
- Hager W. H., 1988.** Hydraulic jump in U-shaped channel, Proc. ASCE, J. Hydraulic Engineering.
- Hager W.H., 1990.** Classical hydraulic jump: length of roller. J. Hydraulic. Res., Vol. 28, n°5.

REFERENCE ET BIBLIOGRAPHIE :

Kateb S, 2013. Etude théorique et expérimental de quelques types de ressauts hydrauliques dans un canal trapézoïdal. These de doctorat. Université Mohamed Khider. Biskra.

Leutheusser, Kartha, 1972. Effects on inflow condition on hydraulic jump. J. Hydraulic. Div., Vol. 98, n°8.

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

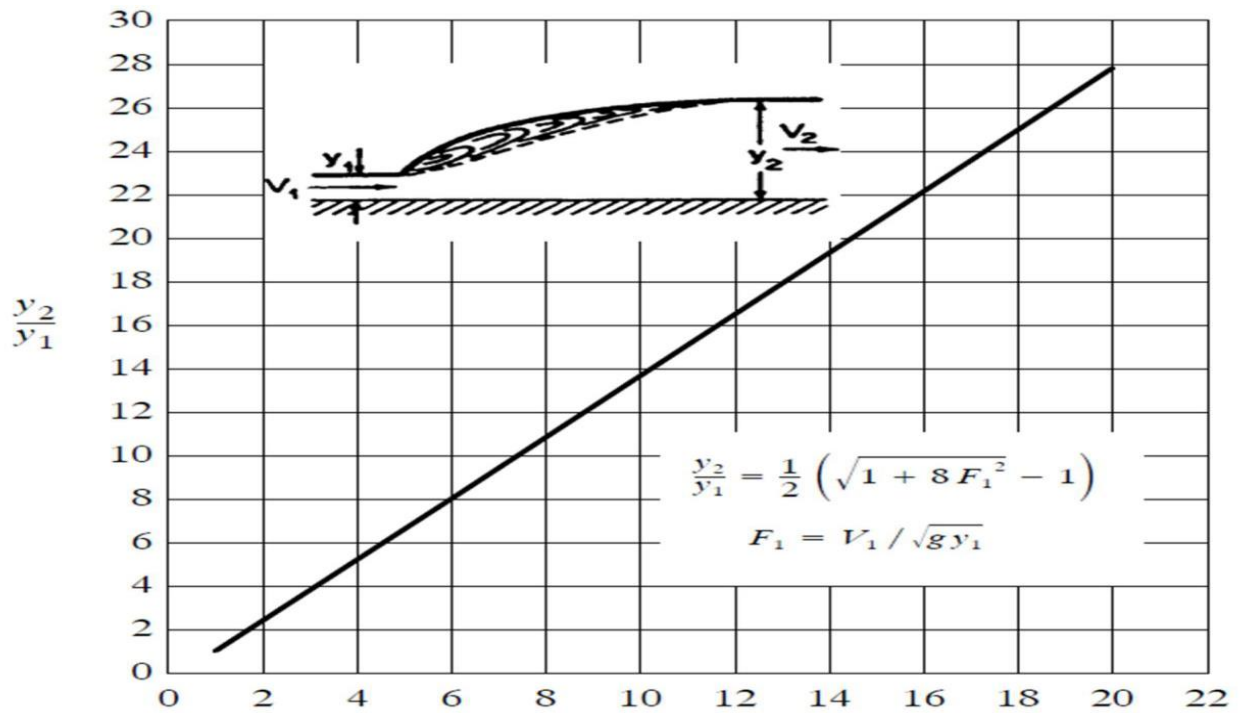
PROUST, S., BOUSMAR, D., RIVIÈRE, N., PAQUIER, A. AND ZECH, Y. (2010), Energy losses in compound open channels. Advances in Water Resources,

PROUST, S. (2005), Ecoulements non-uniformes en lits composés : effets de variations de largeur du lit majeur, PhD-Thesis, INSA de Lyon, n°2005-ISAL-0083, 362 p, Lyon, France vol.33, n°1, p. 1 - 16

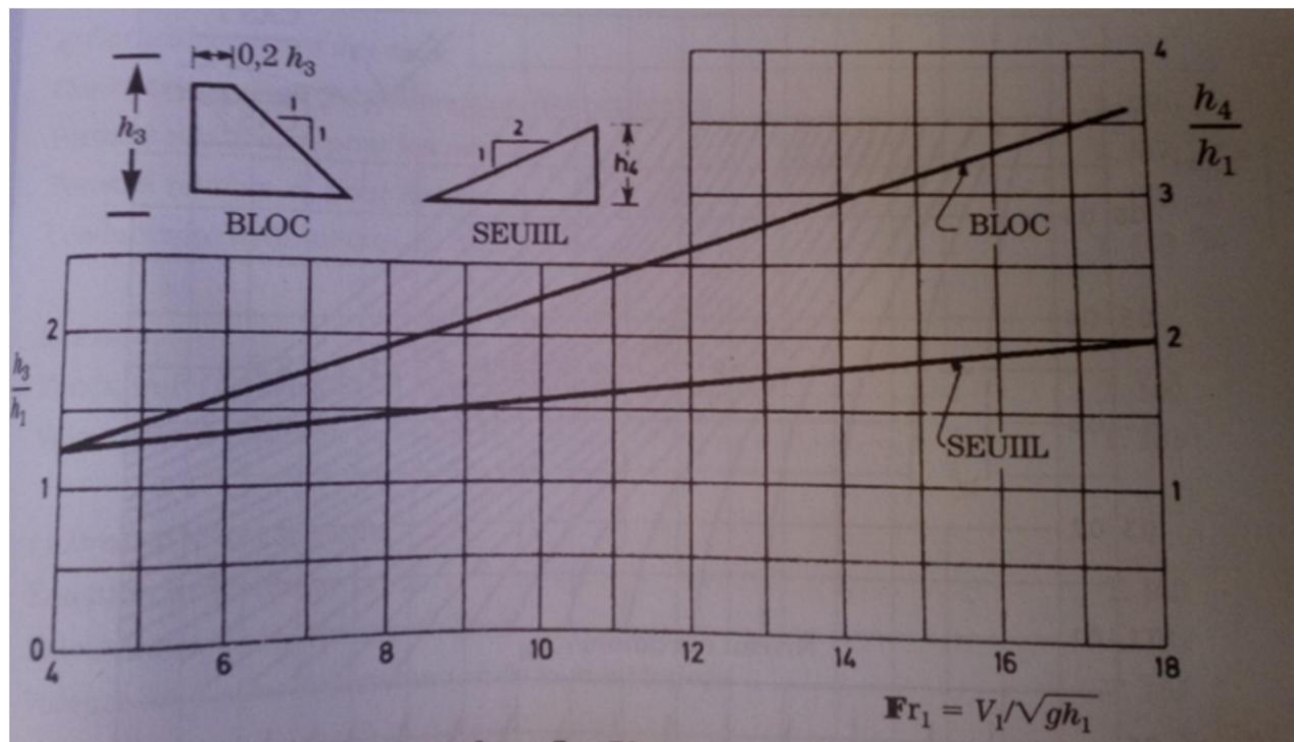
ANNEXES

ANNEXES :

Annexe I : Détermination du rapport des hauteurs du ressaut en fonction du nombre de Froude en amont pour un canal rectangulaire horizontal :



Annexe II : Dimensionnement des seuils de sortie pour les bassins de dissipation de type UBSR III:



Annexe III : Symboles et Notations :

f_x : Force de résistance	b : Largeur du lit mineur
$Y=h_2/ h_1$: Rapport des hauteurs conjuguées	B : Largeur du lit majeur
$\tau=h_1/h$: Rapport des hauteurs	h_1 et h_2 : 1 ^{ère} et 2 ^{ème} hauteur conjuguée du ressaut
$\beta=b /B$: Rapport de l'élargissement	h : Hauteur de plein bord du lit mineur
F_1 : Nombre de Froude de l'écoulement incident	L_j : Longueur du ressaut
f_1 et f_2 : Forces hydrostatiques au pied et à la fin du ressaut	L_r : Longueur du rouleau
A_1 et A_2 : Aires de la section au pied et à la fin du Ressaut	V_1 et V_2 : Vitesses moyennes au pied et à la fin du ressaut
H_1 et H_2 : Charges totales au pied et à la fin du ressaut	Q : Débit
ΔH : Pertes de charge dues au ressaut	g : Accélération de la pesanteur
ϖ : Poids spécifique du liquid	k : Coefficient
η : Rendement du ressaut	

ANNEXES

Annexe V.1 : (Tableau V.1) : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(F)$ pour $h_2/h_1 \geq 1$ et $h_2/h_1 < 1$.

$h_2/h_1 \geq 1$		$h_2/h_1 < 1$	
F	Y	F	Y
2.59343184	2.9	4.20429778	5.1
2.84175859	3.14285714	4.43484959	5.525
2.97163878	3.35	4.5751372	5.7
3.019257	3.3	4.69315091	5.875
3.2881268	3.68571429	4.83608347	6.05
3.38786968	3.875	4.9424944	6.17142857
3.40915469	3.64	4.93216286	6.2
3.40915469	3.86666667	5.02887023	6.325
3.66801123	4	5.12620153	6.45
3.68986627	4.225	5.19960706	6.55
3.75569048	4.25714286	5.22064389	6.42857143
3.9689164	4.4	5.32272009	6.675
3.93310676	4.53333333	5.38995396	6.6
3.9778857	4.65	5.44678974	6.825
4.11323196	4.65714286	5.5038239	6.77142857
4.38841161	4.85	5.61848462	6.88571429
4.3575436	5	5.76291431	7.05714286
4.48145022	5.08	5.74841641	7.3
4.48145022	5.11428571	5.87933464	7.22857143
4.80533485	5.62857143	5.99652854	7.4
4.73271091	5.53333333	6.02104084	7.63333333
4.93698335	5.68	6.14410104	7.57142857
5.05314472	5.7	6.22825478	7.93333333
5.18326467	6.13333333	6.32275944	7.71428571
5.48669286	6.32	6.36769012	8.1
5.4966838	6.4	6.44280985	7.85714286
5.58017685	6.63333333	6.47293988	8.23333333
6.055414	7.15	6.62429088	8.05714286
6.055414	7.04	6.68515702	8.24
6.47293988	7.6	6.61416458	8.36666667
6.68515702	8.15	6.74620845	8.25714286
7.22557851	8.85	6.79211828	8.5
8.00531877	9.85	6.9356108	8.56666667
		7.08009982	8.73333333
		7.15999105	8.88
		7.26210203	8.9
		7.37938895	9.12
		7.48252756	9.1
		7.51208328	9.36
		7.74245221	9.36666667
		7.69023087	9.56
		7.86976486	9.76
		8.0961158	9.96
		8.17584272	10.2
		8.2787307	10.16

ANNEXES

		8.46269833	10.36
		8.69454513	10.6
		8.75283246	10.85
		8.92847134	10.84
		8.98727565	11.2
		9.16445865	11.08
		9.34279096	11.55
		9.6425456	11.9
		9.82390715	12.05
		10.0674682	12.3
		10.3130096	12.55
		10.6226968	12.85
		10.9983307	13.2
		11.37829081	13.55

ANNEXES

Annexe V.2 : (Tableau V.2) : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(F)$ pour $h_2/h_1 \geq 1$ et $h_2/h_1 < 1$

$h_2/h_1 \geq 1$		$h_2/h_1 < 1.$	
F	Y	F	Y
3.24012543	3.8	4.41161023	5.425
3.65554207	4.17142857	4.69315091	5.75
3.66801123	4.25	4.83266373	5.85714
3.90334815	4.4	4.90808398	6.05
4.0228333	4.75	5.07745814	6.225
4.06149357	4.68571429	5.17509991	6.375
4.26537657	5	5.27688033	6.4
4.37517357	5.2	5.32272009	6.5
4.48145022	5.04	5.39704756	6.65
4.73271091	5.63333333	5.54672929	6.775
4.93698335	5.68	5.56105575	6.82857143
5.05314472	5.5	5.74841641	7.13333333
5.38050067	6.4	5.79194659	7.05714286
5.40698382	6.32	5.90856079	7.2
5.44678974	6.35	6.08492857	7.37142857
6.055414	7.15	6.20346408	7.51428571
6.22131006	7.24	6.22825478	7.66666667
6.89964398	8.2	6.32275944	7.62857143
7.77982523	9.4	6.51520055	8.16
		6.50311672	7.82857143
		6.50815074	8
		6.62429088	7.94285714
		6.64962922	8.16666667
		6.8074446	8.08571429
		6.82789761	8.33333333
		6.9716399	8.46666667
		7.11637697	8.6
		7.29868688	8.76666667
		7.37938895	9.08
		7.51947828	9
		7.69023087	9.36
		7.77982523	9.2
		7.91486373	9.64
		8.00531877	9.43333333
		8.0961158	9.84
		8.2787307	10
		8.41658015	10.16
		8.40506373	10.6
		8.60155584	10.32
		8.92847134	10.68
		8.98727565	11.25
		9.11709716	10.88
		9.4024892	11.2
		9.46231404	11.6
		9.88461089	11.9
		10.0674682	12.1
		10.3747024	12.3

ANNEXES

		10.6849999	12.55
		11.1245059	12.9
		11.4420346	13.15
		11.8269805	13.4