



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 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 A L'ETUDE THEORIQUE
DU RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT
EN CANAL RECTANGULAIRE DE SECTION
COMPOSEE A FOND RUGUEUX**

✓ Présenté par:

• GUEHEF A/Hamid

Dirigé par: GHOMRI Ali

Promotion: juin 2020

Résumé:

Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier, d'un point de vue théorique et expérimental, le ressaut hydraulique, dans un canal rectangulaire de section composée à fond rugueux. Des relations fonctionnelles, en terme adimensionnel, liant les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique , faisant apparaître l'influence de la rugosité absolue du fond du canal, ont été proposées. Les équations obtenues sont représentées en termes adimensionnels, afin de permettre leur utilisation dans la pratique.

Abstract:

The aim of this thesis is to study, from a theoretical and experimental point of view, the hydraulic jump, in a rectangular channel of compound section with a rough bottom. Functional relationships, in dimensionless terms, linking the different characteristics of the hydraulic jump, showing the influence of the absolute roughness of the bottom of the channel, have been proposed. The equations obtained are represented in adimensional terms, in order to allow their use in practice.

ملخص:

هذه المذكرة تهدف إلى الدراسة النظرية والتجريبية للقفزة الهيدروليكية في قناة ذات شكل مستطيل. ذات خشونة في القاع. تم إيجاد علاقات عامة تظهر تأثير الخشونة المطلقة لقاع القناة على الخصائص الهيدروليكية لهذا النوع من القفزات الهيدروليكية. المعادلات التي تم الحصول عليها هي بدون أبعاد، وذلك لاستعمالها في الواقع.

Remerciement...

Je tiens à remercier vivement mon promoteur le
professeur,

Ali GHOMRI

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I, Définitions	
I.1 Introduction	3
I.2 Ressaut Hydraulique	3
I.3 Origine et Nombre de Froude	4
I.4 Caractéristiques d'un Ressaut Hydraulique	5
I.4.1 Les hauteurs conjuguées (h_1 , h_2)	5
I.4.2 La longueur (L_r),	5
I.4.3 La longueur (L_j),	5
I.4.4 Le rendement du ressaut hydraulique	5
I.5 Types du Ressaut Hydraulique	6
I.6 Le coefficient de corrélation	6
I.7 Le coefficient de détermination R^2	6
Partie I, Etude Bibliographique	
Introduction de la première Partie	7
Chapitre II, Ressaut Hydraulique en Canal Rectangulaire	
II.1 Introduction	9
II.2 Le ressaut hydraulique classique	9
II.2.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	11
II.2.2 Longueur du ressaut hydraulique	11
II.2.3 Longueur du rouleau de surface	12
II.2.4 Rendement du ressaut hydraulique	13
II.3 Ressaut Hydraulique dans un Canal incliné à pente positive	13
II.3.1 Classification des ressauts inclinés	13
II.4 Conclusion	18
Chapitre III, Ressaut hydraulique dans un Canal rectangulaire Composée	
III.1 Introduction	19
III.2 Rapport des hauteurs conjuguées	19
III.3 Rendement du ressaut	22
III.4 Conclusion	24
Chapitre IV, Ressaut Hydraulique en Canal Triangulaire	
IV.1 Introduction	24
IV.2 Déroulement des Essais	24
IV.3 Préparation de la rugosité des parois,	25
IV.4 Résultats Expérimentaux	26
IV.4.1 Longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	26
IV.4.2 Rapport Y des Hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1	28
III.4.3 Rendement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses	31
IV.4.4 Profil de surface généralisé du ressaut hydralique	32
IV.5 Conclusion	33
Chapitre V, Ressaut Hydraulique en Canal Circulaire avec Banquette	
V.1 Introduction	34
V.2 Le Rendement	36
V.3 Les Essais au laboratoire	36

V.4	Conclusion	37
	Conclusion de la Partie bibliographique	38
	Partie II, Contribution à l'Etude du Ressaut Hydraulique dans un canal Rectangulaire de section composée à Fond Rugueux	
	Introduction à la deuxième Partie	40
	Chapitre VI, Analyse Théorique	
VI.1	Introduction	41
VI.2	Analyse Théorique	41
VI.3	Conclusion	45
	Chapitre VII, Essais au Laboratoire et analyses des résultats expérimentaux	
VII.1	Introduction	46
VII.2	Le canal d'essai	46
VII.3	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	48
VII.3.1	expérimentales ayant servi au traçage des courbes de $f(Y)$ en fonction de F_1^2 pour les cinq valeurs de la rugosité ε	48
VII.3.2	Variation du coefficient de résistance C_r en fonction de la rugosité relative (ε / b)	50
VII.3.3	Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du coefficient C_r de résistance et du nombre de Froude incident F_1	52
VII.4	Conclusion	53
	Conclusion de Deuxième Partie	54
	Conclusion Générale	55
	Principales Notations et Références Bibliographiques	ii
	Liste des Figures	vi
	Liste des Tableaux	v

Introduction

Générale

La nature... il nous a que l'observer, ses comportements, ses formes et les événements qui se produisent dans l'espace et le temps, ISSAK Newton n'a fait qu'a regardé la pomme qui a été tombée sur terre pour déduire la fameuse loi de la dynamique qui grâce à elle toute la science qui était et qui serait développée se basant sur elle, de plus surtout les physiciens qui ont une spécificité de poser des questions, et énoncer des explications sur des phénomènes naturels citant les séismes, les volcans, les orages, les crues, la températures, le climat... et qui ont toujours la volonté de les rendre compatibles et les soumettre à des lois analytiques ou empiriques en facilitant les taches de les étudier et analyser ,

Le phénomène de ressaut hydraulique est un phénomène qui se peut être soit constaté naturellement dans les oueds en temps des crues lorsqu'un obstacle de dimensions déterminées se trouvant installé dans le parcours, dans les endroits des tombes d'eau, et plus simplement lorsqu'en versant un vaisseau d'eau sur une surface plus ou moins plane, exemple dans les lavabos, soit avec l'introduction de l'industrie en but de faire solutionner les problèmes des écoulements à travers des ouvrages hydrauliques bien déterminés en dissipant l'énergie. Ce ressaut est formé lors de la transition brusque d'un écoulement torrentiel à un écoulement fluvial, durant cette transition une onde stationnaire se forme et l'énergie est alors dissipée par turbulence, pour assurer une bonne dissipation d'énergie il est demandé de bien dimensionner un tel ou tel ouvrage qui ont pour rôle la création de ressaut hydraulique, c'est-à-dire de faire changer le type d'écoulement du torrentiel au fluvial , de ce fait on constate qu'une durable relation existe entre le but d'avoir dissiper l'énergie et l'installation de tel ouvrage, cette installation nécessite une bonne connaissance des caractéristiques du ressaut, tel que les hauteurs d'eau en amont et en aval du ressaut (hauteurs conjuguées), et les longueurs du ressaut hydraulique nécessairement à la détermination des dimensions du bassin d'amortissement,

La modification des conditions à l'amont (débit, hauteurs, ...etc.) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur, la pente du canal,...etc.) peut conduire à différentes configurations du ressaut, le ressaut est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente nulle ou faible, sans obstacle à l'aval (Hager, Bremen et Kawagoshi ; 1990), il est dit contrôlé lorsque sa formation est conditionnée par la mise en place d'un obstacle (Hager et Bretz, 1988), Il est dit forcé lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle (Rand, 1957 ; Bretz, 1988).

Tous les travaux et recherches qui ont été effectués en ce propos ont confirmé que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale, c'est la second loi de Newton qui est appliquée, qui montre que la variation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut est égale à la résultante des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement, à l'issue de l'application de la quantité de mouvement on abouti à quantifier les paramètres de ressaut hydraulique cités au dessus, tel que les hauteurs conjuguées, la longueur de ressaut, en fonction de nombre de Froude et le débit à l'amont, notant que les longueurs de ressaut et de

celle de rouleau de surface qui sont deux caractéristiques très importantes ne s'évaluent que par la voie expérimentale (exp: Bradley et Peterka, 1957).

Le but de notre travail est la contribution de l'approche semi théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée à fond rugueux. Cette approche est à caractère général permettant au dimensionnement des ouvrages annexes du barrage tel que le bassin d'amortissement.

Notre contribution est scindée en deux parties fondamentales, la première partie, à travers laquelle nous passerons en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique, cette partie bibliographique sera divisée en cinq chapitres la première enveloppe les définitions des principales caractéristiques et paramètres du ressaut hydraulique, les autres chapitres chacun exposant un type de canal où le ressaut hydraulique s'évolue de manière récapitulée citant le canal rectangulaire, Triangulaire, trapézoïdal et le type composé d'un canal circulaire avec un banquette, la deuxième partie de notre contribution, est la contribution de l'étude de l'approche semi théorique du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée à fond rugueux, l'objectif primordial de cette contribution de recherche est l'établissement de l'approche semi théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée à fond rugueux, à cet effet notre contribution a été divisé en deux chapitres, le premier chapitre permettant de décrire le modèle expérimental régissant notre type du ressaut cité précédemment, et le second chapitre est consacré à l'élaboration et l'étude de l'approche semi théorique du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée à fond rugueux en faisant apparaître l'effet de la rugosité testée expérimentalement.

Chapitre I

Définitions

I.1 Introduction,

Ce chapitre est consacré à citer les définitions des termes et nomenclatures ayant des relations avec l'objet de notre recherche, en montrant leurs utilités et l'objectif de les prendre en considération, en commençant par le pivot de notre étude qui est le ressaut hydraulique,

I-2 Ressaut hydraulique,

La différence entre l'écoulement à surface libre et celui en charge est que le premier est un écoulement dont la surface libre est en contact avec l'atmosphère, le ressaut hydraulique est un phénomène qui se manifeste dans les écoulements à surface libre et qu'il est facile d'observer dans un évier fond bien plat, lorsque le jet d'eau sortant du robinet touche la surface de l'évier, le jet s'étale en une nappe circulaire, si on choisit bien le débit, la nappe d'eau change brusquement d'épaisseur à une distance du centre de l'ordre d'une dizaine de cm, la zone centrale de la nappe est plus mince que la zone externe, sa surface apparaît également beaucoup plus lisse, ce risque de changement d'épaisseur est « le ressaut hydraulique », ce phénomène est souvent observé en aval des déversoirs du barrage .

Le ressaut hydraulique se caractérise par une variation importante et croissante de la hauteur d'eau de l'amont vers l'aval sur une courte distance. Dans la plupart des cas, une agitation importante de la surface libre permet rapidement de localiser le phénomène, comme par exemple dans le cas d'un ressaut fort. Le ressaut hydraulique est l'un des phénomènes les plus complexes en hydraulique à surface libre. Les connaissances actuelles sur le ressaut hydraulique ne sont pas encore suffisamment étendues pour que l'écoulement interne soit parfaitement compris



Figure 1.1 : Ecoulements à surface libre dans un évier à fond bien plat

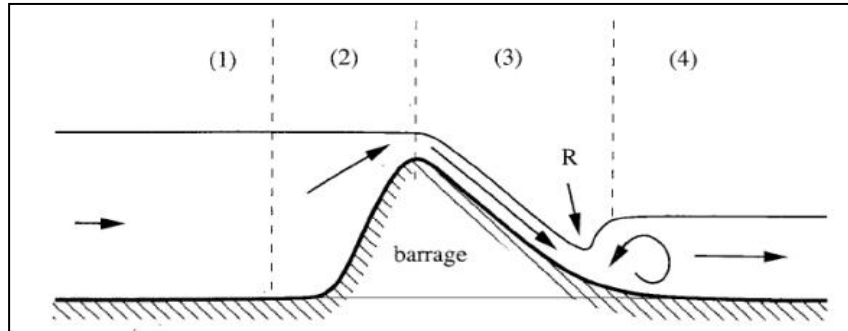


Figure 1.2 : Ressaut Hydraulique à travers un déversoir

Le ressaut hydraulique est une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement, ce phénomène peut s'observer en particulier dans le déversoir en aval d'un barrage Figure 1.2, l'écoulement à faible vitesse en amont du barrage (1), s'accélère à l'approche de celui-ci (2), atteint une grande vitesse dans le déversoir (3) puis présente une transition brusque (ressaut) vers une zone de faible vitesse (4), on a en l'occurrence passage brutal du régime torrentiel (3) au régime fluvial (4).

I-3 Origine et Nombre de Froude :

L'origine du ressaut hydraulique est physique liée aux ondes de surface qui se propagent à la surface de l'eau, lorsque l'épaisseur d'eau est très faible, c'est-à-dire beaucoup plus petite que la longueur d'onde (des ondes de surface), la vitesse de propagation des ondes est celle des ondes dites de gravité (h), où (h) est la hauteur d'eau, l'épaisseur de la nappe d'eau qui s'étale est constante, la conservation du débit impose alors que la vitesse décroisse de façon inversement proportionnelle au rayon, si la vitesse au centre est supérieure à la vitesse de propagation, il existe un rayon critique au-delà duquel la vitesse devient inférieure à la vitesse de propagation, ce rayon critique correspond à la position du ressaut, alors d'ici on fait appel à un rapport entre ces deux vitesses qui est le nombre de Froude, qui est un rapport entre la vitesse du fluide et la vitesse de propagation des ondes de surface (William Froude 1810-1878),

$$F_1 = \frac{u}{\sqrt{gh}}$$

Si $F_1 < 1$ l'écoulement est fluvial, la vitesse de propagation des ondes supérieure à celle de fluide

Si $F_1 > 1$ l'écoulement est Torrentiel, la vitesse de propagation des ondes inférieure à celle de fluide .

Si $F_1 = 1$ l'écoulement est critique, les deux vitesses sont égales,

Notant que le passage d'un régime fluvial au régime torrentiel se fait d'une manière brusque ou graduelle mais sans grandes perturbations, tandis que le passage du torrentiel au fluvial s'effectue brusquement à l'aide d'un ressaut hydraulique.

Canal composé (lit composé): Le canal composé ou lit composé est caractérisé par un lit mineur surmonté d'un lit majeur de largeur plus grande que celle du lit mineur,

I-4 Caractéristiques d'un Ressaut Hydraulique,

I-4-1 Les hauteurs conjuguées (h_1 , h_2),

Se sont respectivement les hauteurs hydrauliques à l'amont et à l'aval du ressaut hydraulique, qui seront déterminées sous la forme $Y=h_2/h_1$ en relation avec le nombre de Froude F_1 ,

I-4-2 La longueur (L_r),

On distingue deux types de Rouleau, développé qui présente une forme uniforme et non développé caractérisé par une surface libre perturbée sous l'effet des vagues, étant donné que les longueurs ne se déterminent qu'expérimentalement, 'Hager et al' ont donné une relation liant le rapport (L_r / h_1) le nombre de Froude(F_1) et le rapport entre (h_1 / b),

I-4-3 La longueur (L_j),

Est pratiquement difficile à déterminer qu'en tenant compte que la surface libre est horizontale, une faible turbulence de rouleau, l'inexistence des bulles d'air,

Les essais de 'Bradley et Peterka' ont permis à 'Hager et al' de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur L_j du ressaut en donnant le rapport (L_j / h_1) en fonction de Froude (F_1),

I-4-4 Le rendement du ressaut hydraulique,

Est le ratio entre l'énergie en amont H_1 et l'énergie dissipée durant le ressaut H_1 , il est déterminé en utilisant le théorème de Bernoulli entre les deux section 1 et 2, l'équation de la quantité de mouvement d'un écoulement permanent et la formule donnant le nombre de Froude, ce rendement est fonction de rapport des hauteurs conjuguées ($Y= h_2/ h_1$) et le nombre de Froude (F_1), traduit par la relation dite de 'Bélanger'.

Pour un nombre de Froude ($F_1 > 2$), 'Hager et Sinniger' ont proposé une relation simple pour déterminer le rendement,

I-5 Types Ressaut Hydraulique,

Trois types de ressaut hydraulique sont connus, classique, contrôlé et forcé, se résultent en modifiant les conditions à l'aval et à l'amont, l'application de l'équation de quantité de mouvement entre la section initiale et finale du ressaut hydraulique permet l'évaluation de la relation entre le rapport des hauteurs et le nombre de Froude (débit relatif), par contre les longueurs du ressaut s'évaluent par des essais au laboratoire en formulant des relations empiriques qui lient les paramètres qui entrent en jeu,

I-6 Le coefficient de corrélation,

Est un terme qu'on va l'utiliser pour confirmer l'existence ou non de corrélation, positive ou négative et est ce qu'elle est de forte liaison ou faible entre deux grandeurs, ce coefficient se calcule par la voie statistique est le rapport entre le covariance de deux grandeurs et le produit de l'écart type de chacun, $\text{covariance AB} / (\text{écart-typeA} * \text{écart-typeB})$. D'autre terme ce coefficient montrant le pourcentage des points de mesures qui ont suivi la même variation d'une fonction sur un graphe, qui s'appelle aussi Le coefficient de détermination R^2 ,

Partie I

Etude

Bibliographique

Introduction,

Dans cette partie , on va essayer de donner une synthèse bibliographique décrivant l'état de connaissances des principaux travaux entrepris dans le domaine de la dissipation d'énergie par ressaut hydraulique, ayant pour objet de mettre le point sur le ressaut hydraulique dans quatre canaux prismatiques, le canal rectangulaire, le canal triangulaire, le canal trapézoïdal, et le canal circulaire avec banquettes, à fond horizontal et incliné , elle est divisée en quatre chapitres,

- Le premier chapitre, consacré pour les travaux relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire dont trois types de ressaut seront alors étudiés, le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons des travaux de Hager (1990) concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal, puis Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à pente positive, où on examinera les travaux de Kindsvater (1944) et à la fin on abordera le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à pente négative, où nous verrons en particulier l'étude de Mc Corcodal et Mohamed (1994), qui ont été consacrée à l'étude théorique et expérimentale de ce type de ressaut, des relations liant des paramètres adimensionnels, seront alors proposées.

- Le deuxième chapitre, sera consacré aux travaux les plus importants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire, trois types de ressaut seront étudiés :

- Le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons dans un premier temps des travaux de Hager et Wanoschek (1987) concernant le ressaut évoluant dans un canal triangulaire de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture de 90° . Dans un second temps nous aborderons le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, concernant l'étude d'Achour et Debabeche (2003), qui a pour objectif d'expérimenter le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° . L'étude se proposera de trouver des relations fonctionnelles liant les caractéristiques du ressaut hydraulique.

- Le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire incliné à pente positive, où on va aborder les travaux de Debabeche et al (2009) et de Cherhabil (2010) (thèse de doctorat), qui ont traité au ressaut hydraulique dans un canal triangulaire incliné à pente positive à angle d'ouverture de 90° .

- Le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire incliné à pente négative, où on va aborder les résultats du mémoire de magister de Temim (2008), qui ont traité le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° à fond incliné, formant une pente négative par rapport à l'horizontal.

- Dans le troisième chapitre nous allons examiner les travaux relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal, deux types de ressaut seront alors traités, une première partie qui a été consacré à un bref aperçu sur le ressaut hydraulique classique, ensuite nous passerons en revue les travaux de Hager et Wanoschek (1989) relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal de pente géométrique horizontale, à parois latérales inclinées d'un angle de 45° , une deuxième partie qui a été consacrée à un développement théorique et expérimental du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique, à fond incliné, formant une pente positive avec l'horizontale, où on va aborder les résultats du mémoire de magister de Riguet (2011),

- Dans le quatrième chapitre nous allons examiner les travaux relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal circulaire avec banquettes, un seul type de ressaut sera alors traité, qui a été consacré sur les travaux de thèse Magister de S. ZIANI, Ce canal est caractérisé par un lit mineur de diamètre d et un lit majeur de diamètre D , dont l'introduction de la définition des centres de gravité de la section amont et aval du ressaut qui ont été déterminés en appliquant les moments statiques en connaissant l'angle d'ouverture de la surface libre et le diamètre, qui vont être bien entendu nécessaire pour le calcul de force de volume,

Chapitre II

***Ressaut Hydraulique
en Canal Rectangulaire***

II.1.Introduction

Dans ce chapitre nous allons traiter les travaux relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire, trois types de ressaut seront alors étudiés:

- Le ressaut hydraulique classique, où nous parlerons des travaux de Hager et al (1990) qui concernent le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal.
- Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à pente positive, où on va citer les travaux de Kindsvater (1944) relatifs au ressaut hydraulique en canal rectangulaire à pente positive.
- Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à pente négative, nous examinerons l'étude de Mc Corcodal et Mohamed (1994) qui ont étudié le cas limite d'existence des ressauts en pente négative, une relation théorique a été proposée pour le type D.

II-2 Le ressaut hydraulique classique,

Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu' il se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible d'où on va parler sur les travaux de Hager et al (1990) qui concernent le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal,

-Le Pré-ressaut: Pour des valeurs de $1.7 < F_1 < 2.5$ on constate le même phénomène, mais plus accentué ; dans ce cas se produisent déjà de petits tourbillons superficiels. Jusqu'à ces valeurs de F_1 , la surface libre est raisonnablement plane et la distribution des vitesses est régulière mais le rendement obtenu est très faible : c'est le pré-ressaut (figure 2.1).

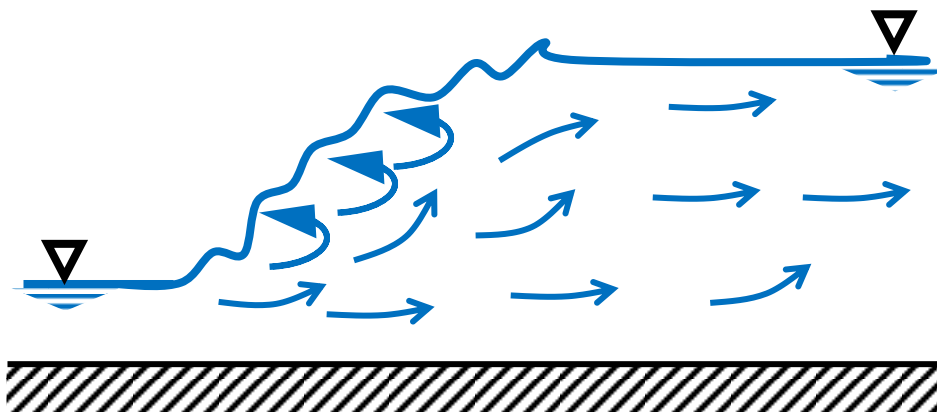


Figure 2.1, Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). 'Pré-ressaut'

-Le ressaut de transition: Pour des valeurs de $2.5 < F_1 < 4.5$ l'écoulement est pulsatif ; la plus grande turbulence se vérifie soit près de fond, ou à la surface : c'est le ressaut de transition (figure 2.2). Chaque pulsation produit une onde de période irrégulière, qui peut se propager sur plusieurs Kilomètres dans la nature, ce qui peut causer des dommages auberges.

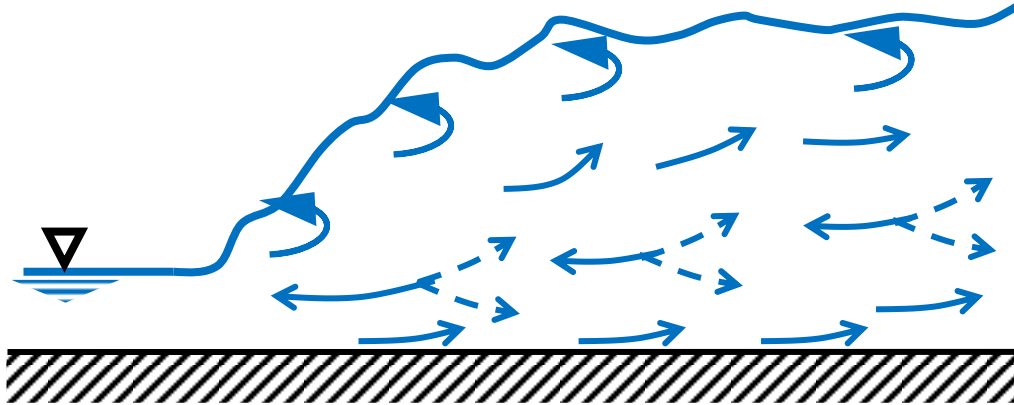


Figure 2.2, Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). "Ressaut de transition"

-Le ressaut stable: Pour des valeurs de $4.5 < F_1 < 9$, le ressaut est bien caractérisé et localisé. Ce type du ressaut est souvent adopté pour les bassins de dissipation d'énergie pour son bon rendement (45% et 70%) : c'est le ressaut stable (figure 2.3).

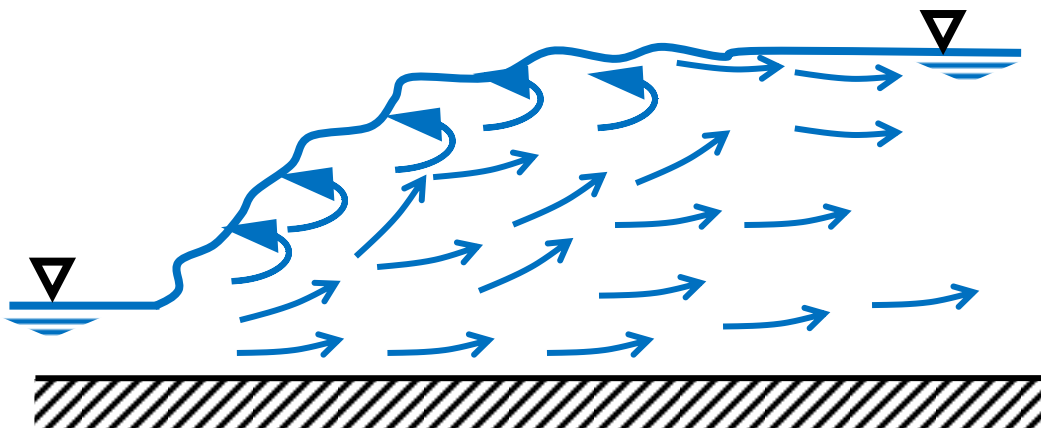


Figure 2.3, Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). "Ressaut stable"

-Le Ressaut clapoteux: Pour des valeurs de $F_1 > 9$, on constate des masses d'eau qui roulent par-dessous, au début du ressaut, et tombent sur le circuit rapide d'amont, d'une manière intermittente, provoquant des nouvelles ondulations en aval et la surface libre du ressaut est irrégulière : c'est le ressaut agité ou clapoteux (figure 2.4)

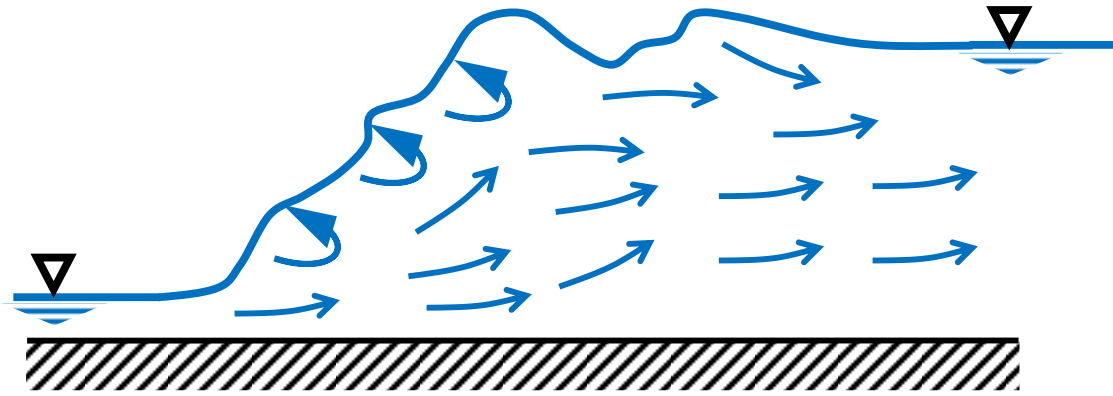


Figure 2.4, Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). "Ressaut agité"

II-2-1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Ce ressaut est un cas particulier de ressaut dans un canal trapézoïdal lorsque l'angle d'inclinaison du talus par rapport à l'horizontal est de 90° , ceci correspond donc à $m = \cotg 90^\circ = 0$, ou bien à $M = 0$,

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} \quad (2.1)$$

$$Y^* = h_2/h_1 = 0,5 \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (2.2)$$

La relation (2.2) est connue sous le nom d'équation de Bélanger permet d'évaluer le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 . Hager et Sinniger (1985) proposent une relation approchée applicable pour le nombre de Froude

$$Y^* = \frac{h_2^*}{h_1} = \sqrt{2}F_1 - 1/2 \quad (2.3)$$

II-2-2 Longueur du ressaut,

La première caractéristique du ressaut est la longueur L_j^* sur laquelle il s'étend, ceci n'a pas pu être quantifiée que par voie expérimentale et sa définition varie d'un auteur à un autre. En effet, on estime que la longueur L_j^* doit être mesurée toujours entre le pied du ressaut et la section aval de sorte que : 1. la surface libre est pratiquement horizontale. 2. la surface de turbulence du rouleau est faible. 3. les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes. 4. l'écoulement graduellement varié apparaît à l'extrémité aval du rouleau. Toutes ces définitions ont pour but d'indiquer la limite aval du ressaut au-delà de laquelle la protection ou le rendement du bassin d'amortissement n'est pas nécessaire. Les essais de Bradley et Peterka (1957) ont permis à Hager et al. (1990) de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur L_j^* du ressaut. Celle-ci, rapportée à la hauteur initiale h_1 du ressaut, peut s'écrire:

$$L_j^*/h_1 = 220 \cdot \text{Tgh} \left[(F_1 - 1)/22 \right] \quad (2.4)$$

D'après Hager et al. (1990), la variation de la longueur relative L_j^*/h_2^* en fonction du nombre de Froude F_1 indique que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à 6 pour la gamme pratique $4 < F_1 < 12$.

$$L_j^*/h_2^* = 6 \quad (2.5)$$

II-2-3 Longueur du rouleau,

La deuxième caractéristique du ressaut est la longueur L_r^* . En 1990 Hager et al (1990) définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisant ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé. La figure 1.2 montre ces deux type de ressaut et les longueurs L_r^* qui leur correspondent.

Le rouleau développé présente une surface relativement lisse et est caractérisée par une quasi-stabilité. Le jet entrant dans la section initiale du ressaut adhère sur une certaine distance au fond du canal puis diverge en s'orientant vers l'aval. Le rouleau non-développé se caractérise par une longueur plus courte que celle du rouleau développé et sa surface à l'aval se présente sous l'aspect de vagues. Au fond de la masse liquide en mouvement, on peut distinguer une zone de rouleau dite de séparation formant un tourbillon de fond. En raison de la présence de cette zone, le jet entrant dans la section initiale du ressaut est dévié vers la surface libre.

Les essais effectués par Hager et al. (1990) indique que, pour le cas du ressaut classique, le rapport $\lambda_r^* = L_r^* / h_1$ dépend du nombre de Froude F_1 et du rapport d'aspect $w = h_1/b$. Les auteurs proposent les relations suivantes:

$$\lambda_r^* = -12 + 160 \text{Tgh}(F_1/20) \quad \text{pour } w = h_1/b < 0,1 \quad (2.6)$$

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

« Tgh » désigne la tangente hyperbolique. Les auteurs notent que pour $F_1 < 8$ les deux relations précédentes peuvent être remplacées par une droite de pente 8 d'équation,

$$\lambda_r^* = L_r^* / h_1 = 8 \cdot (F_1 - 1,5) ; 2,5 < F_1 < 8$$

II-2-4 Rendement du ressaut,

Pour un canal rectangulaire le rendement est donné par la formule qui permet le calcul explicite,

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}}$$

Une relation expression approchée a été proposée par Hager et Sinniger (1986), applicable pour

$$F_1 > 2$$

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

L'expérience montre que le rendement η du ressaut classique est supérieur à 50% pour $F_1 \geq 5,1$ et que les rendements calculés en application de la relation approchée sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte, l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

II.3 Ressaut Hydraulique dans un Canal incliné à pente positive,

II.3.1 .Classification des ressauts inclinés,

D'après Rajaratnam (1966), les études de ce type de ressaut ont été déjà élaborées préalablement par Darcy et Bazin (1865), ainsi que par Riejel et Beebe (1917) qui sont toujours d'actualité. Selon Hager (1987), la première approche théorique a été effectuée par Ellms (1928, 1932). Safranez (1933) a repris les résultats de Ellms. La première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné a été celle de Bakhmeteff et Matzke (1938), qui ont évoqué dans leur étude, le profile de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. Kindsvater (1944) classifie les ressauts inclinés selon la position du pied du ressaut par rapport à l'extrémité aval de la pente (figure 2.5):

- Type A pour lequel le pied du ressaut coïncide a l'extrémité aval de la pente, Mahmood (1964) a montré que le ressaut de ce type et le ressaut classique sont quasi semblable. Cette constatation a été confirmée également par Bradley et Peterka,
- Type B pour lequel le pied du ressaut se trouve entre le type A et le type C, qui n'était pas le sujet que de peu des études, mais Hager (1988), Kawagoshi et Hager (1990) se sont également intéressés à ce type de ressaut,
- Type C pour lequel la fin du rouleau coïncide avec l'extrémité aval de la pente qui a été analysé expérimentalement par Kindsvater (1944), qui a proposé une approche pour le rapport des hauteurs conjuguées. D'autres chercheurs tels que Bradley et Peterka (1957), Ariemma (1958) et Van Besteen (1962) se sont également intéressés à ce type de ressaut,
- Type D pour lequel le rouleau se présente entièrement dans la portion inclinée qui a été étudié par Bunyan (1958), Smith (1959), Rajaratnam(1963), Wilogorski et Wilson

(1970), MuraHari (1973), Ohashi et al. (1973), Rajaratnam et Murahari (1974) et Mikhalev et Hoang (1976),

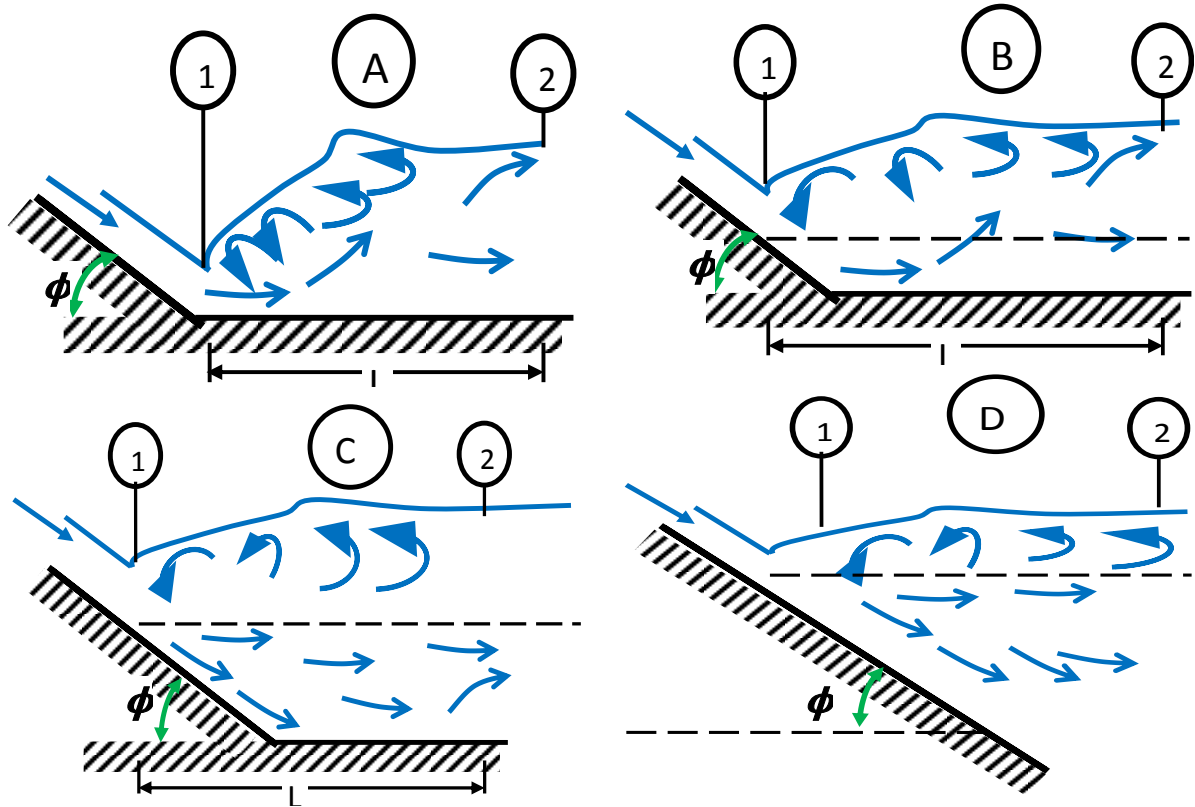


Figure 2.5, Classification des ressauts inclinés selon Kindsvater (1944).

La plupart des études faites pour le ressaut à pente positive s'orientaient vers le type 'C', pour lequel la fin du rouleau coïncide avec l'extrémité aval de la pente. Kindsvater (1944) a proposée pour le rapport des hauteurs conjuguées la formule suivante,

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} [1 + 8F_{1s}^2]^{1/2} - 1$$

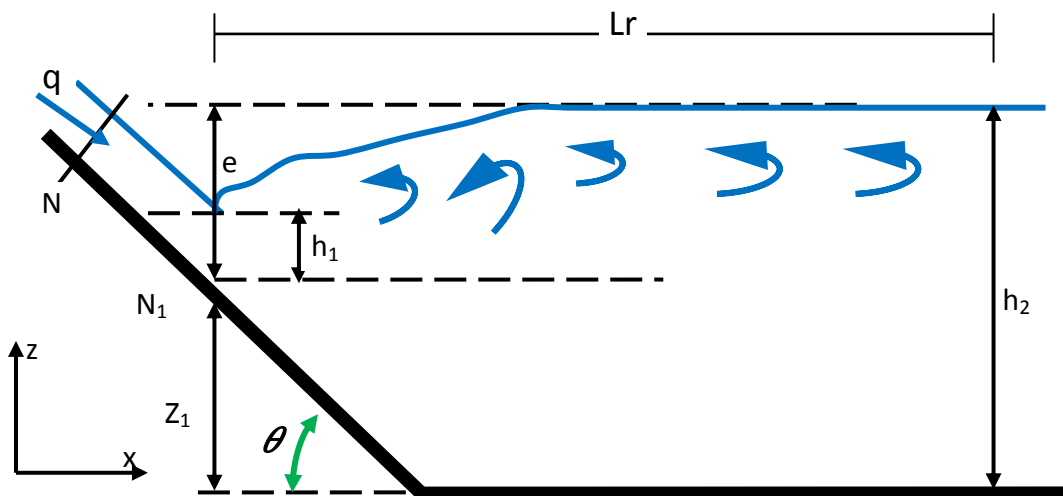


Figure 2.6, Notion du Ressaut Incliné

Avec la profondeur initiale,

$$h_1 = N_1 \cos \theta$$

N_1 est la longueur de la normale et θ l'angle d'inclinaison du canal (Figure 2.6)

Le Nombre de Froude modifié pour le canal inclinée, pour le canal horizontal ($\theta = 0$) F_{1s} tend vers F_1 .

$$F_1 = \frac{V_1}{(gN_1)^{1/2}}$$

$$F_{1s} = \frac{(\cos \theta)^{3/2}}{(1 - \cot \theta)^{1/2}} F_1$$

Une relation empirique a été obtenue par Rajaratnam (1966) en se basant sur les résultats expérimentaux de Bradley et Peterka (1957), et de Peterka (1958),

$$F_{1s} = \Gamma F_1$$

où $\log_{10} \Gamma = 0.027\theta^\circ$

La relation (1.11) peut être approximée alors comme suit,

$$Y = \sqrt{2 \cdot 10^{0.027\theta}} F_1 - \frac{1}{2}$$

Et bien sur la longueur de ressaut ne s'établit qu'expérimentalement par Bradley et Peterka (1957), la formule empirique est avec L_j^* étant la longueur du ressaut classique,

$$\frac{L_j}{L_j^*} = \text{Exp} \left(-\frac{4}{3} \theta \right)$$

Les deux équations précédentes sont appliquées pour la pente $\text{tg}(\theta) < 0,3$ ($\theta < 17^\circ$).

L'équation donnant le rapport des hauteurs conjuguées peut également être appliquée au ressaut type D ou h_2 représente la profondeur de l'écoulement à la fin du ressaut, mesurée verticalement du fond inclinée jusqu'à la surface libre. Les longueurs de rouleau du type C et type D sont quasi identiques. Rajaratnam et Muhrahari (1974), ont considéré la distribution des vitesses pour le cas du ressaut de type D pour ($\theta < 25^\circ$),

Les auteurs ont trouvé que la répartition des vitesses en amont du ressaut est comparable à celle du ressaut classique.

II.4 Ressaut Hydraulique dans un Canal incliné à pente Négative,

Stevens (1942) a analysé théoriquement le ressaut à pente négative en utilisant l'équation de quantité de mouvement. Okada et Aki (1955) ont effectué une étude expérimentale sur la stabilité du ressaut à pente négative pour des nombres de Froude $F_1 > 9$. Rajaratnam (1966, 1967) classifie le ressaut à pente négative comme un ressaut de type F, et conclue qu'il est impossible de garder le ressaut complètement dans la contre pente. Ohashi et al (1973) étudient le ressaut à pente négative et confirment l'instabilité lorsqu'il est entièrement dans la contre pente. Mc

Corcodal et Mohammed (1994) ont effectué une analyse assez explicite sur ce type de ressaut, qu'ils ont appelé configuration du ressaut limite où le ressaut est localisé complètement dans la partie en contre pente,

On peut classer ce type de ressaut en 04 quatre configurations principales,

- Ressaut limite (Type F) qui désigne le ressaut sans obstacle à l'aval,
- Ressaut types FI et FII relatifs au ressaut forcé par seuil,
- Ressaut type F-S désignant la configuration d'un jet à travers un seuil, dans ce cas l'écoulement torrentiel saute au-dessus du seuil sans formation de ressaut la seule étude connue pour ce type de ressaut hydraulique est celle de Mc Corcodal et Mohamed (1994), dans le but de déterminer les paramètres de définition du cas limite d'existence de ce type de ressaut, La figure suivante montre le schéma de définition du ressaut à pente négative dressée par les auteurs,

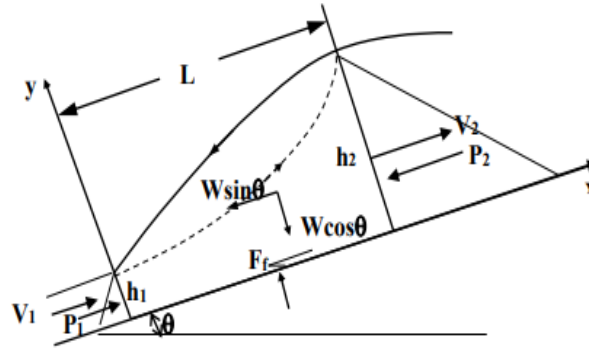


Figure 2.7, Schéma de définition et volume de contrôle pour ressaut à pente négative

L'application de l'équation de quantité de mouvement pour un ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à pente négative conduit à trouver l'expression suivantes donnant le rapport des hauteurs conjuguées,

En tenant compte les paramètres suivants, γ est le poids spécifique de l'eau, L_r la longueur du rouleau qui est prise dans ce cas comme longueur de ressaut, β est considéré comme égale à l'unité, ϕ_s étant le facteur de forme,

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8G_a^2} - 1)}{2}$$

Avec,

$$G_a^2 = \frac{\beta_1 F_1}{1 - \frac{\phi_s L_f \tan \theta}{h_2 - h_1} - \frac{2F_f}{\gamma(h_1^2 - h_2^2) \cos \theta}} \quad \text{et} \quad F_1 = \frac{V_1}{(gh_1 \cos \theta)^{1/2}}$$

Mc Corcodal a effectué une étude expérimentale dans un canal rectangulaire de 0,46m de largeur, 0,65m de profondeur et une contre pente de 1m de longueur. Trois pente négatives ont été testées $\tan \theta = (-0.1, -0.167, \text{ et } -0.20)$, traduit par des graphes montrant la variation du rapport des hauteurs conjuguées $\frac{h_2}{h_1}$ pour différentes valeurs du nombre de Froude F_1 et pour les trois pentes négatives, il a montré que l'augmentation de la pente négative engendre la diminution du rapport $\frac{h_2}{h_1}$ des hauteurs conjuguées, en outre, les mesures de h_1 , h_2 , L_r et le débit Q ont dans l'équation de G_a^2 permis aux auteurs d'estimer expérimentalement le facteur ϕ_s de forme $\phi_s = 1,08 \pm 0,3$ Ils trouvent une valeur constante pour les trois contre pentes étudiées,

par contre Okada et Aki (1959) qui a trouvé $\phi_s = 1,39 \pm 0,1$ cette différence est due selon Mc Corcodal et Mohamed (1994) à la définition de la longueur du ressaut et à la différence entre les conditions des deux études, car Okada et al (1959) ont expérimenté un autre type de ressaut en contre pente dit stabilisé, qui commence dans une pente positive et fini dans une pente négative, montrant que la position du ressaut est très sensible à la variation de la profondeur conjuguée aval h_2 et précisément pour les nombre de Froude $F_1 < 4$, et nécessite un ajustement continuel des conditions aux limites pour maintenir une position stable. Cependant, pour les nombres de Froude $F_1 < 9$, les auteurs confirment que le ressaut limite en pente négative (type D) est difficile à établir,

Okada et Aki (1959) ont dressé une formule empirique donnant la variation de la longueur relative L_r/h_1 avec la pente pour une valeur de Froude F_1 , l'expérience montre que pour une valeur donnée de F_1 , la longueur relative L_r/h_1 du rouleau diminue avec l'augmentation de la pente négative, montre aussi que le rapport L_r/h_1 de la pente négative, pour une valeur donnée de F_1 , est plus faible que son homologue d'un ressaut dans un canal horizontal,

La formule empirique est,

$$\frac{L_r}{h_1} = (C_0 + C_1 \sin \theta + C_2 \sin^2 \theta)[F_1 - 1] + D_1(1 + D_2 \sin^4 \theta)$$

D'où,

a. Ressaut limite selon Mc Corcodal et Mohamed ($F_1 < 9$)

$$C_0=7,27 ; C_1=20,8 ; C_2=5 ; D_1=5 ; D_2=50$$

b. Ressaut Stabilisé selon Okada et Aki (1959) $9 < F_1 < 13$:

$$C_0=7,2 ; C_1=21 ; C_2=19 ; D_1=7,7 ; D_2=175.$$

II.4 Conclusion,

Au sein de cette première partie d'étude bibliographique on a eu découvert le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire, ses formes classique, pente positive et négative, citant les auteurs et leurs études théoriques et expérimentales, exemple les travaux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique, ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré 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_1 à l'amont du ressaut,

Bakhmeteff et Matzké (1938) ont abordé les travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à pente positive en évoquant dans leur étude, le profil de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses, Kindsvater (1944) a classifié les ressauts dans un canal à pente positive en quatre principaux types, type A, type B, type C et type D selon la position du pied du ressaut par rapport à l'extrémité aval de la pente, en recommandant une relation explicite, liant le rapport des hauteurs conjuguées au nombre de Froude F_1 , par la suite une relation simple a été proposée par Rajaratnam (1966), la longueur du ressaut a été estimée expérimentalement par Bradley et Peterka (1957).

Mc Corcodale et Mohamed (1994) ont étudié le cas de ressaut en pente négative, il a été montré que ce type de ressaut est classé en quatre configurations principales : type F, type F_I , type F_{II} et type F_{-S} , en s'intéressant au cas limite d'existence¹ des ressauts en pente négative, une relation théorique a été proposée pour le type D, les auteurs confirment que ce type de ressaut est très sensible à la variation de la profondeur conjuguée pour les nombres de Froude $F_1 < 4$ et pour les nombres de Froude $F_1 > 9$ le ressaut limite en pente négative (type D) est difficile à établir.

***Chapitre III,
Ressaut hydraulique dans un Canal
rectangulaire de section Composée***

III.1. Introduction

L'étude des écoulements uniformes, ou plus encore les écoulements non uniformes en lit composé sont très compliqués à cause du transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al. 2005). Ces deux phénomènes, se manifestant de différentes façons, sont des sources de dissipation d'énergie 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 adimensionnels afin de leur donner un caractère de validité général.

III.2. Rapport des hauteurs conjuguées

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

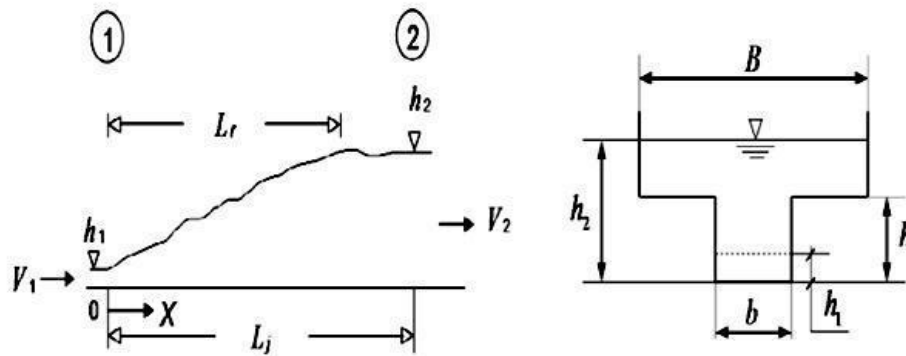


Figure 3.1, Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit

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 au 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:

$$f_x = -k\varpi(h_2 - h)^x h_1^y (B - b)^z \quad (3.2)$$

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

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

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 (3.3) s'écrit en définitive, après réarrangement, comme suit :

$$2Fr_1^2 \left(\frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} - \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (3.4)$$

$$\text{Où : } Fr_1 = \frac{Q}{\sqrt{b^2 h_1^3 g}} \quad (3.5)$$

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

$$2Fr_1^2 \left(\frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{2Y - 1/\tau}{\tau} - \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} \quad (3.6)$$

Les relations (3.3) et (3.4) sont des équations fonctionnelles de forme $\phi(Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$. Notons que les équations (3.4) et (3.6) 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 $Y^3 + pq + q = 0$ 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 (3.6), en fonction de Fr_1 . L'une des variables, β ou τ , est fixée, l'autre varie avec un pas de 0,2. Pour que le ressaut se produise effectivement dans le canal composé ($h_2 > h$), les valeurs de Fr_1 à considérer doivent être

strictement supérieures à la valeur minimale $Fr_{1min} = \left[\frac{1}{(2\sqrt{2})} \right] \sqrt{\left(\frac{2}{\tau} \right)^2} - 1$ correspondant à ($h_2 = h$).

On s'aperçoit de ces figures, que pour un τ donné, Y augmente continuellement avec l'accroissement de Fr_1 . L'augmentation du rapport Y en fonction de Fr_1 est plus rapide pour de grandes valeurs de β . Pour un Fr_1 fixé, Y croît avec l'accroissement de β et diminue avec l'augmentation de τ .

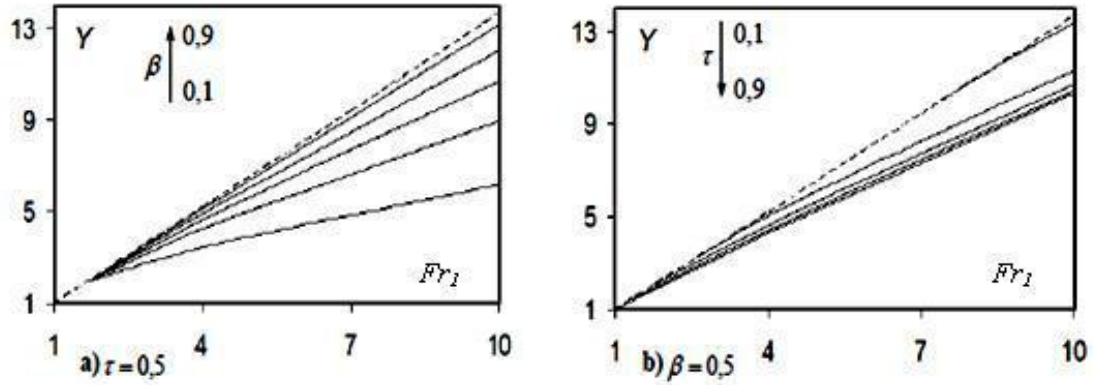


Figure 3.2, Variation de Y , calculé par (3.4), en fonction de Fr_1 . (- - -) : $\beta = 1$.

Sur la (figure 3.2) nous avons représenté la variation de Y en fonction de Fr_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. On voit clairement que les Y calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont inférieures à celles calculées en l'a négligeant. La différence est plus claire au fur et à mesure que le nombre de Froude Fr_1 augmente. La force f_x traduit les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

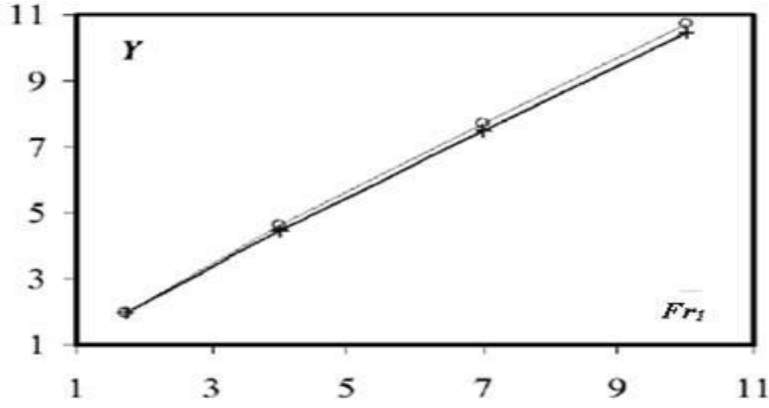


Figure 3.3, Variation de Y en fonction de Fr_1 . (o) : équation (3.6), (+) : équation (3.4).

III.3. 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 :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{Fr_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + Fr_1^2/2} \quad (3.7)$$

L'équation (3.7) permet le calcul, d'une manière explicite, le rendement du ressaut se produisant en lit composé droit, connaissant Fr_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 Fr_1 . Pour un τ et un β fixés, il est clairement illustrer sur la figure que le rendement η d'un ressaut hydraulique dans un lit composé, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de Fr_1 .

Pour un τ connu, en fixant Fr_1 , η diminue avec l'augmentation de β . Pour un β et un Fr_1 fixés, on peut aisément voir que le η augmente avec l'accroissement de τ .

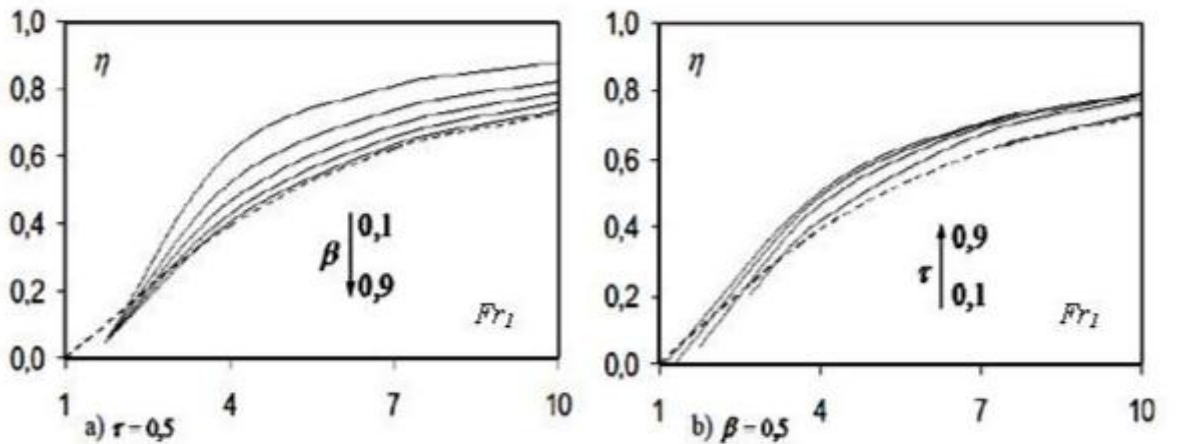


Figure 3.4, Variation de η en fonction de Fr_1 . (- - -) : $\beta = 1$. Y est calculé par l'équation (3.3).

Sur la figure (3.5) est représentée la variation de η en fonction de Fr_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. Il est bien illustré que les η calculés en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont supérieures à celles calculées en l'a négligeant.

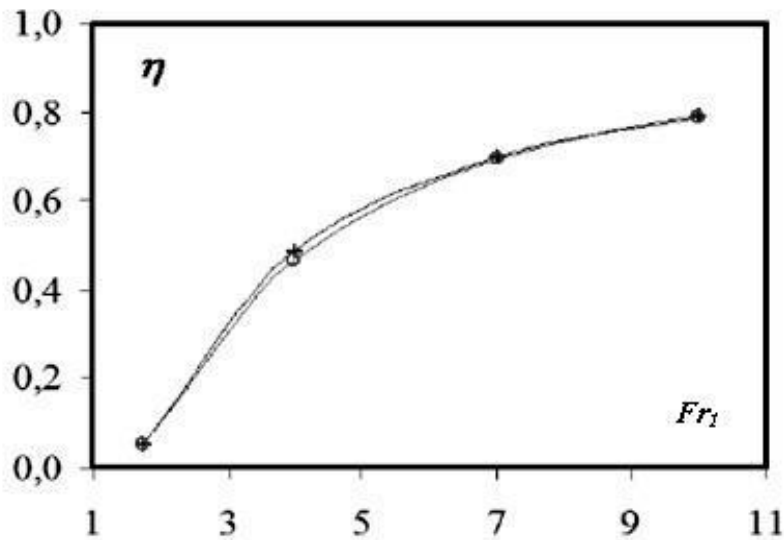


Figure 3.5, Variation de η en fonction de Fr_1 . (0) : équation (3.2), (+) : équation (3.1)

III.4. Conclusion

L'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal composé droit a aboutit à une équation fonctionnelle de forme $\Phi(Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$. 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 , en augmentant, se sont certainement rapprochées de la réalité.

Afin de trouver l'expression définitive de cette force de résistance, étroitement liée au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures, sur modèle réduit au laboratoire, sont indispensables.

Chapitre IV,

Ressaut

Hydraulique en

Canal Triangulaire

IV-1 Introduction,

Dans ce volet on va aborder le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire de pente géométrique horizontale à angle d'ouverture 90° et à parois rugueuses, ce type de ressaut n'a connu que très peu d'études. Les travaux les plus intéressants dans ce domaine sont ceux de Hager et Wanoschek (1987) concernant le ressaut hydraulique classique du type A, évoluant dans un canal de pente géométrique horizontale et à angle d'ouverture de 90° , ainsi que ceux, plus récents, de Achour et Debabèche (2003) qui ont effectué une étude expérimentale sur le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil dénuyé à paroi mince et épaisse. Par ailleurs, à ce jour, il y a très peu de documentation traitant de l'effet de la rugosité des parois du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique. On peut citer les travaux de Rajaratnam (1968; 2002) relatifs au ressaut hydraulique en canal rectangulaire à fond rugueux et ondulé, ainsi que ceux de Ghomri (2005) relatifs au ressaut hydraulique en canal profilé en U à fond rugueux.

IV-2 Déroulement des Essais,

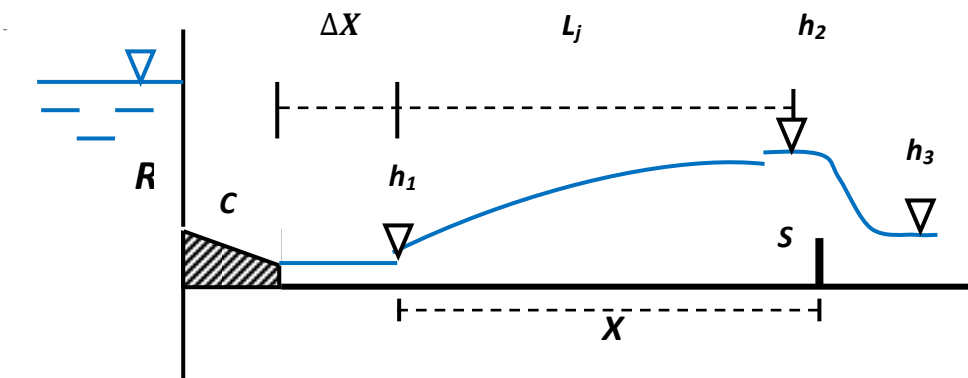


Figure 4.1, Ressaut contrôlé par Seuil à paroi

L'étude expérimentale de dit ressaut a été effectuée en testant quatre valeurs de la rugosité absolue ε (mm) = 4.53, 6.04, 7.11 et 8.73, les sept hauteurs initiales de l'écoulement : h_1 (mm) = 18; 25; 30; 34; 40; 44; 51. Une large gamme du nombre de Froude incident a été ainsi obtenue, correspondant à $4 < F_1 < 24$, la formation du ressaut contrôlé est conditionnée par la mise en place d'un seuil à l'aval de l'écoulement, pour cela des seuils des différentes hauteurs ont été utilisés, l'apparition du ressaut a été provoquée en plaçant un seuil d'hauteur S à l'extrémité aval du canal et pour une hauteur h_1 de l'écoulement incident, et une augmentation du débit volume Q , le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident peut se calculer par le couple (h_1, Q) pour la valeur donnée de l'angle de l'ouverture du canal, l'accroissement du F_1 conduit à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation de sa longueur L_j ,

Ainsi, à chaque valeur du nombre de Froude F_1 correspond une valeur de la longueur L_j de ressaut ainsi qu'une valeur de la hauteur s du seuil. Un échantillon constitué d'une soixantaine de points de mesures expérimentales, pour chacune des valeurs de la rugosité absolue testées, a permis ainsi d'aboutir à des résultats significatifs.

Notant que les caractéristiques hydrauliques et géométriques qui entrent en jeu au sein de cette étude expérimentale sont, le débit volume Q , la hauteur h_1 de l'écoulement incident, la hauteur finale h_2 du ressaut, la longueur L_j de celui-ci et la rugosité absolue des parois du canal, l'étude s'intéresse sur l'évolution des paramètres adimensionnels suivants,

- 1- Le nombre de Froude F_1 tel que,

$$F_1^2 = 2Q^2 / (gm^2 h_1^5)$$

Où m désigne la cotangente de l'angle de l'ouverture (d'inclinaison) par rapport à l'horizontale des parois du canal triangulaire testé, soit $m = \cot 45^\circ = 1$

- 2- La longueur relative L_j / h_1 du ressaut,

- 3- Le rapport $Y = h_2 / h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut,

IV-3 Préparation de la rugosité des parois,

Afin d'obtenir des parois rugueuses caractérisées par une répartition quasi-uniforme de la rugosité, nous avons procédé selon les étapes suivantes :

- i. Le tamisage du gravier de granulométrie variée est effectué au moyen d'un appareil électrique de tamisage "la tamiseuse", composé de plusieurs tamis de différents diamètres normalisés. Le temps de tamisage est choisi selon la gamme de gravier à tamiser, mais ne dépassant pas cinq minutes.
- ii. Après l'obtention de la gamme voulue de gravier, ce dernier est lavé puis séché.
- iii. La gamme choisie varie entre 4 et 12,50 mm, selon le refus du tamis normalisé. Les particules obtenues sont ensuite uniformément réparties sur une toile en plastique (Photographie 1), puis collées au moyen d'une colle forte "BECTA 10000".
- iv. A la fin de la préparation de la toile rugueuse, la valeur de la rugosité équivalente est estimée par un appareil numérique de mesure dit "Palmer", de précision 0,001mm.
- v. La toile rugueuse obtenue est ensuite soigneusement collée sur les deux parois du canal triangulaire (Photographie 2).



Photographie 4.1, Echantillon de Toile Rugueuse de Rugosité absolue $\varepsilon = 8,73$ mm



Photographie 4.2, Toile Rugueuse Soigneusement Collée sur les deux parois du Canal Triangulaire

IV-4 Résultats Expérimentaux

IV-4-1 Longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

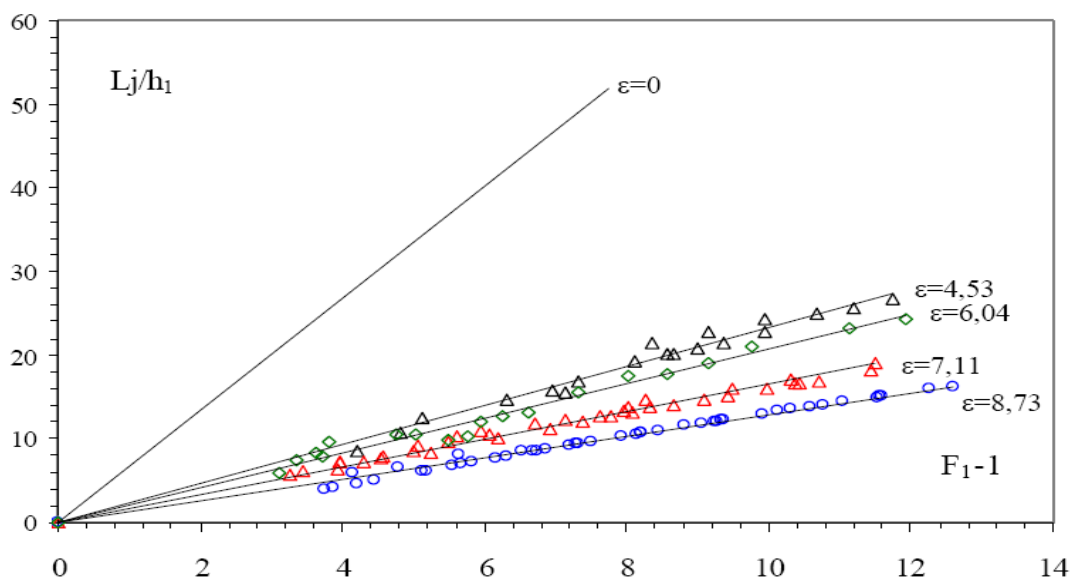


Figure 4.2, Variation de la Longueur Relative L_j/h_1 en fonction du Nombre de Froude F_1

La variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident pour les quatre rugosités absolues testées est représentée sur la figure 4.1 précédente,

Les quatre nuages des points distincts sont alors visibles, correspond chacun à une rugosité absolue ε , on peut facilement constater que pour une rugosité absolue donnée, l'augmentation du nombre de Froude F_1 engendre une augmentation de la longueur relative du ressaut, en revanche pour une valeur donnée de nombre de Froude F_1 , l'augmentation de la rugosité absolue provoque la diminution de la longueur relative du ressaut L_j ,

Utilisant l'analyse statistique des points de mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés non linéaire, on aboutit que pour chacune des rugosités absolues testées, la longueur relative L_j/h_1 est linéairement dépendante de F_1 selon la relation,

$$L_j/h_1 = a(F_1 - 1) \quad 4.1$$

L'étude a montré ainsi que le coefficient a a diminué avec l'augmentation de la rugosité absolue ε et la variation de $a(\varepsilon)$, voir Tableau 4.1,. La dite variation est représentée graphiquement sur la figure 4.1,

Tableau4.1 : Valeurs du Coefficient a de la relation 4.1

ε (mm)	a	R^2
4.53	2.34	0.96
6.04	2.06	0.98
7.11	1.61	0.99
8.73	1.30	0.99

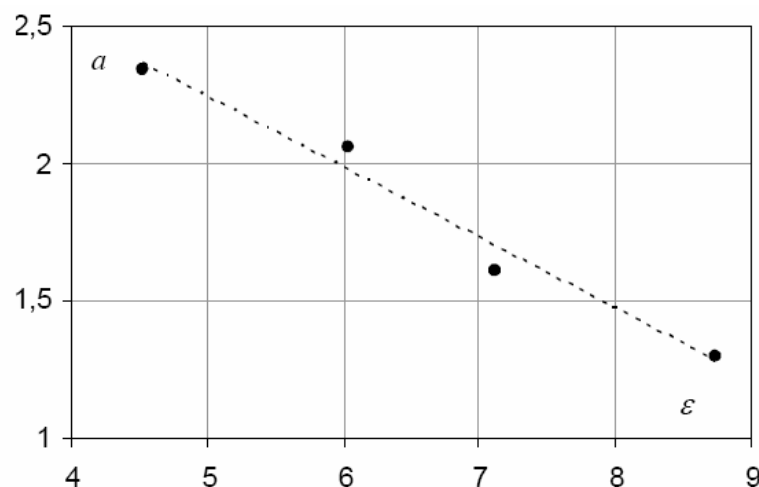


Figure 4.3, Variation du Coefficient a de la relation (1) en fonction de la rugosité absolue ε

L'ajustement statistique des couples de valeurs (ϵ, a) par la méthode des moindres carrés donne,

$$a = 3,53 - 0,26 \epsilon \quad (4.2)$$

En substituant le coefficient a de l'équation (4.2) par sa valeur dans l'équation (4.1) on obtient,

$$L_j/h_1 = (3,53 - 0,26 \epsilon)(F_1 - 1) \quad (4.3)$$

Selon l'auteur l'équation (4.3) est applicable dans la gamme $4,53\text{mm} \leq \epsilon \leq 8,73\text{ mm}$, et qui a montré avec le traçage du graphe de la relation $L_j/h_1 = \zeta(\epsilon, F_1)$ en fonction des valeurs expérimentales de la longueur relative du ressaut que les points résultant se répartissent autour de la première bissectrice, confirmant alors que $(L_j/h_1)_{\text{Exp}}$ est raisonnablement définie par la relation (4.3),

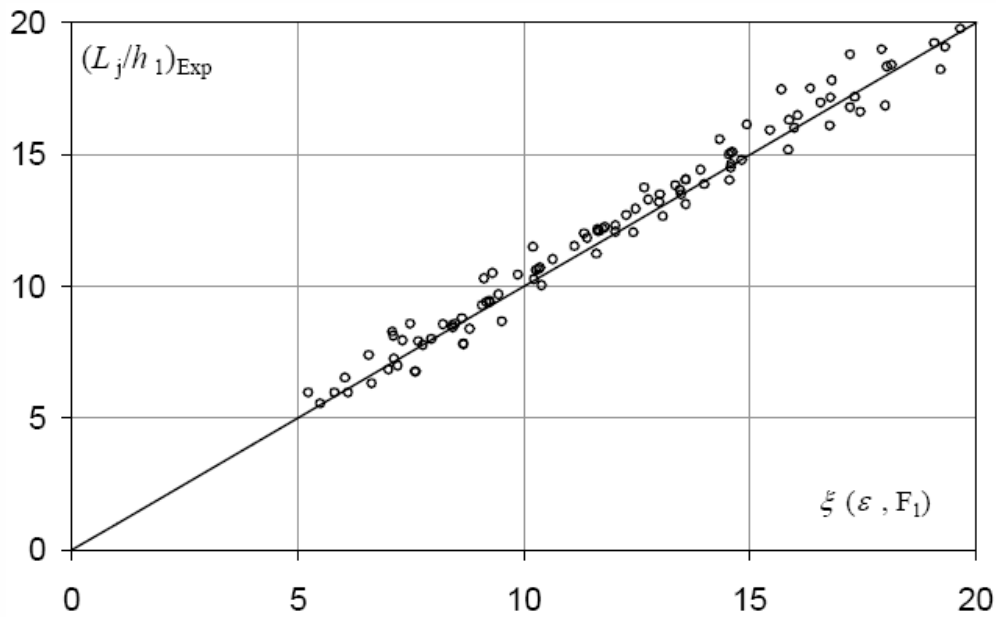


Figure 4.4, Variation de la longueur relative expérimentale $(L_j/h_1)_{\text{Exp}}$ en fonction de (ϵ, F_1)
(-- Première Bissectrice)

IV-4-2 Rapport Y des Hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1

Les essais expérimentaux montrent que pour toutes les rugosités absolues testées l'augmentation du nombre de Froude F_1 entraîne l'augmentation du Rapport Y des hauteurs conjuguées,

Et que pour la même valeur du nombre de Froude F_1 l'augmentation de la rugosité absolue ϵ engendre la diminution du rapport Y des hauteurs conjuguées,

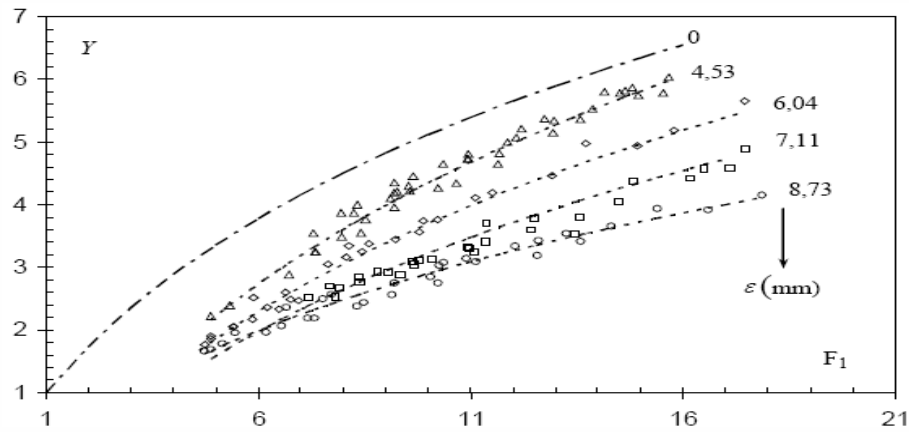


Figure 4.5, Variation du Rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de F_1 pour les 04 valeurs testées de rugosité absolue ε (---) courbe d'ajustement

Sur la figure 4 se montrent quatre nuages de points, correspondant chacun à une valeur donnée de la rugosité absolue ε , les traits discontinus représentent l'ajustement des points de mesures par

la méthode des moindres carrés non linéaire, dans le même graphique une variation $Y(F_1)$ correspond à la rugosité absolue $\varepsilon = 0$ a été également représentée qui peut être traduite par la nature pratiquement lisse des parois du canal triangulaire, la courbe a été tracée selon la relation de Hager et Wanoschek (1987) issue de l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre les section initiale et finale du ressaut hydraulique,

$$Y = \frac{2Y^2(Y^2 + Y + 1)}{3(Y + 1)} \quad (4.4)$$

L'application de la méthode de l'analyse statistique de moindres carrés non linéaires sur les mesures expérimentales, il a été remarqué que pour chacune de rugosité absolue testées, le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut est lié au nombre de Froude F_1 par une loi de type logarithmique d'équation,

$$Y = b \ln\left(\frac{F_1 + 4}{5}\right) + c \quad (4.5)$$

Le tableau 4.2 dessous illustre la variation des coefficients (b, c) en fonction des valeurs des rugosités absolues ε ,

ε (mm)	b	C	R^2
4,53	4,82	-0,60	0,98
6,04	4,22	-0.60	0,98
7,11	3,70	-0.60	0,95
8,73	2,74	-	0,97

Avec simple aperçu ,il est claire que le coefficient b diminue avec l'augmentation de la rugosité absolue ϵ , l'ajustement des couples des valeurs (ϵ, b) par la méthode des moindre carrés (Figure 5.5) a conduit d'écrire une relation de type linéaire d'équation,

$$b = 7,14 - \frac{1}{2}\epsilon \quad (4.6)$$

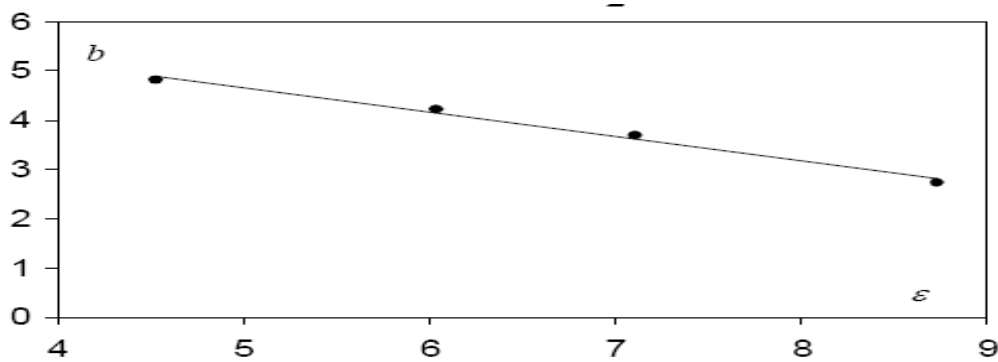


Figure 4.6, Variation du Coefficient b de la relation (4.6) en fonction de la rugosité absolue ϵ
(---) courbe d'ajustement selon (4.6)

Le tableau 2 montre que le coefficient c ne dépend pas de la rugosité absolue ϵ et qu'il prend une valeur constante telle que,

$$c = -\frac{3}{5} \quad (4.7)$$

Remplaçant les valeurs obtenues de b et c par les équations (4.6) et (4.7) dans l'équation (4.5) on obtient,

$$Y = \left(7,14 - \frac{1}{2}\epsilon\right) \text{Ln} \left(\frac{F_1+4}{5}\right) - \frac{3}{5} \quad (4.8)$$

Selon l'auteur l'équation (4.8) est applicable dans la gamme $4,53 \text{ mm} \leq \epsilon \leq 8,73 \text{ mm}$,

La relation $Y = \Phi(F_1, \epsilon)$ exprimée par l'équation (4.8) est représentée graphiquement sur la figure 4.7 en fonction des valeurs expérimentales Y_{Exp} , que la fiabilité et la validité de l'équation (4.8) sont confirmées,

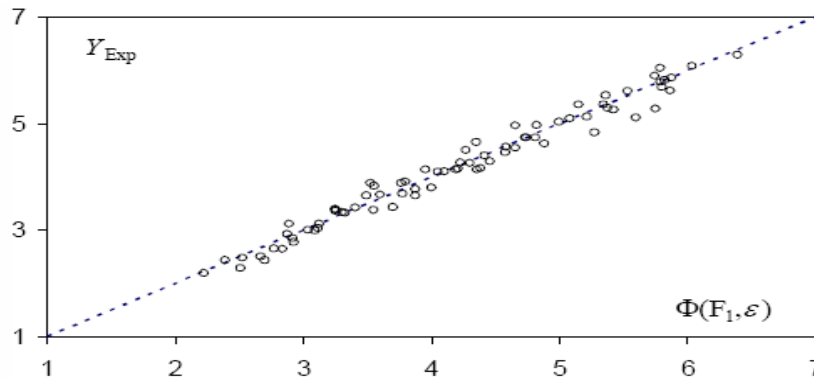


Figure 4.7, Variation Y_{Exp} en fonction de (F_1, ϵ)
(---) Première Bissectrice

Les points obtenus se répartissent autour de la première bissectrice, ce qu'on permet de dire

III-4-3- Rendement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses

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,

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

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

H_1 et H_2 désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut, donnés par les deux relations suivantes,

$$H_1 = h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \text{ et } H_2 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

En tenant compte l'équation de continuité $Q = V/A$ et le nombre de Froude de l'écoulement incident dans un canal de section droite, $F_1^2 = \frac{2Q^2}{gm^2h_1^5}$, la relation finale donnant le rendement est,

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}}$$

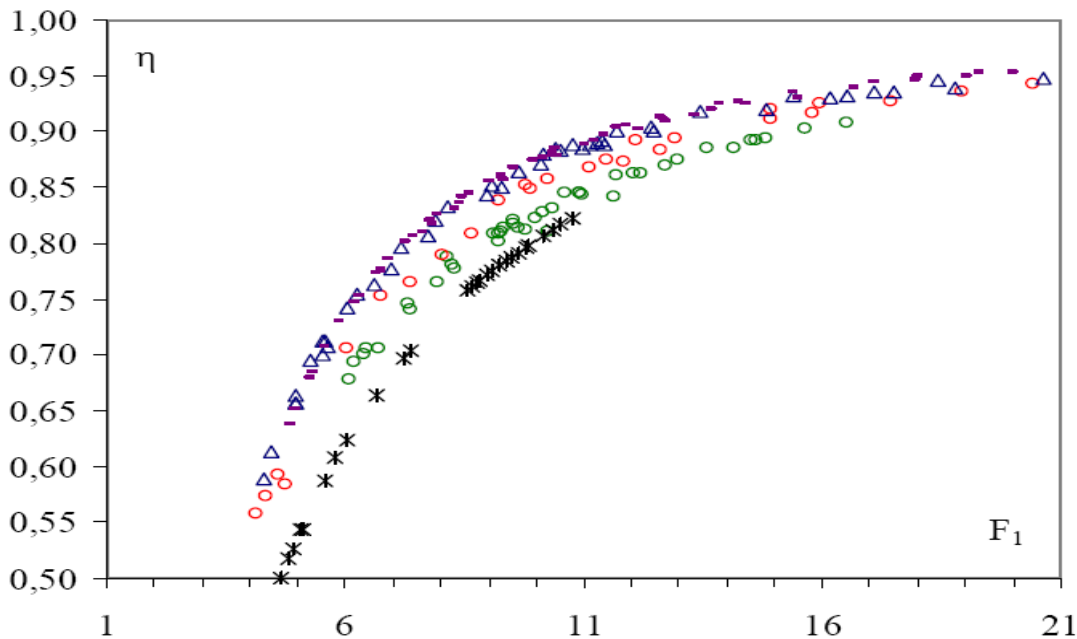


Figure 4.8, Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour cinq Valeurs différentes de la rugosité testée ϵ

La Figure 4.8 montre que pour une gamme pratique de Froude incident les points de mesure du ressaut à parois rugueuses sont au-dessus de ceux à parois lisses (l'allure en étoile est pour la rugosité absolue $\varepsilon=0$). En outre, le ressaut hydraulique dans le canal à parois rugueuses dissipe mieux l'énergie que son homologue à parois lisse. Donc, la figure ci-dessus montre que la dissipation de la charge hydraulique croît avec l'augmentation de la rugosité. Cependant, pour des nombres de Froude élevés, les points de mesures se rejoignent et l'effet de la rugosité s'atténue. Ceci peut être expliqué par le fait qu'au-delà d'un certain nombre de Froude pratique, le ressaut devient clapoteux et ne peut adhérer constamment au fond du canal (selon la classification de Bradley et Peterka, 1957).

IV-4-4 Profil de surface généralisé du ressaut

Pour déterminer le profil de surface généralisé du ressaut il est nécessaire d'utiliser les grandeurs sans dimensions suivantes,

$$y = (h(x) - h_1) / (h_2 - h_1) \text{ et } X = x/L_j$$

les essais au laboratoire pour trois valeurs de la rugosité absolue conduisent à tracer les graphes suivants,

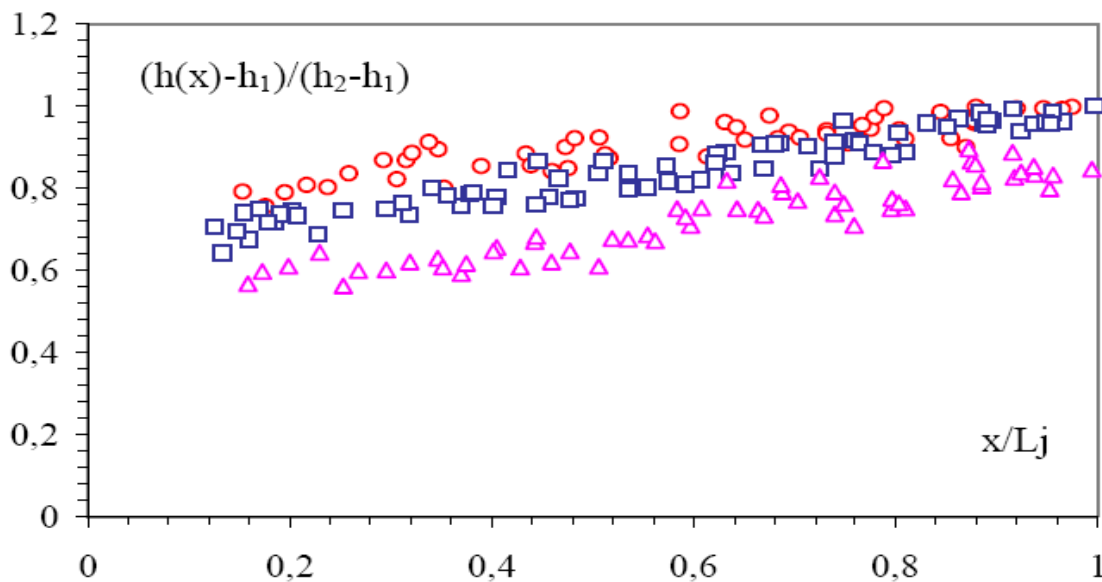


Figure 4.9, Profil de surface généralisé du ressaut hydraulique dans un canal Triangulaire à parois rugueuses pour trois rugosités distinctes
(○) 6,04mm (□) 7,11mm et (△) 8,73mm.

L'auteur a constaté que les trois nuages des points de mesures sont distincts ce qui prouve que la rugosité absolue a une influence sur le profil de surface du ressaut en diminuant la hauteur conjuguée h_2 ,

IV-5 Conclusion,

Au sein de cette étude l'auteur a montré l'effet de la rugosité absolue des parois d'un canal triangulaire à angle d'ouverture 90° et à pente horizontale, sur les caractéristiques hydrauliques et géométriques du ressaut, en testant quatre valeurs de rugosité absolue,

Comme une première étape il a effectué une étude sur la variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, il a remarqué que pour une valeur donnée de nombre de Froude, l'augmentation de la rugosité absolue provoque la diminution de la longueur relative du ressaut, et que pour chacune de rugosité absolue, la longueur relative est liée au nombre de Froude par une loi linéaire,

Une deuxième étape traite la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de nombre de Froude incident qui a été examinée sous l'effet de chacune des rugosités absolues testées, il a observé que pour une même valeur de nombre de Froude l'augmentation de la rugosité absolue conduit à la diminution du rapport Y , la relation $Y(F1, \varepsilon)$ a été modélisée par une loi logarithmique issue de l'analyse statistique des points de mesures expérimentales,

L'étape troisième s'est intéressée, ensuite, à la dissipation d'énergie cinétique. De ce fait, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que le ressaut dans un canal triangulaire à parois rugueuses dissipe mieux l'énergie que son homologue à fond lisse,

La dernière étape étudie la variation du rapport adimensionnel vertical Y en fonction du rapport adimensionnel horizontal X montre que, pour le même X , la valeur de Y augmente avec la réduction de la rugosité, par conséquent la profondeur du ressaut diminue avec l'augmentation de la rugosité.

Nous avons choisi cette étude du ressaut en canal triangulaire à paroi rugueuse et à pente horizontale en raison qu'elle a pris en compte l'influence de la rugosité des parois du canal sur les caractéristique hydrauliques et géométrique du ressaut qui semble comme un point de repère pour notre étude à propos d'un canal rectangulaire de section composée à fond rugueux,

Chapitre V,

***Ressaut Hydraulique
en Canal Circulaire
avec Banquette***

V-1 Introduction,

On s'est intéressé par les travaux de thèse Magister de S. ZIANI, qui ont été basés sur l'étude d'un ressaut évoluant dans une conduite circulaire avec une banquette dont le ressaut objet est caractérisé par un pied entièrement dans le lit mineur, tandis que sa fin est une section composée, entre autre les centres de gravité de la section amont et aval du ressaut ont été déterminés en appliquant les moments statiques en connaissant l'angle d'ouverture de la surface libre et le diamètre,

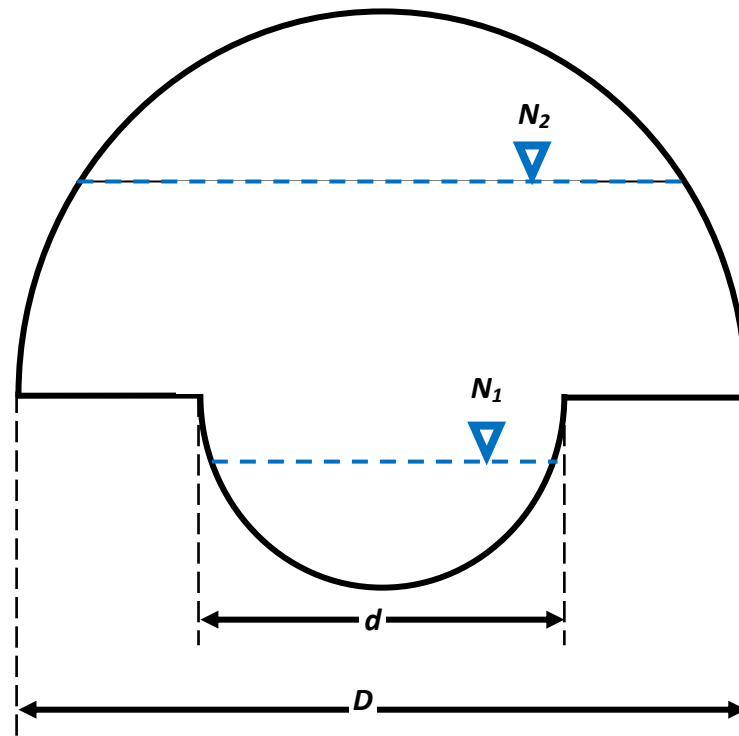


Figure 5. 1, Canal circulaire avec banquette

Ce canal est caractérisé par un lit mineur de diamètre d et un lit majeur de diamètre D , la première hauteur conjuguée h_1 du ressaut est inférieure ou égale à $r = \frac{d}{2}$, et la deuxième hauteur conjuguée du ressaut est strictement supérieure à $r = \frac{d}{2}$ et évidemment inférieure à $r + R = \frac{d+D}{2}$,

N_1 et N_2 représentent respectivement le niveau amont (le pied du ressaut), et le niveau aval (la fin du ressaut),

L'application du théorème d'Euler (équation de quantité de mouvement) nécessite la détermination des profondeurs relatives des centres de gravité et les section relatives pour chaque section (amont et aval), pour la section de pied de ressaut l'application des relations approchées de type puissance qui ont été proposées par l'étude, et pour la section composée à la fin du ressaut l'utilisation des moments statiques et bien sur les relations approchées proposées de type puissance avec un excellent coefficient de corrélation, une hypothèse simplificatrice est considérée importante pour l'application de l'équation de la quantité de mouvement s'agit de la négligence de l'interaction entre le lit mineur et le lit majeur, cette interaction est due au transfert de masse et de la quantité de mouvement au niveau de l'interface entre ces deux lits créant ainsi une turbulence, source de dissipation supplémentaire d'énergie, la formule résultante va montrer l'influence de chaque variable sur l'autre en connaissant les valeurs limites du débit relatif ainsi que du rapport d'expansion en fonction des valeurs pratiques du nombre de Froude de l'écoulement incident,

L'équation en question est,

$$\rho Q(\beta_2 \vec{U}_2 - \beta_1 \vec{U}_1) = \vec{F}_v + \vec{F}_s$$

Ou $\vec{F}_v$ qui est nulle car le canal est horizontal pente nulle alors pas de force de volume,

et $\vec{F}_s$ sont les forces de surface traduits par les forces de pressions en amont et aval F_1 et F_2 ,

On est obligé de prendre comme hypothèse simplificatrice que $\beta_2 = \beta_1 = 1$ le coefficient de Boussinesq (distribution uniforme des vitesses), la formule précédente devient,

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = F_1 - F_2$$

Sachant que $F_1 = P_1 A_1 = \bar{\omega} h_1 A_1$, $F_2 = P_2 A_2 = \bar{\omega} h_2 A_2 = \bar{\omega} (\bar{h}_m A_m + \bar{h}_{M1} A_{M1})$ et que

$A_2 = D^2 A_2^*$, $A_1 = d^2 A_1^*$ et $\beta = \frac{D}{d}$ est le rapport d'expansion, Le remplacement dans la formule de base et en tenant compte que le débit relatif égale à,

$$Q_d^* = \left(\frac{Q^2}{gd^5} \right)^{1/2} \text{ et que } F_1 = \left(\frac{Q^2}{gd^5} \right)^{1/2} \left(\frac{64 \sin \alpha_1}{(\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1)^3} \right)^{1/2}$$

L'équation de quantité de mouvement se reformule comme suit,

$$Q_d^{*2} = \frac{0.77161 (h_1^*)^{2.4727} - \left(\left[\frac{2}{3\pi} + \beta h_{M1}^* \right] \left(\frac{\pi}{8} \right) + 0.465497 \beta^3 (h_{M1}^*)^{1.9813} \right)}{\left[\frac{\pi}{8} + \beta^2 (0.851 (h_{M1}^*)^{0.9572}) \right]^{-1} - [1, 1334 (h_1^*)^{1.46}]^{-1}}$$

à une relation fonctionnelle de forme : $\varphi(Q_d^*, h_1^*, h_{M1}^*, \beta)$ qui peut être réécrite également sous forme de $\psi(Q_d^*, h_1^*, h_2^*, \beta)$ ou bien enfin sous forme de $\Gamma(F_1, h_1^*, h_2^*, \beta)$,

La représentation graphique de ces relations fonctionnelles l'effet de chaque variable adimensionnelle sur les autres, elle a permis surtout d'illustrer que la valeur maximale du débit relatif rapporté au diamètre du lit mineur est de deux-et-demi, tandis que le taux

d'élargissement ne doit pas dépasser une valeur maximale de cinq, notons que le nombre de Froude de l'écoulement incident compris entre quatre et dix, permettant d'avoir un ressaut stable dans un canal rectangulaire prismatique,

V-2 Le Rendement,

Equation adimensionnelle du rendement est donnée par, $\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1}$

Toujours on considère que la distribution des vitesses est uniforme à l'aval et amont alors,

$$H_1 = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \text{ et } H_2 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \text{ et } H_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad \text{d'où,} \quad \eta = 1 - \frac{h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}}{h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2}}$$

En utilisant les formules donnant $(h_2, Q_d^*, A_1, A_2, \beta)$ l'équation finale de rendement est,

$$\eta = 1 - \frac{\frac{1}{2} + \beta h_{M1}^* + \frac{Q_d^{*2}}{2\left(\frac{\pi}{8} + \beta^2 A_{M1}^*\right)^2}}{h_1^* + \frac{Q_d^{*2}}{2A_1^{*2}}}$$

Il est montré que la relation fonctionnelle obtenue est de la forme $(\eta, Q_d^*, h_1^*, h_{M1}^*, \beta) = 0$,

Pour tracer les graphiques donnant la variation du rendement, on fixe à chaque fois deux variables et en fait varier la troisième, pour ce qui est de la quatrième variable (β) celle-ci prise variant aléatoirement dans sa gamme pratique, pour une valeur de (β) donnée le rendement augmente avec l'accroissement de (Q_d^*) et la diminution de (h_1^*), la limite supérieure du débit relatif pratique augmente avec l'augmentation du rapport d'élargissement (β),

Pour une valeur de (h_{M1}^*) donnée le rendement croit avec l'accroissement de β et la diminution du débit relatif,

V-3 Les Essais au laboratoire, Ont pour objet de mesurer les longueurs caractéristiques (la longueur du ressaut L_j et la longueur du rouleau L_r), pour ceci un dispositif expérimental a été proposé qui permet en fixant la hauteur conjuguée amont (h_1) de déterminer les valeurs de La deuxième hauteur conjuguée (h_2) du ressaut.

Les différentes profondeurs d'eau suivant l'axe longitudinal du canal dans des sections distantes successivement de 20 cm l'une par rapport à l'autre, et ce jusqu'à la fin du ressaut,

La longueur, (L_j) du ressaut,

La longueur, (L_r) du rouleau,

La différence de lecture entre les deux tubes du manomètre différentiel,

V-4 Conclusion,

L'étude du canal circulaire avec banquette nécessite la détermination des relations donnant les positions des centres de gravité et l'aires des sections transversales pour pouvoir appliquer l'équation de quantité de mouvement, cette application a abouti à une relation liant différentes variables géométriques du canal et hydrauliques du ressaut, qui a été présentée en terme adimensionnel afin d'avoir un caractère de validité général, puis la représentation graphique de dite équation a expliqué les relations existantes entre les différentes variables adimensionnelles, elle a permis surtout de montrer que la valeur maximale du débit relatif rapporté au diamètre du lit mineur est de deux-et-demi, tandis que le taux d'élargissement ne doit pas dépasser une valeur maximale de cinq,

Le rendement est donné sous forme d'une relation fonctionnelle sa représentation graphique a montré que pour une valeur de donnée (β), le rendement augmente avec l'accroissement de (Q_d^*) et la diminution de (h_1^*),

Il est noté que l'interface entre le lit mineur et majeur nécessite un travail délicat et long de mesure de vitesses pour pouvoir comprendre le comportement exact de l'écoulement dans le corps du ressaut,

Conclusion de la Partie bibliographique,

Cette première partie de notre étude a eu pour objectif de présenter à travers quatre chapitres les travaux les plus importants dans le domaine du ressaut hydraulique qui ont été choisis en tenant compte la relation existante entre ces études et notre projet de fin d'étude concernant la contribution à l'étude de l'approche semi théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée à fond rugueux,

Le premier chapitre a eu pour but d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Trois types de ressaut ont été étudiés :

- Le ressaut hydraulique classique, où nous avons mis l'accent sur les travaux de Hager (1990), relatif aux caractéristiques du ressaut classique. L'auteur a montré que l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre ses sections initiale et finale, en négligeant les pertes de charge autres que celles dues au ressaut, mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement.
- Le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente positive, où il a été montré que la première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné est celle de Bakhmeteff et Matzke (1938), qui ont évoqué dans leurs études, le profil de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. En outre Kindsvater (1944), a classifié les ressauts inclinés à pente positive en quatre principaux types; type A, type B, type C et type D. En outre il a proposé une approche pour le rapport des hauteurs conjuguées pour le ressaut de type C.
- Le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente négative, où les travaux de Mc Corcodal et Mohamed (1994) ont été présentés, où ils ont étudié le cas limite d'existence du ressaut en pente négative, une relation théorique a été proposée pour le type D. Les auteurs confirment que ce type de ressaut est très sensible à la variation des profondeurs conjuguées pour des nombres de Froude $F_1 < 4$. Cependant, pour les nombre de Froude $F_1 < 9$, selon les hauteurs, le ressaut limite en pente négative (type D) est difficile à établir.

Le second chapitre de notre étude bibliographique, a permis de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire composé où on a exposé l'approche de Khattaoui et Achour 2012, qui ont donné une analyse théorique basant sur l'équation de la quantité de mouvement, en faisant la variation de rapport Y des hauteurs conjuguées et celle du rendement en fonction de nombre de Froude F_1 , qui ont

aboutie à l'issu de leur étude que le ressaut hydraulique ne se produise dans un canal rectangulaire composé que pour le nombre de Froude soit supérieur à la valeur minimale correspond à l'égalité entre h_2 et h , ils ont aussi trouvé que Y augmente continuellement avec l'accroissement de F_1 avec une valeur fixe de τ , et à propos du rendement ils ont constaté qu'il est clairement illustré que le rendement η d'un ressaut hydraulique dans un lit composé, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de Fr_1 et ce pour un τ et un β fixés,

Un troisième chapitre concerne le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses, où on avait intérêt de voir l'étude faite par Achour et Debabèche (2003), ils ont appliqué les essais au laboratoire pour quatre valeurs de la rugosité absolue ε , cette rugosité des parois a été préparée soigneusement en suivant des étapes bien définies (choix graviers, tamisage, collage ...), l'objectif de dite étude est d'avoir établi des relations semi théoriques donnant la longueur relative, le rapport des hauteur conjuguées et le rendement en fonction de la rugosité et le nombre de Froude de l'écoulement incident, les travaux ont été achevés en démontrant que pour une valeur donnée de nombre de Froude l'augmentation de la rugosité absolue provoque la diminution de la longueur relative, la même chose pour le rapport des hauteurs conjuguées et la profondeur du ressaut, ainsi pour le rendement de ressaut, l'augmentation de la rugosité absolue provoque une meilleure dissipation d'énergie pour des valeurs élevées de nombre de Froude la dissipation s'atténue,

Un quatrième chapitre s'est intéressé sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal circulaire avec banquettes, le choix de ce type est basé sur le but d'avoir une idée de comparaison de deux types de canaux composés, les travaux examinés sont ceux de la thèse de magister de S. ZIANI.

Partie II,

***Contribution à l'Etude de
l'approche semi théorique du
Ressaut Hydraulique en canal
Rectangulaire de section
composée à Fond Rugueux,***

Introduction partie II

L'étude bibliographique du ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section triangulaire à parois rugueuse a permis de montrer que le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident peut être exprimé en fonction du rapport $Y=h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut, et de la rugosité absolue des parois, tel que : $F_1=f(Y,\varepsilon)$, ceci nous a donné une idée sur notre étude,

La deuxième partie de notre étude sera, cependant, entièrement consacrée à notre propre contribution dans l'étude de l'approche semi théorique du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée à fond rugueux. L'étude sera abordée d'une manière théorique et expérimentale.

Le premier chapitre de cette partie sera consacré à l'étude semi théorique du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée à fond rugueux, cette analyse se base sur l'équation de la quantité de mouvement conduit à élaborer une relation liant les caractéristiques hydrauliques du dit ressaut.

Le deuxième aura visé à l'identification du modèle expérimental en décrivant les procédures et méthodologies prises en considération lors de déroulement des tests au laboratoire et d'analyser les résultats expérimentaux en but d'établir l'approche semi théorique adimensionnelle à caractère générale permettant le dimensionnement des ouvrages annexes des barrages tel que les bassins d'amortissement.

Chapitre VI

Analyse Théorique

VI-1 Introduction

Ce présent chapitre sera consacré à un développement théorique, permettant de trouver une relation théorique de la forme $F_1=f(Y,\beta,\tau,C_r)$ en se basant sur l'équation de la quantité de mouvement entre les deux sections (1) et (2) en utilisant au même temps l'équation de continuité tels que, F_1 est le nombre de Froude de l'écoulement incident, $Y=h_2/h_1$ est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut (h_1 et h_2 étant les hauteurs conjuguées du niveau d'eau respectivement à l'extrémité amont et aval), $\beta = \frac{b}{B}$, $\tau = \frac{h_1}{h}$. En second lieu ce chapitre servira à estimer le coefficient de frottement (C_r), afin de corriger la relation issue du développement théorique, les données expérimentales nous permettront en outre, d'analyser expérimentalement la relation obtenue, afin de trouver une formulation explicite de la fonction $\varphi(F_1, Y, \beta, \tau, C_r)=0$.

VI-2 Analyse Théorique

Nous avons appliqué l'équation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section droite composée (Figure 6.1), en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes,

- la répartition des pressions dans la section finale et initiale est hydrostatique,
- la distribution des vitesses est uniforme,
- la perte de charge par frottement est négligeable,
- la résistance de l'air est négligeable,

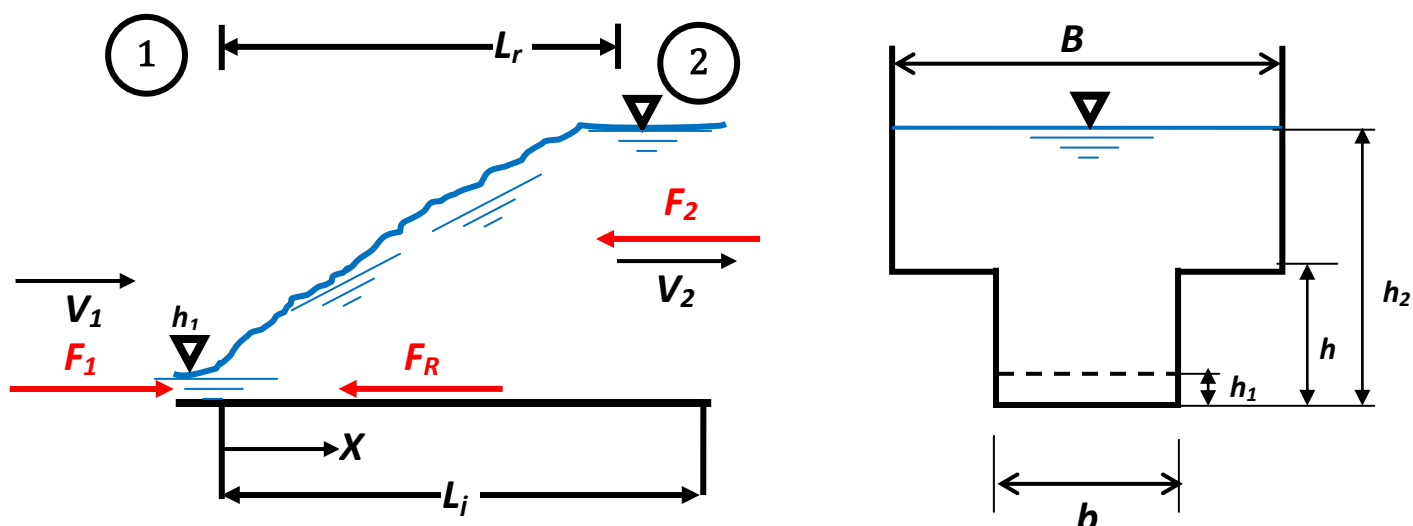


Figure 6-1, Schéma de définition du Ressaut

L'application de l'équation de quantité de mouvement entre les deux sections amont (A1) et aval (A2) de ressaut, qui se base sur le théorème d'Euler disant que la somme des forces extérieures égale à la variation de la quantité de mouvement,

$$\Delta \mathbf{mv} = \sum_{i=1} (\mathbf{F})_{\text{ext}}$$

$$\rho Q \vec{V}_1 - \rho Q \vec{V}_2 = \sum_{i=1} (\mathbf{F})_{\text{ext}} \dots (6.1),$$

((F)ext) Représente la somme des forces extérieures qui sont,

- La force de pression F_1 appliquée à la section 1-1.
- La force de pression F_2 appliquée à la section 2-2.
- Le poids G appliqué au centre de gravité du volume d'eau formé par le ressaut orienté verticalement vers le bas qui s'annule en le projetant sur l'axe des x (l'horizontalité).
- Et la force de résistance F_R (Frottement) s'opposant l'écoulement,

Les forces F_1 et F_2 sont appliquées, selon la figure, respectivement aux centres de gravité des sections 1 et 2, le poids G est appliqué au centre de gravité du ressaut qui s'annule selon l'axe des x, les forces de pressions F_1 et F_2 peuvent être exprimés, en appliquant les lois de l'hydrostatiques,

A_1 et A_2 représentent respectivement l'aire de la section mouillée 1 et 2 et V_1 et V_2 représente le volume d'eau inscrit entre les deux sections 1 et 2.

L'équation de continuité indique que la vitesse moyenne de l'écoulement s'écrit, en fonction du débit volume Q et de l'aire de la section mouillée A ,

$$v = Q/A$$

L'introduction de la conservation de la masse(ou de continuité),

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \dots (6.2)$$

En tenant compte de toutes ces considérations la relation (1) deviendra,

$$\rho Q V_2 - \rho Q V_1 = F_1 - F_2 - F_R$$

$$\rho Q (V_2 - V_1) = F_1 - F_2 - F_R \quad (6.3)$$

En tenant compte de la définition des vitesses d'écoulement en fonction de débit et de surface traversée,

$$V_1 = \frac{Q}{A_1}, V_2 = \frac{Q}{A_2}$$

L'équation (6.3) s'écrit sous la forme,

$$\rho Q \left(\frac{Q}{A_2} - \frac{Q}{A_1} \right) = F_1 - F_2 - F_R$$

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = F_1 - F_2 - F_R \quad (6.4)$$

La force hydrostatique est donnée par la formule,

$$\mathbf{F} = \int_s d\mathbf{F} = \int_s \mathbf{P} d\mathbf{S} = \rho g \int_s h d\mathbf{S}$$

Alors, pour une section plane,

$$\mathbf{F} = \rho g h_G \mathbf{S},$$

Où les surfaces planes sont les suivantes,

$$A_1 = b h_1, \quad A_2 = B(h_2 - h) + b h$$

Alors on peut trouver les forces hydrostatiques,

$$F_1 = \rho g \frac{h_1}{2} b h_1$$

$$F_2 = \rho g \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) b h + \rho g \left(\frac{h_2 - h}{2} \right) B(h_2 - h)$$

Chézy stipule que la force de résistance s'opposant à l'écoulement est proportionnelle au carré de la vitesse moyenne V , qui est donnée par la formule suivante,

$$F_R = \rho g L_j C \left(\frac{V^2}{2g} \right) b = \rho g L_j C \left(\frac{Q^2}{2g A_1^2} \right) b,$$

On remplace les termes prédéfinis dans l'équation (4) on obtient,

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = \overbrace{\rho g \frac{h_1}{2} b h_1}^{F_1} - \overbrace{\rho g \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) b h + \rho g \left(\frac{h_2 - h}{2} \right) B(h_2 - h)}^{F_2} - \overbrace{\rho g L_j C \left(\frac{Q^2}{2g A_1^2} \right) b}^{F_R}$$

En divisant les deux cotés par ($w = \rho g$) on obtient,

$$\frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = \frac{h_1}{2} b h_1 - \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) b h - \left(\frac{h_2 - h}{2} \right) B(h_2 - h) - L_j C \left(\frac{Q^2}{2g A_1^2} \right) b$$

Puis en remplaçant les surfaces A_1 et A_2 on aboutit à,

$$\begin{aligned} \frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{B(h_2 - h) + b h} - \frac{1}{b h_1} \right) \\ = \frac{h_1}{2} b h_1 - \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) b h - \left(\frac{h_2 - h}{2} \right) B(h_2 - h) - L_j C \left(\frac{Q^2}{2g A_1^2} \right) b \end{aligned}$$

Par division les deux cotés par ($b h_1^2$) on trouve,

$$\frac{\frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{B(h_2 - h) + b h} - \frac{1}{b h_1} \right)}{b h_1^2} = \frac{\frac{h_1}{2} b h_1}{b h_1^2} - \frac{\left(h_2 - \frac{h}{2} \right) b h}{b h_1^2} - \frac{\left(\frac{h_2 - h}{2} \right) B(h_2 - h)}{b h_1^2} - \frac{L_j C \left(\frac{Q^2}{2g A_1^2} \right) b}{b h_1^2}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{B(h_2-h)+bh} - \frac{1}{bh_1} \right) + \frac{L_j C \left(\frac{Q^2}{2gb^2h_1^2} \right) b}{bh_1^2} = \frac{\frac{h_1}{2} bh_1}{bh_1^2} - \frac{\left(h_2 - \frac{h}{2} \right) bh}{bh_1^2} - \frac{\left(\frac{h_2-h}{2} \right) B(h_2-h)}{bh_1^2} \\
 & \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} \left(\frac{bh_1}{B(h_2-h)+bh} - \frac{bh_1}{bh_1} \right) + L_j C \left(\frac{Q^2}{2gb^3h_1^4} \right) b \\
 & = \frac{bh_1^2}{2bh_1^2} - \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) \frac{bh}{bh_1^2} - \left(\frac{B}{2bh_1^2} \right) (h_2-h)^2 \\
 & \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} \left(\frac{bh_1}{B(h_2-h)+bh} - 1 + \frac{L_j C}{2h_1} \right) = \frac{1}{2} - \left(\left(h_2 - \frac{h}{2} \right) \frac{h}{h_1^2} \right) - \left(\frac{Bh_1^2}{2bh_1^2} \right) \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h}{h_1} \right)^2 \\
 & \frac{2Q^2}{gb^2h_1^3} \left(\frac{bh_1}{B(h_2-h)+bh} + \frac{L_j C}{2h_1} - 1 \right) = 1 - \left((2h_2-h) \frac{h}{h_1^2} \right) - \left(\frac{B}{b} \right) \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h}{h_1} \right)^2 \\
 & \frac{2Q^2}{gb^2h_1^3} \left(\frac{bh_1}{bh_1 \left(\frac{B}{b} \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h}{h_1} \right) + \frac{h}{h_1} \right)} + \frac{L_j C}{2h_1} - 1 \right) = 1 - \left((2h_2-h) \frac{h}{h_1^2} \right) - \left(\frac{B}{b} \right) \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h}{h_1} \right)^2 \\
 & \frac{2Q^2}{gb^2h_1^3} \left(\frac{1}{\frac{B}{b} \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h}{h_1} \right) + \frac{h}{h_1}} + \frac{L_j C}{2h_1} - 1 \right) = 1 - \left(\left(\frac{2h_2}{h_1} - \frac{h}{h_1} \right) \frac{h}{h_1} \right) - \left(\frac{B}{b} \right) \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{h}{h_1} \right)^2
 \end{aligned}$$

Après un réarrangement et utilisation des notions suivantes on arrive à la l'équation (6.6)

$$\text{(Nombre de Froude)} \quad F_1^2 = \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} \quad (6.5),$$

$$C_r = \frac{L_j C}{2h_1}, \quad \beta = \frac{b}{B}, \quad \tau = \frac{h_1}{h}, \quad Y = \frac{h_2}{h_1}$$

$$\begin{aligned}
 2F_1^2 \left(\frac{1}{\frac{1}{\beta} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) + \frac{1}{\tau}} + C_r - 1 \right) &= 1 - \left(\left(2Y - \frac{1}{\tau} \right) \frac{1}{\tau} \right) - \left(\frac{1}{\beta} \right) \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 \\
 2F_1^2 \left(\frac{\beta}{\left(Y - \left(\frac{1-\beta}{\tau} \right) \right)} + C_r - 1 \right) &= 1 - \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} - \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta} \quad (6.6)
 \end{aligned}$$

Est la relation fonctionnelle liant les paramètres suivants, $(F_1, Y, C_r, \beta, \tau)$, d'une autre manière cette relation est la fonction,

$$\varphi(F_1, Y, C_r, \beta, \tau) = 0$$

VI-3 Conclusion

Notamment, elle est la plateforme de notre étude pour valoriser le coefficient de frottement C_r étant données les valeurs des autres paramètres qui entrent en jeu, à cet effet des mesures expérimentales ont été réalisées au laboratoire, en deux catégories, la première en utilisant un fond lisse pour le lit mineur avec les cinq ouvertures ($h_{1(m)} = 0.04, 0.035, 0.030, 0.025, 0.02$) cette première catégorie on va l'exploiter pour valider l'approche théorique décortiquée précédemment et prouver que les mesures en question sont bonnes, qui va pratiquement conduire à une valeur nulle pour le coefficient de frottement qui veut dire qu'on a une bonne fiabilité des équipements de mesure et que la relation aboutie est la même obtenue par les hauteurs Khettaoui et Achaour quand C_r est nulle, la deuxième catégorie des mesures est destinée pour la quantification de coefficient de frottement (Résistance) en introduisant un lit mineur à fond rugueux de différentes rugosité ($\epsilon(m) = 0.012, 0.010, 0.008, 0.006$) avec la variabilité des ouvertures ($h_{1(m)} = 0.04, 0.035, 0.030, 0.025, 0.02$),

Chapitre VII

***Essais au Laboratoire
Et analyses des
résultats
expérimentaux***

7-1 Introduction

Ce chapitre s'est intéressé aux travaux pratiques au laboratoire qui est la tâche la plus importante qui permet d'avoir les résultats expérimentaux pour les exploiter durant notre étude, au sein de ce chapitre on va citer les dispositifs et outils utilisés en décrivant comment une mesure se fait en utilisant les dispositifs adéquats et nécessaires, en parlant sur les mesures de sécurité à prendre pour lutter le personnel et équipements contre des incidents ou accidents imprévus, en examinant la procédure fiable pour faire réussir les tests.

7-2 Le canal d'essai

Les essais expérimentaux ont été effectués dans un canal rectangulaire de section composée à surface libre représenté sur la figure (7.1) et la photo (7.1), Il s'agit d'un canal de 12 m de longueur, ayant une hauteur de 0,6m, et des parois latérales en verre (pour pouvoir suivre les variations géométriques de l'allure du ressaut hydraulique formé).

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(7.3) qui alimente un convergent en charge permettant de générer un écoulement à grande vitesse photo (7.6), débouchant dans le canal de mesure, on dispose ici d'un canal horizontal de section rectangulaire composée, de longueur 5 m et de hauteur $h_1=2; 2.5; 3; 3.5; 4$ cm a la largeur de lit mineur $b=20$ cm de lit majeur $B=60$ cm.

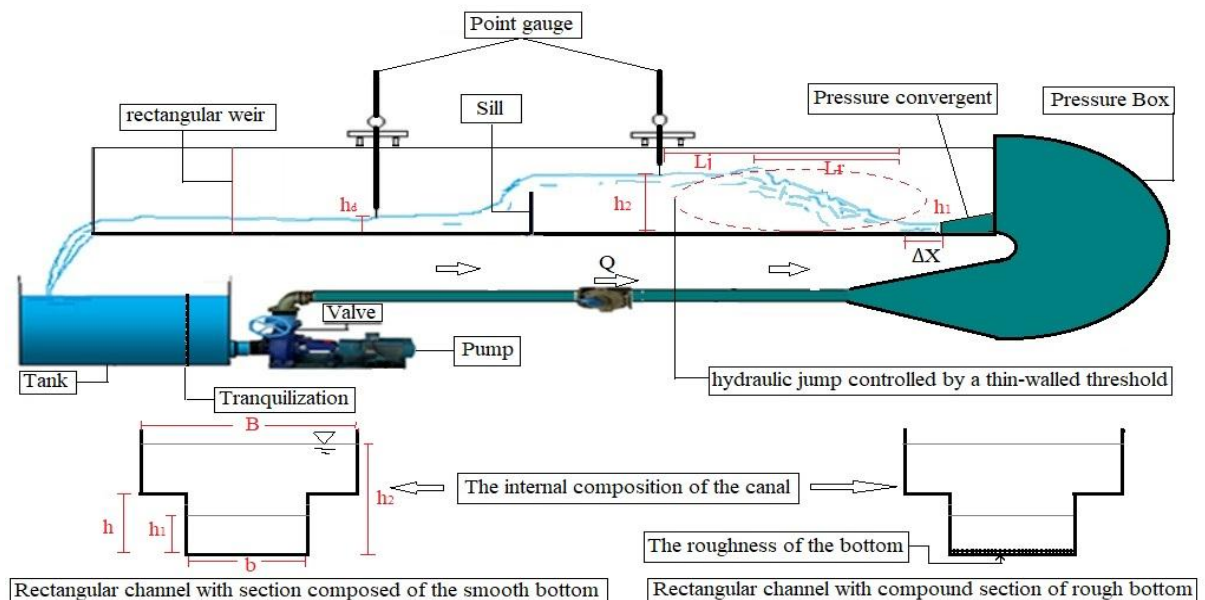


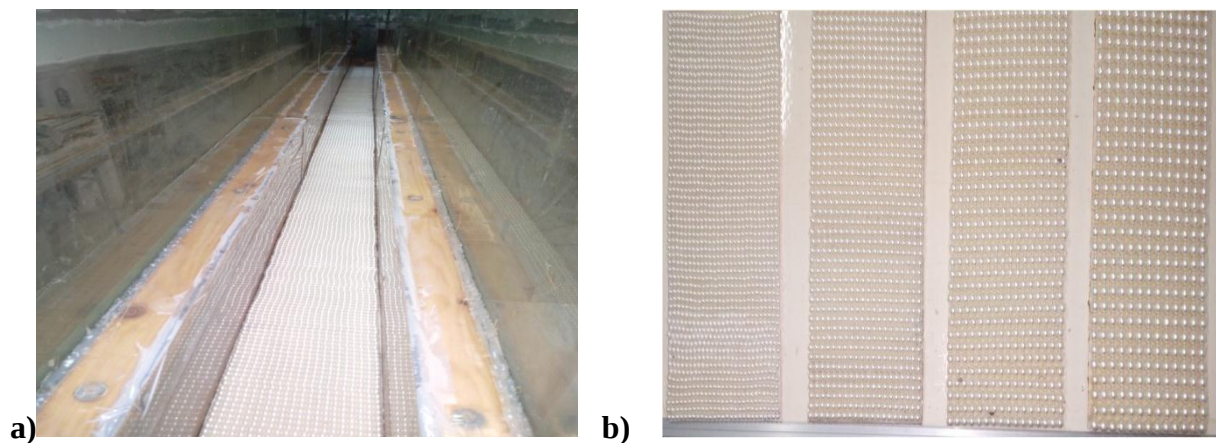
Figure 7.1, schéma de définition du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil continu à paroi mince dans un canal rectangulaire de section composée à fond rugueux.



Photographie 7.1, Vue générale du canal d'expérimentation

Concernant le fond rugueux du canal, nous avons testé différentes rugosités qui s'imposent au bas du canal de section composée, nous avons procédé aux étapes suivantes:

1. Nous avons collé des billes en plastique sur un tapis de manière linéaire et régulière, sur 4 mètres du canal de test. Cette position des billes nous permet d'obtenir une forme uniforme et de donner de bons résultats.
2. Le tapis rugueux obtenu est ensuite soigneusement collé au lit mineur du canal rectangulaire d'une section composite.
3. Les rugosités obtenues sont: $\varepsilon = 06 \text{ mm}$, $\varepsilon = 08 \text{ mm}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$ et $\varepsilon = 12 \text{ mm}$ (photo 7.2.b).



Photographie 7.2, (a): Photographie d'un tapis rugueux soigneusement collé au bas du canal rectangulaire de section composite. (b): Photographie des quatre tapis rugueux: $\varepsilon = 06 \text{ mm}$, $\varepsilon = 08 \text{ mm}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$ et $\varepsilon = 12 \text{ mm}$

Ainsi lorsque nous obtenons une configuration du ressaut hydraulique contrôlé, nous effectuons, pour une hauteur initiale h_1 et une position seuil fixe x , les opérations suivantes:

1. Lecture de la hauteur h_{dev} du trop-plein du canal de débitmètre rectangulaire **de Rachedi**.

2. Calcul du débit volumique correspondant, en appliquant la relation du débitmètre rectangulaire (Hachemi Rachedi L.2006):

$$Q = 0,3794 \sqrt{2g} \beta (1 + 0,16496 \beta^{2,0716})^{3/2} h_{dev}^{3/2} \quad (7.1)$$

Avec:

Q: le débit en (m³/s).

$\beta = b / B$: rapport de l'élargissement ()

b: échancrure du débitmètre (m).

B: la largeur du canal (m).

g: l'accélération de la gravité (m/s²).

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

3. Calcul du nombre de Froude F_1 incident, en appliquant la relation (7.1) et (6.5)

4. Mesure de la hauteur finale h_2 du ressaut hydraulique.

7.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

7.3.1. Mesures expérimentales

Tableau 7.1 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de $f(Y)$ en fonction de F_1^2 pour les cinq valeurs de la rugosité ϵ ,

Rugosité = 12			Rugosité = 8,		
h_{dev} (cm)	h_1 (m)	h_2 (m)	h_{dev} (cm)	h_1 (m)	h_2 (m)
0.18	0.04	0.181	0.139	0.04	0.131
0.165	0.025	0.19	0.142	0.04	0.137
0.112	0.02	0.123	0.145	0.04	0.144
0.12	0.02	0.135	0.15	0.04	0.149
0.131	0.02	0.145	0.154	0.04	0.157
0.135	0.02	0.153	0.17	0.04	0.179
0.139	0.02	0.161	0.153	0.035	0.167
0.145	0.02	0.17	0.123	0.03	0.126
0.149	0.02	0.181	0.127	0.03	0.134
0.155	0.02	0.186	0.134	0.03	0.143
0.159	0.02	0.195	0.138	0.03	0.148
Rugosité = 10			0.145	0.03	0.156
0.144	0.04	0.132	0.148	0.03	0.164
0.148	0.04	0.141	0.109	0.025	0.114
0.16	0.03	0.178	0.119	0.025	0.125
0.12	0.025	0.126	0.124	0.025	0.134

0.123	0.025	0.131	0.128	0.025	0.141
0.127	0.025	0.139	0.134	0.025	0.146
0.135	0.025	0.147	0.139	0.025	0.154
0.14	0.025	0.155	0.143	0.025	0.166
0.144	0.025	0.163	0.151	0.025	0.176
0.147	0.025	0.172	0.153	0.025	0.185
0.152	0.025	0.18	0.159	0.025	0.195
0.163	0.025	0.2	0.101	0.02	0.112
0.096	0.02	0.101	0.107	0.02	0.12
0.102	0.02	0.11	0.111	0.02	0.126
0.106	0.02	0.119	0.12	0.02	0.138
0.11	0.02	0.125	0.136	0.02	0.173
0.115	0.02	0.132	0.14	0.02	0.178
0.121	0.02	0.139	0.151	0.02	0.198
0.125	0.02	0.147	Rugosité = 6		
0.13	0.02	0.155	0.137	0.04	0.127
0.136	0.02	0.164	0.143	0.04	0.138
0.139	0.02	0.17	0.148	0.04	0.146
0.144	0.02	0.179	0.153	0.04	0.151
0.151	0.02	0.187	0.157	0.04	0.161
0.155	0.02	0.195	0.162	0.04	0.172
Rugosité = 0			0.167	0.04	0.178
0.078	0.02	0.075	0.174	0.04	0.186
0.098	0.02	0.113	0.181	0.04	0.195
0.102	0.02	0.119	0.121	0.035	0.118
0.106	0.02	0.128	0.127	0.035	0.125
0.11	0.02	0.134	0.135	0.035	0.135
0.113	0.02	0.141	0.14	0.035	0.144
0.117	0.02	0.15	0.147	0.035	0.152
0.12	0.02	0.159	0.149	0.035	0.158
0.122	0.02	0.166	0.156	0.035	0.165
0.129	0.02	0.175	0.151	0.035	0.173
0.132	0.02	0.184	0.165	0.035	0.182
0.134	0.02	0.189	0.168	0.035	0.195
0.137	0.02	0.195	0.114	0.03	0.114
0.141	0.025	0.174	0.117	0.03	0.12
0.144	0.025	0.181	0.123	0.03	0.13
0.147	0.025	0.19	0.128	0.03	0.135
0.152	0.025	0.198	0.137	0.03	0.147
0.151	0.03	0.174	0.142	0.03	0.153
0.156	0.03	0.182	0.146	0.03	0.16
0.16	0.03	0.193	0.15	0.03	0.167
0.163	0.03	0.198	0.154	0.03	0.176
0.107	0.035	0.098	0.16	0.03	0.188

0.11	0.035	0.103	0.164	0.03	0.197
0.115	0.035	0.111	0.106	0.025	0.107
0.128	0.035	0.127	0.111	0.025	0.116
0.134	0.035	0.136	0.118	0.025	0.127
0.141	0.035	0.149	0.124	0.025	0.135
0.146	0.035	0.157	0.129	0.025	0.143
0.157	0.035	0.174	0.149	0.025	0.176
0.162	0.035	0.183	0.157	0.025	0.194
0.166	0.035	0.192	0.09	0.02	0.099
0.168	0.035	0.198	0.099	0.02	0.11
0.14	0.04	0.135	0.105	0.02	0.117
0.145	0.04	0.144	0.106	0.02	0.122
0.149	0.04	0.151	0.109	0.02	0.13
0.153	0.04	0.158	0.112	0.02	0.138
0.158	0.04	0.167	0.12	0.02	0.143
0.164	0.04	0.174	0.136	0.02	0.175
0.169	0.04	0.183	0.139	0.02	0.186
0.176	0.04	0.197	0.143	0.02	0.195

7.3.2. Variation du coefficient de résistance Cr en fonction de la rugosité relative (ε / b).

Afin de trouver l'expression du coefficient de résistance Cr en fonction de la rugosité relative

ε / b , nous allons représenter par la figure (7.2), la variation du terme $f(Y) = \frac{\beta F_1^2}{Y - (1 - \beta)/\tau} +$

$\frac{(2Y - 1/\tau) + (Y - 1/\tau)^2}{2\tau} - 1$ en fonction de F_1^2 pour les quatre rugosités absolues: ε (mm) = 06, 08, 10 et 12.

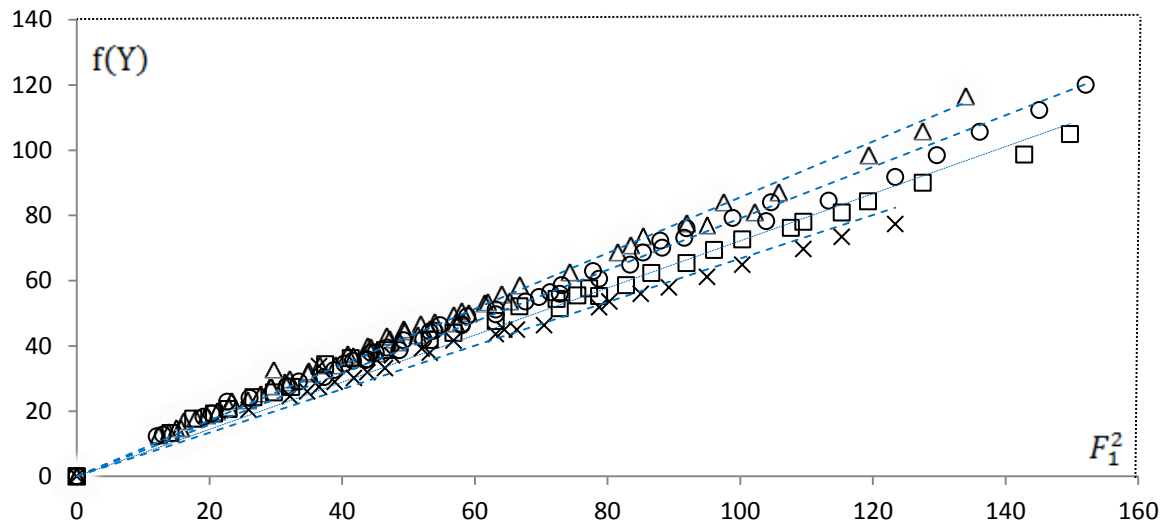


Figure 7.2, Variation de $f(Y)$ en fonction de F_1^2 , pour quatre rugosités relatives: ε (mm) = (Δ) 06, ($\circ$) 08, ($\square$) 10 et ($\times$) 12. (---) Courbe d'ajustement.

La figure 7.2 montre quatre nuages de points distincts, chacun correspondant à une valeur déterminée de la rugosité relative ε / b .

L'analyse des points de mesure expérimentaux du saut, montre que chaque nuage de points peut être ajusté avec une ligne droite de la forme : $\frac{\beta F_1^2}{Y-(1-\beta)/\tau} + (\frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1)/2 = M F_1^2$

Le terme «M» représente le facteur (1-Cr) par un bon coefficient de corrélation.

Le tableau 7.2 regroupe les valeurs des coefficients Cr.

Tableau 7.2: coefficient Cr des courbes d'ajustement

ε/b	Coefficient (C_r)	R^2
0 (lisse)	0	1
0.04	0.145	0.99
0.053	0.210	0.99
0.067	0,278	0.98
0.08	0,332	0.954

Le tableau 7.2 montre que le coefficient Cr augmente avec l'augmentation de la rugosité relative ε / b . L'ajustement statistique des couples des valeurs (ε/b , Cr) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire d'équation: **Cr = 4,061 (ε / b)**.

Ceci est illustré à la figure (7.4).

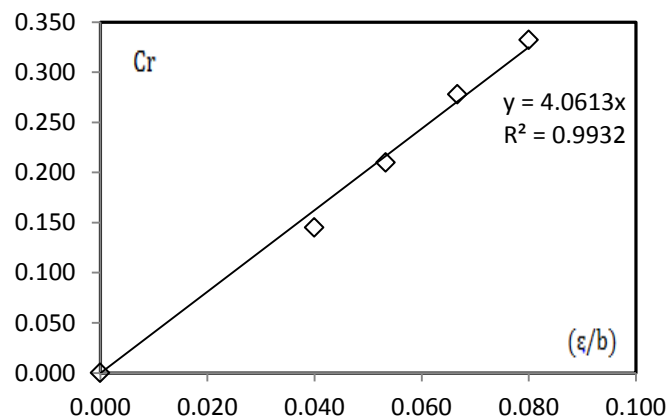


Figure 7.3, Variation du coefficient Cr en fonction de la rugosité relative ε / b

En remplaçant le coefficient Cr par son expression dans la relation (6.6) l'équation semi-

$$\text{théorique devient : } F_1^2(1 - 4.061(\varepsilon/b)) = \frac{\beta F_1^2}{Y-(1-\beta)/\tau} + \frac{\frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1}{2} \quad (7.2)$$

avec $0.00 \leq \varepsilon/b \leq 0.08$

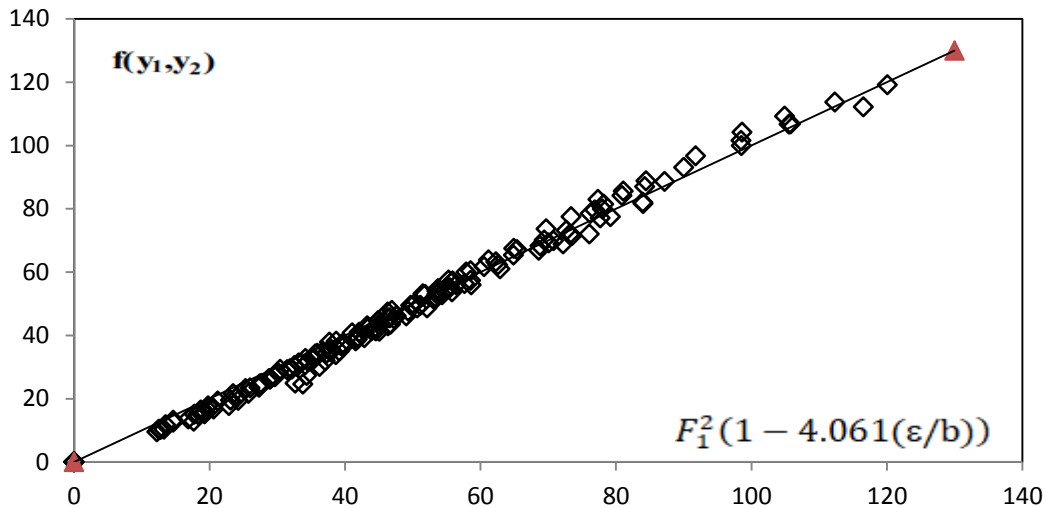


Figure 7.4, Représentation et validation de l'approche semi-théorique

7.3.3 Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du coefficient Cr de résistance et du nombre de Froude incident F_1

L'équation semi-théorique (7.2) étant implicite en Y, nous avons pu trouver une relation approximative qui permet de trouver aisément le rapport Y en fonction du coefficient Cr de résistance du à la rugosité imposée au fond du canal et du nombre de Froude F_1 .

La figure (7.5) montre un nuage de points qui suit parfaitement la forme d'une seule courbe. L'ajustement des points de mesure par la méthode des moindres carrés non linéaires donne avec une très bonne corrélation la relation de puissance suivante :

$$Y = 1.444F_1^{0.956}(1 - Cr)^{0.478} \quad \text{avec} \quad 0.00 \leq \varepsilon/b \leq 0.08 \quad (7.3)$$

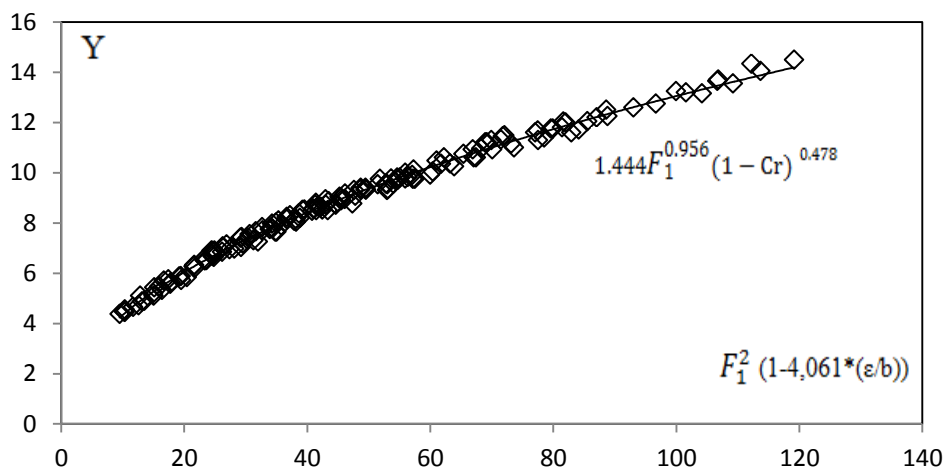


Figure 7.5, Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de $F_1^2(1-Cr)$. (□) Points de mesures expérimentales. (---) Courbe de réglage.

La figure 7.6 montre la comparaison entre Y expérimental et l'équation semi-théorique (7.2). On note que le nuage de points suit parfaitement la première bissectrice, montrant ainsi que la relation (7.3) représente très bien la relation semi-théorique.

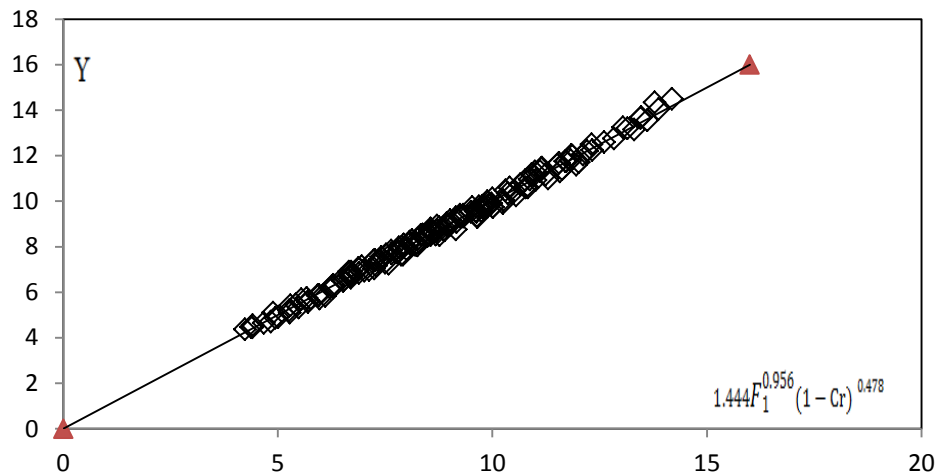


Figure 7.6, Comparaison entre Y expérimental et l'équation semi-théorique (7.3). ($\square$) Points de mesures expérimentales. (-) Courbe d'ajustement

7.4. CONCLUSION

Cette étude s'est intéressée **en premier lieu** à l'analyse expérimentale de l'approche semi théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée à fond rugueux. Quatre rugosités équivalentes ont ensuite été testées: $\varepsilon = 06$ mm; $\varepsilon = 08$ mm; $\varepsilon = 10$ mm et $\square\varepsilon = 12$ mm. Pour chacune des rugosités équivalentes étudiées, l'expérience a été réalisée sous cinq ouvertures en hauteur: $h_1 = 2$ cm ; $h_1 = 2,5$ cm ; $h_1 = 3$ cm ; $h_1 = 3,5$ cm et $h_1 = 4$ cm avec plusieurs seuils minces testés. Une large gamme de débits et de nombre de Froude a ainsi été obtenue au niveau du laboratoire de recherche d'Ouargla. une approche semi théorique implicite en fonction de $f(Fr, \varepsilon/b, \beta, \tau, Y)$ a été obtenue.

en dernier lieu , nous avons exploité les mesures expérimentations obtenues au niveau du laboratoire qui ont permis finalement d'établir une approche semi théorique explicite adimensionnelle à caractère générale permettant de dimensionner les ouvrages annexes des barrages tel que les bassins d'amortissements.

***Conclusion
de la Deuxième Partie***

Conclusion de la deuxième partie

Cette partie qui a été consacrée à l'étude de l'approche semi théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée du point de vue théorique et expérimentale, cette partie a été divisée en deux chapitres.

Le premier chapitre a été consacré à un développement théorique visant à exprimer la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, \beta, \tau, C_r) = 0$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée de pente horizontale à fond rugueux. Cette approche a mené à l'établissement d'une relation semi théorique. Ceci a été rendu possible par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut hydraulique. Il a été montré que pour $C_r = 0$, la relation théorique obtenue conduit à la forme du ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée.

Pour le deuxième et dernier chapitre de notre contribution nous avons effectué à la description du banc expérimental, qui a servi de base à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique. Nous avons décrit ensuite, l'appareillage utilisé pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique, moyennant des schémas et des photographies, notamment la manière d'avoir un fond rugueux pour le lit mineur.

Ensuite, on s'est intéressée fondamentalement à l'analyse expérimentale de l'approche semi théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée à fond rugueux. Quatre rugosités équivalentes ont ensuite été testées: $\varepsilon = 06 \text{ mm}$; $\varepsilon = 08 \text{ mm}$; $\varepsilon = 10 \text{ mm}$ et $\varepsilon = 12 \text{ mm}$. Pour chacune des rugosités équivalentes étudiées, l'expérience a été réalisée sous cinq ouvertures en hauteur: $h_1 = 2 \text{ cm}$; $h_1 = 2,5 \text{ cm}$; $h_1 = 3 \text{ cm}$; $h_1 = 3,5 \text{ cm}$ et $h_1 = 4 \text{ cm}$ avec plusieurs seuils minces testés. Une large gamme de débits et de nombre de Froude a ainsi été obtenue au niveau du laboratoire de recherche d'Ouargla. une approche semi théorique implicite en fonction de $f(Fr, \varepsilon/b, \beta, \tau, Y)$ a été obtenue.

Finalement, nous avons exploité les mesures expérimentations obtenues au niveau du laboratoire qui ont permis finalement d'établir une approche semi théorique explicite adimensionnelle à caractère générale permettant de dimensionner les ouvrages annexes des barrages tel que les bassins d'amortissements.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Notre étude a été consacrée primordialement à l'analyse théorique et expérimentale du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal rectangulaire de section composée à pente nulle avec lit mineur rugueux, elle a été composée de deux grandes parties qui ont été nécessaires : une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine, et une deuxième partie où nous avons traité notre propre contribution.

Avant d'entamer les deux principales parties d'étude nous avons commencé par un premier chapitre intitulé par Définition, où nous avons essayé de citer les définitions et nomenclatures des principaux termes qui vont être mentionnés le long de ce travail,

La première partie qui a été divisée en trois chapitres :

- Le premier chapitre de cette partie bibliographique, a permis d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire horizontal et incliné, où nous avons parlé sur les travaux de Hager et al (1990) qui concernent le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal, puis ceux de Kindsvater (1944) relatifs au ressaut hydraulique en canal rectangulaire à pente positive et à la fin nous avons cité l'étude de Mc Corcodal et Mohamed (1994) qui ont étudié le cas limite d'existence des ressauts en pente négative, une relation théorique a été proposée pour le type D.
- Le second chapitre de la partie bibliographique, a été consacré à l'approche de Khattaoui et Achour (2012), relative au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé à pente nulle, où nous avons cité la notion de Bousmar et al (2005) qui ont définissaient les écoulements non uniformes en lit composé qui sont très compliqués à cause du transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur, ces deux phénomènes, se manifestant de différentes façons, sont des sources de dissipation d'énergie supplémentaire de l'écoulement.
- Le troisième chapitre s'est intéressé au ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite triangulaire horizontale à ouverture 90° à paroi rugueuse. En examinant les travaux du Achour et Debabèche (2003), leur étude expérimentale a été effectuée en testant quatre valeurs de la rugosité absolue ε , les sept hauteurs initiales de l'écoulement h_1 , une large gamme du nombre de Froude incident a été ainsi obtenue, correspondant à $4 < F_1 < 24$, la formation du ressaut contrôlé est conditionnée par la mise en place d'un seuil à l'aval de l'écoulement,

- le quatrième et dernier chapitre de la partie bibliographique a été consacré aux travaux sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal circulaire avec banquettes qui a été le résultat de mémoire de magister de S. ZIANI (2015), cette étude nécessite la détermination des relations donnant les positions des centres de gravité et l'aires des sections transversales pour pouvoir appliquer l'équation de quantité de mouvement.

La deuxième partie de notre contribution a concerné l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée à fond rugueux à pente nulle, cette partie a été divisée en deux chapitres :

Le premier chapitre a été consacré à un développement théorique visant à exprimer la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, \beta, \tau, C_r) = 0$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée de pente horizontale à fond rugueux. Cette approche a mené à l'établissement d'une relation semi théorique. Ceci a été rendu possible par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut hydraulique. Il a été montré que pour $C_r = 0$, la relation théorique obtenue conduit à la forme du ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée.

Pour le deuxième et dernier chapitre de notre contribution nous avons effectué à la description du banc expérimental, qui a servi de base à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique. Nous avons décrit ensuite, l'appareillage utilisé pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique, moyennant des schémas et des photographies, notamment la manière d'avoir un fond rugueux pour le lit mineur.

Ensuite, on s'est intéressée fondamentalement à l'analyse expérimentale de l'approche semi théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire de section composée à fond rugueux. Quatre rugosités équivalentes ont ensuite été testées: $\varepsilon = 06$ mm; $\varepsilon = 08$ mm; $\varepsilon = 10$ mm et $\varepsilon = 12$ mm. Pour chacune des rugosités équivalentes étudiées, l'expérience a été réalisée sous cinq ouvertures en hauteur: $h_1 = 2$ cm ; $h_1 = 2,5$ cm ; $h_1 = 3$ cm ; $h_1 = 3,5$ cm et $h_1 = 4$ cm avec plusieurs seuils minces testés. Une large gamme de débits et de nombre de Froude a ainsi été obtenue au niveau du laboratoire de recherche d'Ouargla. une approche semi théorique implicite en fonction de $f(Fr, \varepsilon/b, \beta, \tau, Y)$ a été obtenue.

Finalement, nous avons exploité les mesures expérimentations obtenues au niveau du laboratoire qui ont permis finalement d'établir une approche semi théorique explicite

adimensionnelle à caractère générale permettant de dimensionner les ouvrages annexes des barrages tel que les bassins d'amortissements.

***Principales notations
et Références
Bibliographiques***

PRINCIPALES NOTATIONS

b largeur du lit mineur du canal [m]
 F_1 Nombre de Froude en amont du saut []
 g Accélération de la gravité [m/s^2]
 h_1 Hauteur initiale du saut [m]
 h_2 Hauteur finale du saut [m]
 L_j Longueur du ressaut hydraulique [m]
 L_r Longueur du rouleau de surface [m]
 B Largeur du canal [m]
 Q Débit volumique [m^3/s]
 Y Rapport des hauteurs conjuguées []
 $\tau = h_1/h$ Rapport de forme []
 $\beta = b/B$ rapport de l'élargissement []
 ε/b rugosité relative []
 ε rugosité absolue [m]
 C_r coefficient de résistance []

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Achour, B., Dissipation d'énergie par ressaut, thèse d'état. Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil, 1998.
- [2] Achour, B., (2000). Ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. JHR 2000; 38(4) : 307-311.
- [3] Achour, B., Debabeche, M., Ressaut contrôlé par seuil dans un canal profile en U. Journal of hydraulicresearch, Vol. 41 (02), pp. 97-103, 2003.
- [4] Bousmar D, Rivière N, Proust S, Paquier A, Morel R, Zech Y. (2005) Upstream discharge distribution in compound-channel flumes. J H Eng 2005, ASCE; 131(5): 408-412.
- [5] Debabeche, M., Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie, 2003.

- [6] Debabeche, M., Ghomri, A., Sahnoune, C., Ismail, K., “Effet de la rugosité sur le ressaut hydraulique dans un canal profilé en U (partie1) ” Larhyss journal, N 004, pp.107-118, juin 2005.
- [7] Debabeche, M., Kateb, S., Ghomri, A., “Etude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses ”, Larhyss Journal, N005, pp.187-196, Juin 2006.
- [8] GHOMRI, A., Ressaut hydraulique contrôlé par seuil évoluant en canal profilé en “U”, Mémoire de Magister en Sciences Hydrauliques, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, 2005.
- [9] Ghomri, A., Ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en U à fond rugueux. Mémoire deMagister. Département d’hydraulique, Université de Biskra, Algérie, 2005.
- [10] 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, N⁰ 01, pp.40-57,2009.
- [11]. Ghomri, A., Riguet, F., Contribution to the Experimental Stady oh the Hydraulic Jump Evolving in a U Shaped Channel with Rough Bed, Journal of Fundamental and Applied Sciences, Université el Oued,N₀ 02, pp.254-271,2010.
- [12] Hachemi Rachedi, L., (2006). Analyse d’un écoulement au travers d’une contraction latérale, mémoire de magistère en science hydrauliques, Département d’hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- [13] Kateb.S, Debabeche M, Zegait.RetBaouia K. (2018) ; ApprocheExpérimentale De La Longueur Du RessautHydrauliqueDans Un Canal Triangulaire A ParoisRugueux ; journal of advanced research in science and technology JARST.
- [14] Khattaoui, M., Achour, B., (2012). Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé.Revue scientifique et technique LJEE N°20.
- [15] Rajaratnam, N., Hydraulic jumps on rough beds, Transaction of the engineering institute of Canada,Vol. 11, N° A-2 may 1968.

Liste des Figures

Chapitre I

Figure 1.1	Ecoulements à surface libre dans un évier à fond bien plat	3
Figure 1.2	Figure 2 : Ressaut Hydraulique à travers un Déversoir	4

Chapitre II

Figure 2.1	Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). (a) Pré-ressaut,	9
Figure 2.2	Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). (b) Ressaut de transition,	10
Figure 2.3	Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). (c) Ressaut stable,	10
Figure 2.4	Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). (d) Ressaut agité.	11
Figure 2.5	Classification des ressauts inclinés selon Kindsvater (1944).	14
Figure 2.6	Notion du Ressaut Incliné	14
Figure 2.7	Schéma de définition et volume de contrôle pour ressaut à pente négative	16

Chapitre III

Figure 3.1	Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit	19
Figure 3.2	Variation de Y , calculé par (3.4), en fonction de Fr_1 . (- - -) : $\beta = 1$.	21
Figure 3.3	Variation de Y en fonction de Fr_1 . (o) : équation (3.6), (+) : équation (3.4).	22
Figure 3.4	Variation de η en fonction de Fr_1 . (- - -) : $\beta = 1$. Y est calculé par l'équation (3.3).	23

Chapitre IV

Figure 4.1	Ressaut contrôlé par Seuil à paroi mince	24
Photo 4.1	Echantillon de Toile Rugueuse de Rugosité absolue $\varepsilon = 8,73$ mm	26
Photo 4.2	Toile Rugueuse Soigneusement Collée sur les deux parois du Canal Triangulaire	26
Figure 4.2	Variation de la Longueur Relative L_j/h_1 en fonction du Nombre de Froude F_1	26
Figure 4.3	Variation du Coefficient a de la relation (1) en fonction de la rugosité absolue ε	27
Figure 4.4	Variation de la longueur relative expérimentale (L_j/h_1) en fonction de (ε, F_1) (--) Première Bissectrice	28
Figure 4.5	Variation du Rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de F_1 pour les 04 valeurs testées de rugosité absolue ε , (---) courbe d'ajustement	29
Figure 4.6	Variation du Coefficient b de la relation (5) en fonction de la rugosité absolue ε , (---) courbe d'ajustement selon (6)	30
Figure 4.7	Variation Y_{Exp} en fonction de (F_1, ε), (---) Première Bissectrice	30
Figure 4.8	Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour cinq Valeurs différentes de ε	31
Figure 4.9	Profil de surface généralisé du ressaut hydraulique dans un canal Triangulaire à parois rugueuses pour trois rugosités distinctes (○) 6,04mm (□) 7,11mm et (△) 8,73mm.	32

Chapitre V

Figure 5.1	Canal Circulaire avec Banquette	34
------------	---------------------------------	----

Chapitre VI

Figure 6.1	Schéma de définition du Ressaut	41
------------	---------------------------------	----

Chapitre VII

Figure 7.1	Schéma de définition du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil continu à paroi mince dans un canal rectangulaire de section composée à fond rugueux	46
Photo 7.1	Vue générale du canal d'expérimentation	47
Photo 7.2	(a): Photographie d'un tapis rugueux soigneusement collé au bas du canal rectangulaire de section composite. (b): Photographie des quatre tapis rugueux: $\varepsilon = 06 \text{ mm}$, $\varepsilon = 08 \text{ mm}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$ et $\varepsilon = 12 \text{ mm}$	50
Figure 7.3	Variation du coefficient C_r en fonction de la rugosité relative ε / b	51
Figure 7.4	Représentation et validation de l'approche semi-théorique	52
Figure 7.5	Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de $F^2 (1 - C_r)$. ($\square$) Points de mesures expérimentales. (---) Courbe de réglage	52
Figure 7.6	Comparaison entre Y expérimental et l'équation semi-théorique (7.9). ($\square$) Points de mesures expérimentales. (-) Courbe d'ajustement	53

Liste des Tableaux

Chapitre IV

Tableau 4.1	Valeurs du Coefficient a de la relation 4.1	28
Tableau 4.2	dessous illustre la variation des coefficients (b, c) en fonction des valeurs des rugosités absolues ε ,	29

Chapitre VII

Tableau 7.1	Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de $f(Y)$ en fonction de F_1^2 pour les cinq valeurs de la rugosité ε	48
Tableau 7.2	coefficient C_r des courbes d'ajustement	51