

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2019



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

Mémoire de Master

Filière : Hydraulique

Spécialité : Ouvrage Hydraulique

Thème

Etude expérimentale du rendement du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal asymétrique a convergent rectangulaire

Nom et Prénom de l'étudiant :

Rahmani sara

Encadreur :

Cherhabil sonia

Promotion Juillet 2019

Dédicace

A la mémoire de mes parentes

A mes frères et mes sœurs

A toutes la famille

Partout dans ce le monde

Remerciements

*Mes remerciements vont à l'endroit de notre
Promoteur Mme cherhabil sonia*

*Au membre de jury qui en bien voulue examiner
Notre travail et de l'apprécier a juste valeur.*

*A tous les enseignants de hydraulique qui en
Contribués à notre formation*

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin

A toute la promotion de l'hydraulique (2018 /2019)

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

Première Partie

ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE

INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE

Chapitre I : RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL RECTANGULAIRE

I.	INTRODUCTION	04
I.1	Définition.....	04
I.2	RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE.....	06
I.2.1	type du ressaut classique.....	06
I.2.1	Le pré – ressaut.....	07
I.2.1. b	Ressaut de transition.....	08
I.2.1. c	Ressaut stable.....	08
I.2.1. d	Ressaut agité ou clapoteux.....	09
I.3	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	09
I.4	caractéristique géométrique du ressaut.....	13
I.4.1	hauteur du ressaut.....	13
I.4.2	Longueur du rouleau	14
I.4.3.	Longueur du ressaut	16
I.4.4	Rendement du ressaut.....	17
I.5	Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire.....	21
I.5.1	Approche de Forster et Skinde (1950).....	22
I.5.1.1	Seuil continu à paroi mince.....	22
I.5.1.2	Seuil continu à paroi épaisse.....	24
I.6	Conclusion du premier chapitre.....	25

Chapitre II : RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOIDAL

II.1	Le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal Symétrique.....	26
II.1.1	Introduction.....	26
II.2	Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal.....	27
II.2.1	Rapport des hauteurs conjuguées.....	28
II.2.1.1	Cas particulier du canal rectangulaire.....	30
II.2.1.2.	Cas particulier du canal triangulaire.....	32
II.2.2.	Longueurs du ressaut.....	33
II.3	Rendement.....	35
II.3.1	Cas particulier du canal rectangulaire.....	36
II.3.2	Cas du canal triangulaire.....	37

SOMMAIRE

II.4	Conclusion.....	39
II.2.2	Ressaut dénoyé en canal trapézoïdal asymétrique.....	40
II.2.2.1	Approche d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954.....	40
II.2.2.2	Analyse de la section totale.....	42
II.2.2.3	Analyse de bande longitudinale (volume de contrôle).....	43
II.2.2.4	Discussion des résultats.....	47
II.2.3	Conclusion du deuxième chapitre.....	51
II.2.4	Conclusion de la partie bibliographique.....	52

Deuxième Partie

INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE

Chapitre I DESCRIPTION DU MODELE

II	Introduction.....	54
I.2	Description du dispositif expérimental.....	54
I.3	Appareillage des mesures.....	59
I.3.1	Débitmètre à diaphragme.....	60
I.3.1.1	Technique de mesure de débit.....	60
I.3.1.2	Vérification de la validité de la relation (1.1).....	63
I.3.2.	Limnimétrie.....	
I.4	Les seuils minces.....	66
I.5	Conclusion.....	67

Chapitre II : ETUDE EXPERIMENTALE

II	Introduction.....	68
II.1	Analyse des résultats expérimentaux.....	70
II.1.	Variation expérimentale du rendement en fonction du nombre de Froude incident F_1	70
II.1.1	variation du rendement pour la position du seuil ($x=6.99$ m).....	70
II.1.2	variation du rendement pour la position du seuil ($x=6.02$ m).....	72
II.1.3	variation du rendement pour la position du seuil ($x=3.98$ m).....	74
II.1.4.	variation du rendement pour la position du seuil ($x=3$ m).....	76

SOMMAIRE

II.1.5	variation du rendement pour la position du seuil ($x=2.50$ m).....	78
III	Conclusion a la deuxième partie.....	80
	DISCUSON ET CONCLUSION GENERALE	
	PRINCIPALES NOTATIONS	
	LISTE DES FIGURES	
	LISTE DES TABLEAUX	
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

Résumé :

Cette étude a pour but de contribuer expérimentalement à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique.

Deux grandes parties ont été nécessaires: une première partie bibliographique à travers laquelle nous avons passé en revue les travaux entrepris dans ce domaine ; une deuxième partie expérimentale où on a détaillé notre étude expérimentale concernant le rendement du ressaut étudié. Les équations obtenues sont représentées en termes adimensionnels, afin de permettre leur utilisation dans la pratique.

Mot clé : ressaut hydraulique, Canal trapézoïdale asymétrique, Seuil mince, rendement.

ملخص :

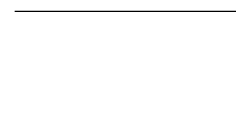
تهدف الدراسة إلى المساهمة بشكل تجريبي لدراسة القفزة الهيدروليكية التي تسيطر عليها عتبة رفيعة يتحرك داخل قناة مفتوحة شبه منحرفة الشكل غير متناظرة.

جزئت هذه الدراسة إلى قسمين: القسم الأول ذو طابع نظري يختص بالأبحاث المتعلقة بالأعمال المنجزة في هذا المجال أما القسم الثاني ذو طابع تجريبي حيث سمح لنا بإيجاد علاقات تجريبية جيدة ومفصلة عن أداء القفزة التي شملتها الدراسة المعادلات التي تم الحصول عليها تظهر من حيث الأبعاد وذلك لاستعمالها في الواقع.

كلمات المفتاحية :

القفزة الهيدروليكية , قناة شبه منحرفة الشكل غير متناظرة , عتبة رفيعة, المرودية

Introduction générale



INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine des constructions hydrauliques, il est souvent question de restituer l'eau d'un ouvrage hydraulique vers un cours d'eau. Un ouvrage hydraulique, tel qu'un barrage, est muni d'un déversoir pour laisser passer les débits de crues que la retenue ne peut accumuler. Au pied de ce barrage se situe un bassin amortisseur, conçu pour être le siège de la dissipation d'énergie. Un changement de régime de l'écoulement intervient alors dans le dissipateur : à son entrée, le régime est torrentiel, à sa sortie il est fluvial ; cette transition s'appelle ressaut hydraulique. Pour contrôler et stabiliser la position dans le bassin, la disposition d'un seuil en travers de l'écoulement est souhaitable.

Le ressaut hydraulique a fait l'objet de nombreuses études, aussi bien théoriques qu'expérimentales. C'est surtout le canal rectangulaire qui a attiré l'attention de nombreux chercheurs, en raison sans doute de sa simplicité géométrique et de la facilité de sa mise en œuvre. L'expérimentation a montré qu'en règle générale, le ressaut est bien régi par l'équation de la quantité de mouvement quelque soit la forme du canal considéré. Cette équation a pour but de déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique évoluant dans des profils prismatiques tel que le canal rectangulaire.

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse **Forster et Skinde (1950); Achour (1997)**, continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative **Hager et Sinniger (1985)**. Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau aval, de

contrôler sa position lors des changements des paramètres de l'écoulement et contribuent enfin à une meilleure compacité du bassin amortisseur **Bretz (1987); Hager et Li (1992)**.

Récemment plusieurs chercheurs ont abordé la question du ressaut hydraulique d'un point de vue théorique et appliqué, les plus importants et les plus récents d'entre eux sont certainement **Hager et Sinniger (1990), Hager et Bretz (1987)** et **Rajaratnam (2002)** qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal, **Hager et Wanoschek (1987), Achour et Debabeche (2003)** et **Debabeche et Achour (2007)** dont les travaux sont relatifs au ressaut triangulaire horizontal. Par ailleurs, (**Rajaratnam, 1966; Mc Corcodal, 1994; Pagliara. S. et Peruginelli, 2000 ; Beiram et Chamani, 2006...**) ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné

Pratiquement, on a besoin de déterminer les dimensions du bassin dissipateur pour donner une bonne configuration à ce dernier qui doit répondre aux exigences de l'écoulement. Ces dimensions sont liées physiquement aux caractéristiques du ressaut et à la forme géométrique de la section du canal dans lequel il évolue.

Toutes les études sont effectuées dans le domaine du ressaut hydraulique, pour aboutir à une meilleure configuration du bassin d'amortissement, tel que : la forme géométrique et le type d'obstacles, qui servent dans la plus part des cas à dissiper une grande partie de l'énergie cinétique dans le bassin. Donc, le choix de tel ou tel type se fait à la base des études expérimentales effectuées au laboratoire.

Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier expérimentalement le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique.

Notre présent mémoire comporte deux parties :

- ❖ La première partie est divisée en deux chapitres :
 - Le premier chapitre consiste à passer en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique en canal rectangulaire, nous étudierons la classification effectuée par **Bradley et Peterka (1957)**. Nous citerons aussi les travaux de **Hager et Sinniger (1986)**, **Hager et al.(1990)** et ceux de **Forster et Skrinde (1950)** en deuxième lieu, nous examinerons les travaux les plus récents de **Debabeche (2003)** qui seront l'objet de base de notre étude bibliographique, sur le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, évoluant dans un canal rectangulaire.
 - Le deuxième chapitre concerne le ressaut hydraulique évoluant dans le canal de forme trapézoïdale autrement dit non rectangulaire. Ce chapitre sera divisé en deux sous chapitres. Le premier concerne le ressaut dans le canal trapézoïdal symétrique dont on exposera les travaux de **Hager et Wanocek (1989)** relatives à ce type de ressaut. Dans le deuxième sou-chapitre le ressaut hydraulique évoluant dans le canal trapézoïdal asymétrique sera exposé à travers les travaux de **José Vasquez Diaz(1954)**.

La deuxième partie de ce mémoire concerne notre étude expérimentale sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique. Notre objectif sera de d'étudier expérimentalement le rendement du ressaut.

PREMIERE PARTIE

ETAT DES CONNAISSANCES

SUR LE

RESSAUTHYDRAULIQUE

Introduction à la partie bibliographique

Cette première partie consiste à passer en revue sur les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique. Ce phénomène hydraulique, a été l'objet de recherche de plusieurs hydrauliciens, étrangers et locaux. Ces chercheurs ont abouti à des résultats fiables, basés sur des essais effectués aux laboratoires, et ceci pour obtenir une parfaite structure des bassins d'amortissements.

Pour organiser notre travail, nous avons divisé la première partie en deux chapitres essentiels :

- ✚ Le premier chapitre est consacré à citer l'évaluation dans le temps du ressaut hydraulique. En premier lieu, nous avons abordé le ressaut hydraulique classique, évoluant en canal de section droite rectangulaire, de pente faible ou nul, et nous avons présenté l'équation de **Bélanger (1828)**, qui donne la relation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident. Ainsi les travaux de **Hager et al (1990)** et ceux de **Hager et Sinniger (1986)** font l'objet de la détermination des caractéristiques géométriques du ressaut.
- ✚ Le deuxième sou-chapitre concerné le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince et les travaux de **Forster et Skrinde (1950)**.
- ✚ Le deuxième chapitre concerne le ressaut hydraulique évoluant dans le canal trapézoïdal symétrique et asymétrique.

Chapitre I

Le Ressaut Hydraulique

En Canal Rectangulaire

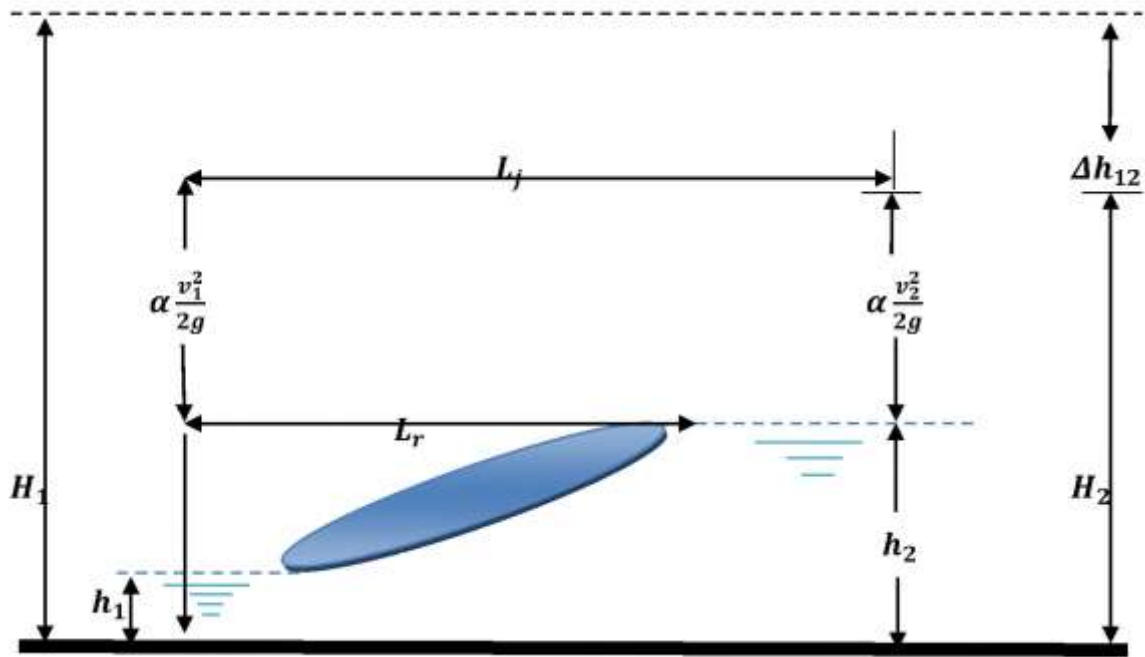
I. Introduction :

Le ressaut hydraulique a fait l'objet de nombreuses études, aussi bien théoriques qu'expérimentales. C'est surtout le canal rectangulaire qui a attiré l'attention de nombreux chercheurs, en raison sans doute de sa simplicité géométrique et de la facilité de sa mise en œuvre. L'expérimentation a montré qu'en règle générale, le ressaut est bien régi par l'équation de la quantité de mouvement quelque soit la forme du canal considéré. Cette équation a pour but de déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique évoluant dans des profils prismatiques tel que le canal rectangulaire.

I.1.Définition :

Le ressaut hydraulique désigne le passage de l'écoulement torrentiel (ou supercritique) à l'écoulement fluvial (sub-critique). Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur L_r appelée longueur du rouleau.

Il est accompagné d'une agitation marquée et de grandes pertes d'énergie (figure 1)



Figure(1) : ressaut hydraulique avec les principales notations

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

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ces sections initiales et finales à la charge totale dans sa section initiale. L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un coefficient cinétique (ou nombre de Froude $Fr > 1$) et représente la relation entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation des petites perturbations

1.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE :

Les études préliminaires dans ce domaine sont effectuées sur le modèle du ressaut classique, ce type du ressaut hydraulique se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nul ou faible.

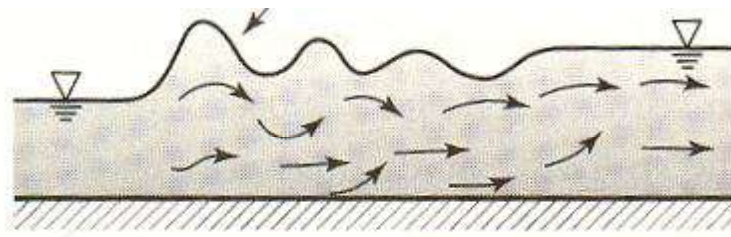
Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse, continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative. Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau à l'aval, de contrôler sa position lors de changement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

1.2.1. Classification du ressaut classique :

La classification du ressaut classique est basée sur la variation du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut.

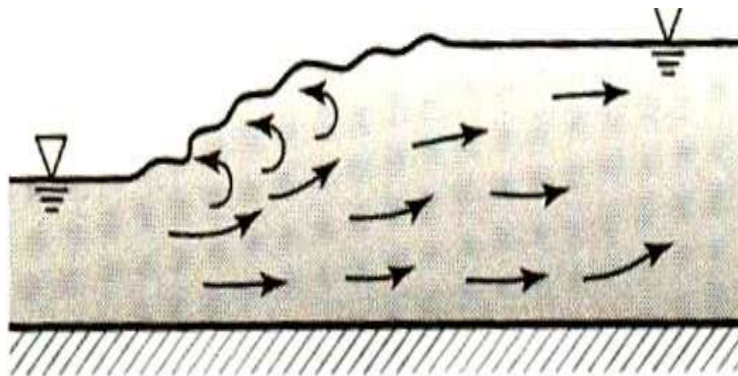
Pour les valeurs de $F_1 \leq 1$, le régime est lent, ou critique, et il n'y a pas de ressaut. Pour des valeurs de nombre de Froude comprise entre 1 et 1.7 et cela d'après Andersen (1978), la différence des profondeurs conjuguées en amont et en aval est très faible, et le ressaut est caractérisé par de légères rides à la surface libre, aspect qui diffère peu de celui que l'on observe dans le régime critique, c'est le ressaut ondulé (figure 1.1).

Surface ondulé

**Figure (1.1) :** Ressaut ondulé

Bradley et Peterka (1957) ont classifié le ressaut classique sous quatre formes différentes :

A- LE PRE-RESSAUT : obtenu pour la gamme $1,7 < F_1 < 2,5$ (figure 1.1.A) : La surface du ressaut est composée d'une série de petits rouleaux pour $F_1 = 1,7$; ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible.

**Figure (1.1.A) :** Le pré-ressaut

B- LE RESSAUT DE TRANSITION ; obtenu pour la gamme $2,5 < F_1 < 4,5$ (figure 1.1, B) Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

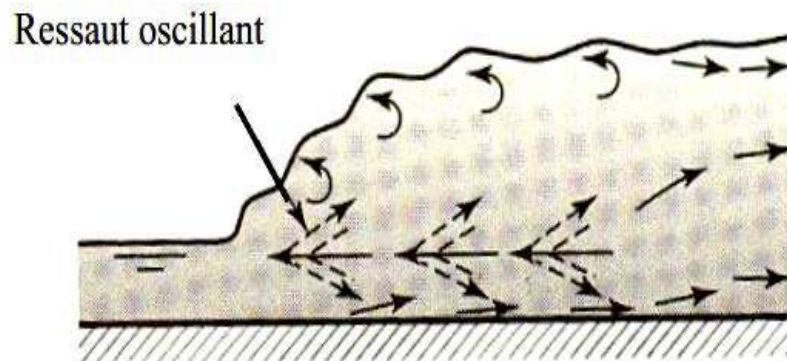


Figure (1.1.B) : Le ressaut de transition

C- LE RESSAUT STABLE : obtenu pour la gamme $4,5 < F_1 < 9$ (figure 1.1.C) C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans les bassins de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

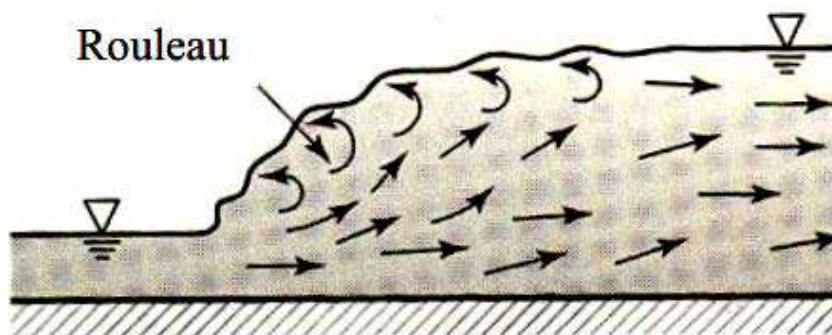


Figure (1.1.C) : Le ressaut stable

D- LE RESSAUT AGITE OU CLAPOTEUX : obtenu pour $F1 > 9$ (figure 1.1, d) : Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très élevée. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.

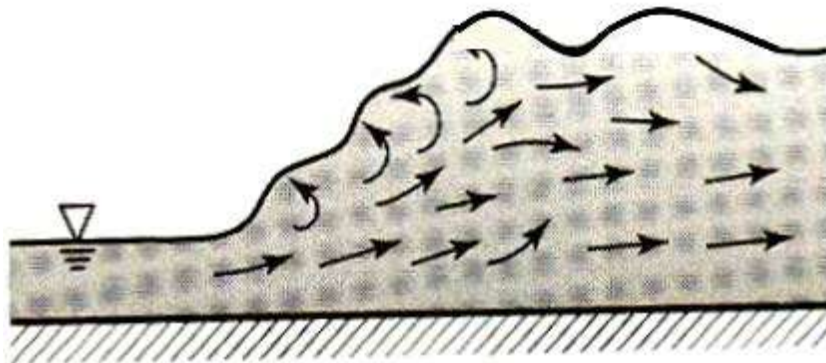


Figure (1.1.d) : Le ressaut clapoteux

I.3.Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :

On ne peut pas appliquer le théorème de **Bernoulli** entre les sections 1 et 2 pour , qui $12\Delta H$ déterminer les profondeurs conjuguées du ressaut, étant donné que le terme représente la perte de charge, n'est pas connu et que les formules du régime uniforme ne sont pas applicables. C'est le théorème **d'Euler** qui permet de résoudre ce problème. Considérons un ressaut classique évoluant entre la section initiale et finale respectivement 1 et 2 (figure1.3)

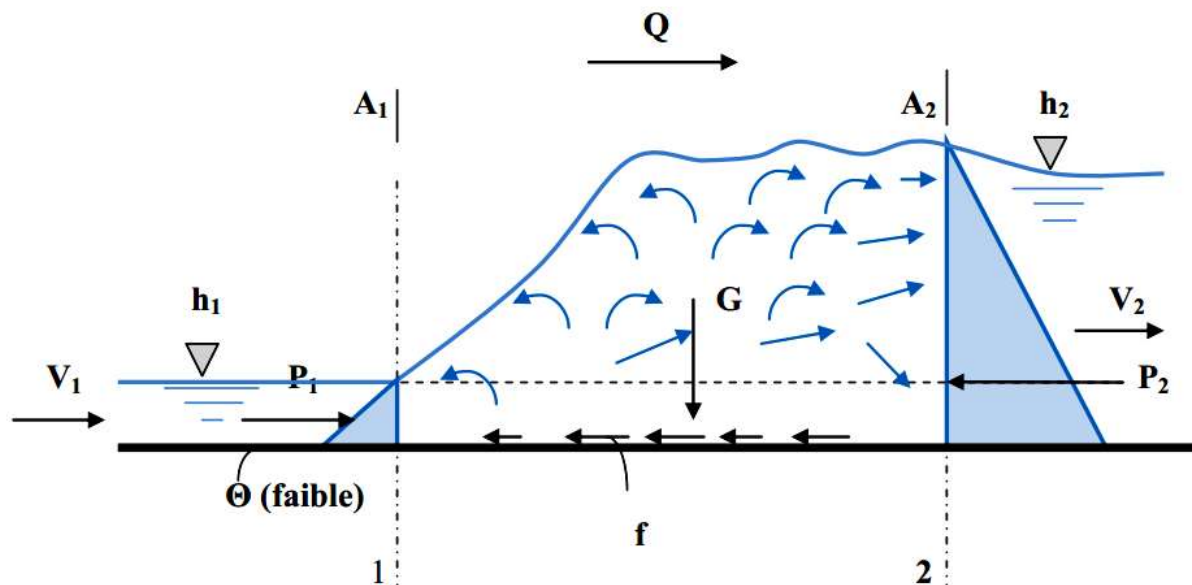


Figure (1.2) : Représentation des forces agissantes sur le ressaut

L'équation de continuité permet d'écrire :

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

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

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

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

- La répartition des pressions dans les sections (A_1) et (A_2) est hydrostatique.

- Les frottements sur les parois et le fond du canal le long de la faible distance séparant (A1) et (A2) sont négligeables par rapport à la perte de charge due à la turbulence créée par le ressaut.
- Les vitesses des différents filets liquides dans chacune des sections (A1) et (A2) sont parallèles à la vitesse moyenne V , et considérées uniformes.
- La résistance de l'air est négligeable.

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

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

Où :

β : facteur de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité.

Puisque la répartition des vitesses est supposée uniforme.

ρ : la masse volumique du liquide en mouvement.

Q : débit volume.

V : vitesse d'écoulement.

g : accélération de la pesanteur.

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

P_1 et P_2 : forces des pressions hydrostatiques.

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

f : force de frottement (considérée comme négligeable).

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

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

Le nombre de *Froude* F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut évoluant dans un canal rectangulaire s'écrit :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{(gb^2h_1^3)} \tag{1.4}$$

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

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} [\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1] \tag{1.5}$$

Et en fin on a abouti à l'équation de *Bélanger (1828)*, liant le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut au nombre de *Froude* F_1 , en réalité c'est une équation d'une droite représentée par la figure (1.4).

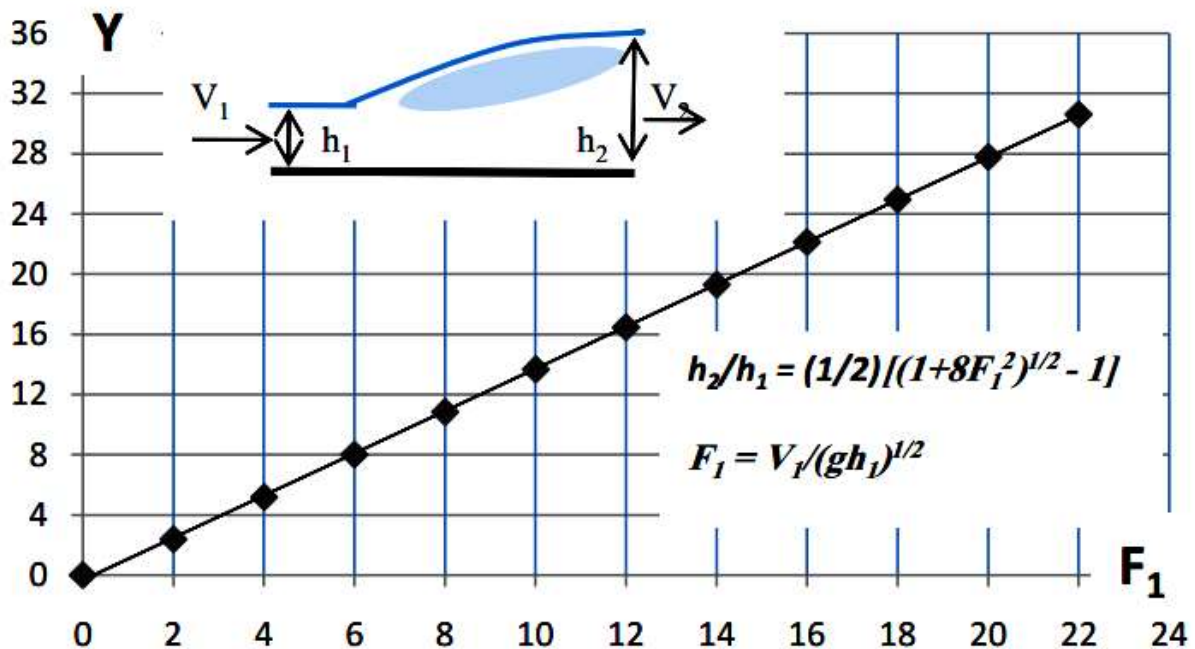


Figure (1.3) : Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828)

Hager et Sinniger (1986), ont donné une relation plus simple que la relation (1.6), et applicable pour un nombre de Froude $F1 > 3$.

$$Y = h_2 / h_1 = \sqrt{2} \cdot F_1^{-\frac{1}{2}} \quad (1.6)$$

1. 4. Caractéristiques géométriques du ressaut :

Les caractéristiques géométriques du ressaut sont définies ci-dessus, hauteur du ressaut **h**, **Lr** et **Lj** ces dernières sont très difficiles à déterminer. En effet, il est généralement délicat de définir la fin du ressaut. Dans ce cas les auteurs ont employé la voie expérimentale pour évaluer ces grandeurs.

1.4.1. Hauteurs du ressaut :

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

$$h = h_2 - h_1 \quad (1.7)$$

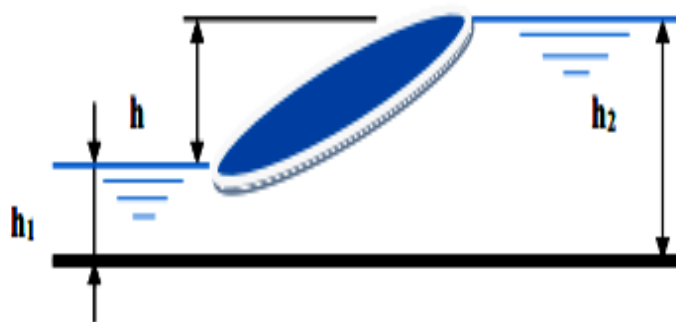


Figure (1.4) : Hauteur du ressaut

1.4.2. Longueur du rouleau :

En 1990 Hager et al définissent deux types de longueur du rouleau tous dépendent de forme du ressaut étudié. En effet, ils ont introduit la notion de longueur du rouleau développé et non développé. La figure (1.4) illustre ces deux types du ressaut et les longueurs L_r qui correspondent.

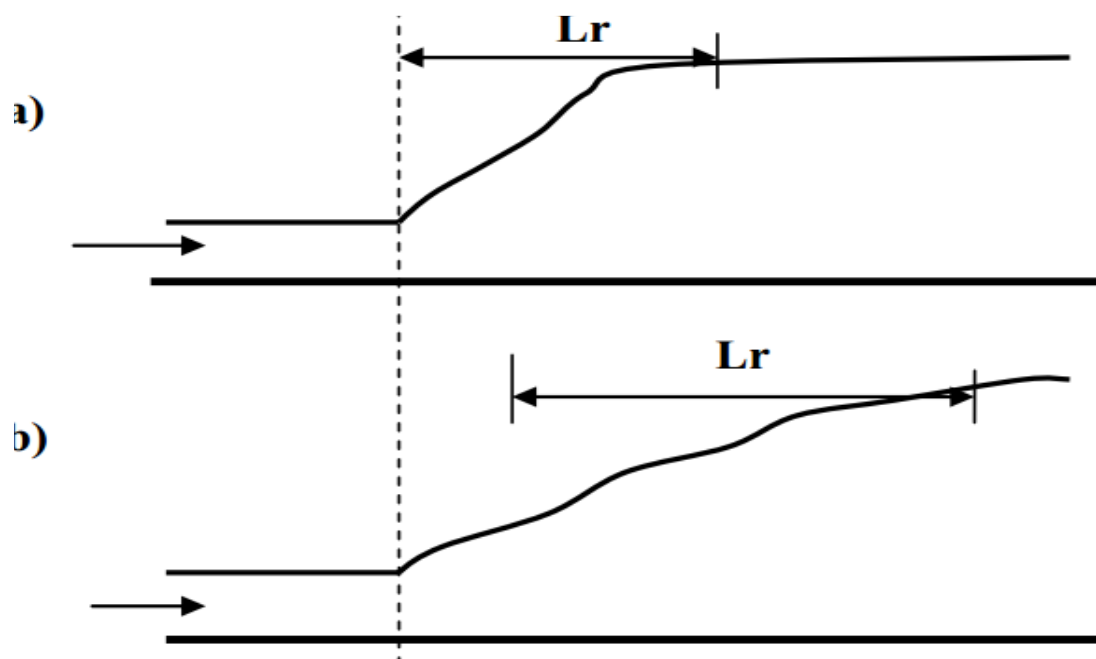


Figure (1.5): Aspect du ressaut classique

a) Rouleau développé b) Rouleau non développé

La forme générale du rouleau développé est presque uniforme (figure 1.5.a). Par contre le rouleau non développé présenté par une surface libre perturbée sous l'effet des vagues qui se forment à l'aval (figure 1.5.b). De même le jet joignant la section initiale, se dirige vers la surface libre. Ce phénomène forme une turbulence au fond, est produite par l'effet de l'existence d'une zone de séparation au niveau de la masse liquide en mouvement.

Hager et al. (1990) et à la base des résultats expérimentaux ont proposé les relations ci-dessous qui montrent que, pour le ressaut classique, le rapport $\lambda_r = L_r/h_1$ est lié au nombre de Froude F_1 et au rapport d'aspect.

$$W = h_1/b$$

$$\lambda_r = -120 + 160. \operatorname{Tgh} \left(\frac{f_1}{20} \right) \quad \text{pour} \quad W = \left(\frac{h_1}{b} \right) < 0.1 \quad (1.8)$$

$$\lambda_r = -120 + 100. \operatorname{Tgh} \left(\frac{f_1}{12.5} \right) \quad \text{pour} \quad 0.1 < W < 0.7 \quad (1.9)$$

{Tgh} désigne la tangente hyperbolique.

Les auteurs notent que pour $F_1 < 8$, les relations (1.8) et (1.9) peuvent être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

$$\lambda_r = L_r / h_1 = 8. (F_1 - 1,5) \quad ; \quad 2,5 < F_1 < 8 \quad (1.10)$$

1.4.3. 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:

$$L_j / h_1 = 220. Tgh [(F_1 - 1) / 22] \quad (1.11)$$

-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 $4 < F_1 < 12$.

$$L_j / h_2 = 6 \quad (1.12)$$

1.4.4. Rendement du ressaut :

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

Par l'application du théorème de Bernoulli (1738) on peut déterminer la perte d'énergie ; $\Delta H_{12} = H_1 - H_2$ produite par le ressaut en admettant que $Z_1 = Z_2$ (canal horizontal), on obtient :

$$\Delta E_{12} = \Delta H_{12} = \left(\alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \right) - \left(\alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \right) \quad (1.13)$$

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

$$H_1 = \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \quad (1.14)$$

Et la charge totale dans la section aval est :

$$H_2 = \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \quad (1.15)$$

On désigne par : V_1 et V_2 les vitesses moyennes qui correspondent aux sections amont et aval du ressaut et le facteur de correction de l'énergie cinétique α est admis égale à l'unité

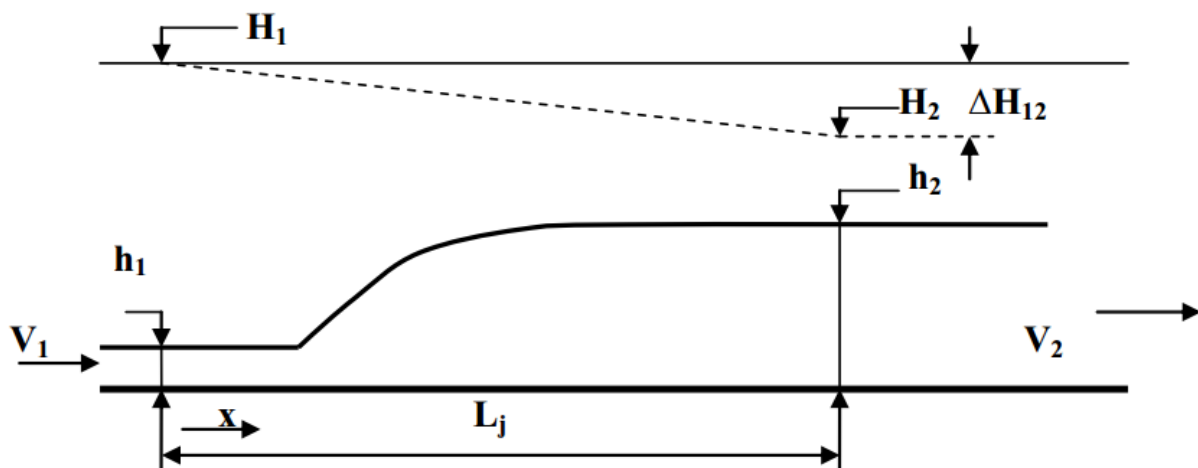


Figure (1.6): (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

Puisque l'écoulement est permanent l'équation de la quantité de mouvement nous donne :

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (1.16)$$

Où :

$$A_1 = b \cdot h_1$$

$$A_2 = b \cdot h_2$$

Donc on introduisant la relation (1.16) dans (1.13) on obtient, tous calculs faits, l'expression classique de la perte de charge due au ressaut en canal rectangulaire de pente faible ou nul.

$$\Delta H_{12} = (h_1 - h_2) + \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) \cdot \left(\frac{q^2}{2g} \right) \quad (1.17)$$

$q = \frac{Q}{b}$ est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'expression de la quantité de mouvement définie par la relation :

$$\frac{1}{2} \bar{\omega} b h_1^2 + \rho Q V_1 = \frac{1}{2} \bar{\omega} b h_2^2 + \rho Q V_2 \quad (1.18)$$

$$\frac{q^2}{2g} = (h_1 \cdot h_1^2 + h_1^2 \cdot h_2) / 4 \quad (1.19)$$

On remplaçant la relation (1.19) dans (1.17) on obtient :

$$\Delta H_{12} = (h_2 - h_1)^2 / (4h_2 \cdot h_1) \quad (1.20)$$

Donc à partir de la relation (1.15) on peut conclure la perte de charge due au ressaut classique et ne dépend que des hauteurs conjuguées. La capacité de dissipation du ressaut est représentée par η :

$$\eta = \frac{\Delta H_{12}}{H_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (1.21)$$

Le rapport $\frac{h_2}{h_1}$ est appelé efficacité du ressaut. Donc pour déterminer les charges totales dans les sections amont et aval on utilise les relations (1.14) et (1.15) et en tenant compte de la relation (1.6) du nombre de Froude on obtiendra :

$$H_1 = h_1 \cdot \left[1 + \frac{F_1^2}{2} \right] \quad (1.22)$$

$$H_2 = h_1 \cdot \left[Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right] \quad (1.23)$$

Où Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par la relation (1.7) de Bélanger (1828).

En remplaçant (1.22) et (1.23) dans l'expression du rendement du ressaut (1.21) on obtiendra :

$$\eta = 1 - \left[\frac{Y + F_1^2}{2Y^2} \right] / \left(1 + \frac{F_1^2}{2} \right) \quad (1.24)$$

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

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2 \quad (1.25)$$

Les relations (1.24) et (1.25) sont représentées graphiquement sur un système des coordonnées cartésiennes, illustrés par la figure (1.7).

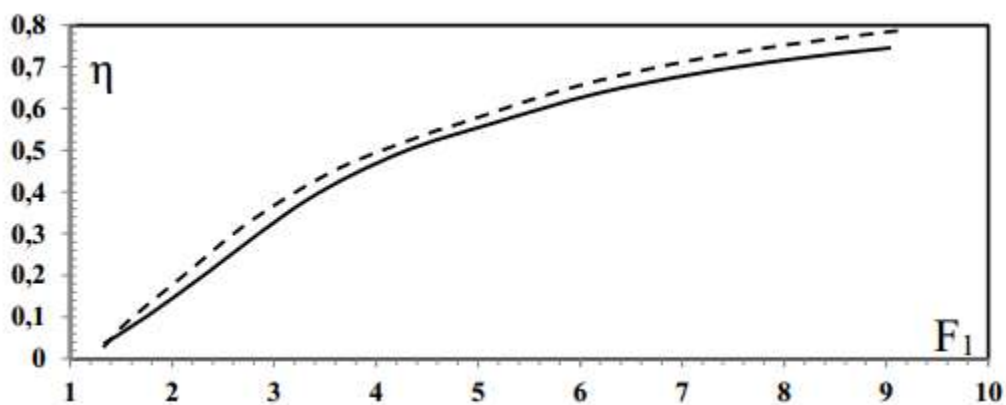


Figure (1.7) : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude Fr_1
 (—) Courbe tracée selon la relation (1.19), (-----) courbe tracée Selon la relation (1.20)

D'après l'analyse de la courbe $\eta = f(\text{Fr}1)$ nous constatons que le rendement η du ressaut classique est supérieur à 50 % pour une valeur de nombre de Froude $\text{Fr}1 \geq 5.1$ et que les rendements calculés par l'application de la relation (1.25) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.24) d'autre par; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

1.5. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire :

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

L'analyse dimensionnelle montre que la relation liant :

- le nombre de Froude $F1$ de l'écoulement incident.
- la hauteur géométrique s du seuil.
- la hauteur initiale $h1$ du ressaut.
- la hauteur $h2$ à l'amont immédiat du seuil.
- la position X du seuil comptée à partir du pied du ressaut.
- la profondeur $h3$ de l'écoulement à l'aval du seuil.

1.5.1. Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince :

(Approche de Forster et Skrinde (1950)) :

1.5.1.1- Seuil continu à paroi mince :

En admettant une répartition hydrostatique des pressions et une distribution uniforme des vitesses dans les sections de part et d'autre du ressaut, **Forster** et **Skrinde** (1950) ont aboutis à un diagramme, liant les trois paramètres adimensionnels suivants :

- le nombre de *Froude* F_1 de l'écoulement incident.
- la position relative du seuil x / h_2 .
- la hauteur relative du seuil s / h_1 .

L'étude expérimentale de **Forster** et **Skrinde** (1950) vise à définir la variation de la hauteur relative s / h_1 du seuil en fonction du nombre de *Froude* Fr_1 de l'écoulement incident, pour des valeurs données de la position x / h_2 du seuil.

Pour chaque essai effectué, le rapport x / h_2 est maintenu tout en assurant la formation complète du ressaut. La longueur du bassin amortisseur est à la limite égale à la position x du seuil comptée à partir du ressaut (figure 1.8).

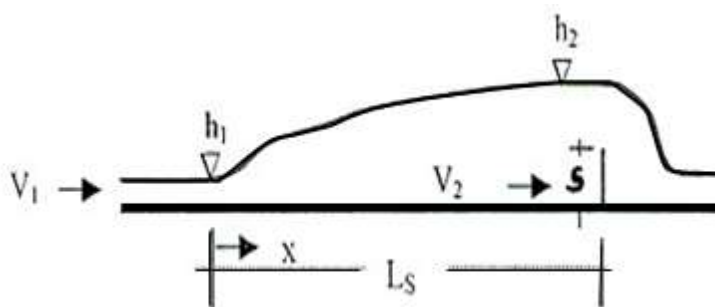


Figure (1.8): Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince

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

$$h_3 < h_2 - 0,75.s \tag{1.26}$$

La figure (1. 9) montre la variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les valeurs 3, 5 et 10 de la position relative X/h_2 du seuil.

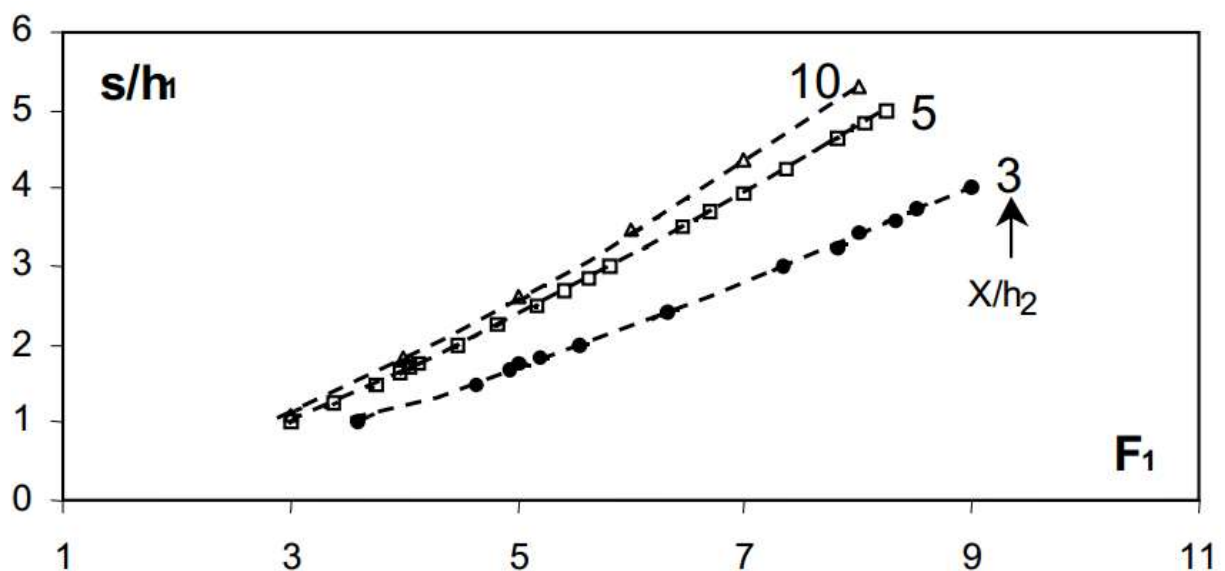


Figure (1.9): Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative X/h_2 du seuil (Forster et Skinde, (1950).

La figure (1.9) montre que trois courbes sont alors déterminées pour des valeurs 3,5 et 10 de x/h_2 . On peut constater que pour l'ensemble des valeurs du nombre de Froude Fr_1 , les courbes expérimentales obtenues se rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que x/h_2 augmente et pour x/h_2 compris entre 5 et 10, la hauteur relative s/h_1 du seuil ne subit pas des grandes variations. Pratiquement, on considère que la position relative x/h_2 du seuil est approximativement égale à 6.

1.5.1.2- Seuil continu à paroi épaisse :

Le seuil est considéré comme épais lorsque le profil liquide s'y écoulant est presque parallèle au fond, pour peu que la longueur L du seuil soit suffisante (figure 1.10). La notion de seuil épais est également liée aux caractéristiques de l'écoulement et suivant la classification de Rao et Murlidhar (1963), le seuil est considéré comme étant épais lorsque :

$$0,1 \leq (h_2 - s) / L \leq 0,35 \tag{1.27}$$

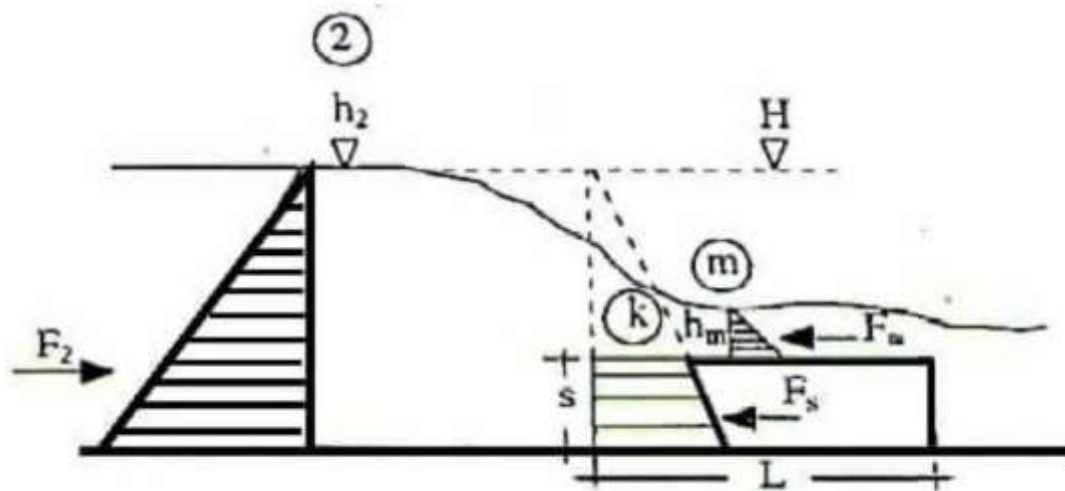


Figure (1.10) : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L . Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.

Dans la section 2, l'écoulement est en régime fluvial de profondeur h_2 . Le seuil est en suite franchi par un écoulement en régime critique de profondeur K , suivi d'une tranche en régime torrentielle dont la profondeur finale hm est minimale (section m).

1.6. Conclusion du premier chapitre :

Dans ce chapitre, nous avons passé, en revue les principaux travaux effectués dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire (ressaut hydraulique classique).

Nous avons présenté les différentes formes du ressaut, selon la classification de **Bradley et Peterka (1957)**, qui dépendent de la variation du nombre de Froude Fr_1 , à l'amont du ressaut.

D'après cette étude, nous avons remarqué que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement, afin de définir la relation reliant le rapport Y des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude Fr_1 . **Bélanger (1828)**, a fait le premier pas sur cet objectif et a déterminé cette relation, par l'application du théorème d'Euler, entre les deux sections du ressaut. L'équation de la droite $Y = f(Fr_1)$ obtenue par **Bélanger (1828)** est représentée par la (figure 1.5).

Quand on a abordé les travaux de **Hager et al (1990)**, nous avons constaté que les caractéristiques géométriques du ressaut, ne sont déterminées, que par la voie expérimentale, et que plusieurs formules ont été proposées, par différents chercheurs.

A la fin de ce chapitre, nous avons examiné, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, et nous avons cité les travaux de **Forster et Skrinde (1950)** concernant le seuil à paroi mince. Les auteurs ont défini, en premier lieu, la variation de la hauteur relative $S = s/h_3$ du seuil en fonction du nombre de Froude Fr_1 et pour des valeurs données de x/h_2 . En deuxième lieu, ils ont établi trois courbes à la base des données expérimentales, ils ont constaté que les trois courbes se rapprochent, lorsque la valeur de x/h_2 augmente.

Chapitre II

Le Ressaut Hydraulique Dans Un Canal Trapézoïdal

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons citer quelques travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal. Nous citerons particulièrement ceux effectués par *Silvester (1964)*, *Wanoschek et Hager (1989)* sur le ressaut classique.

Ces auteurs ont notamment contribué à définir la longueur du ressaut et l'ont exprimé sous la forme adimensionnelle tel que :

$$\frac{L_j}{(h_2 - h_1)} = 0,7 \cdot (1 + 10M) \quad (2.1)$$

Avec : $M = \frac{m \cdot h_1}{b}$ où m est la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal, b la base du trapèze et h_1 , h_2 sont respectivement la hauteur initiale et finale du ressaut ; Le paramètre adimensionnel M représente en fait, la hauteur relative initiale du ressaut.

La relation de *Silvester (1964)* montre clairement que, la longueur du ressaut est d'autant plus grande que M tend vers l'infini. Les valeurs croissantes de M indiquent un profil trapézoïdal géométriquement rétréci à la base en tendant vers le profil triangulaire ($b \rightarrow 0$). Par contre, les valeurs décroissantes de M aboutissent à des profils trapézoïdaux d'autant plus refermés vers le haut en tendant vers le profil rectangulaire ($M \rightarrow \infty$). Ces considérations laissent penser que le ressaut en canal triangulaire devrait s'étendre sur une longueur beaucoup plus grande que son homologue du rectangulaire.

Plus récemment, *Wanoschek et Hager (1989)* ont décrit d'une manière détaillée le

comportement du ressaut, dans un canal trapézoïdal, d'angle d'inclinaison de 45° ($m = 1$) et pour des valeurs de $M \leq 0,4$. Les observations ont révélé l'existence d'un rouleau du fond, jusqu'alors jamais détecté, et dont les caractéristiques géométriques, telles que la longueur à la base, la hauteur ainsi que la position sont définies.

Les essais ont montré que la longueur relative L_j / h_2 du ressaut dépend à la fois de la valeur du nombre de Froude FI et de la valeur de la hauteur relative initiale M : les courbes de la variation de L_j / h_2 , obtenues pour $0,1 \leq M \leq 0,4$, issues des essais de *Peterka* pour le ressaut en canal de section droite triangulaire.

Les auteurs ont montré que le ressaut dans le canal trapézoïdal testé devrait être plus long et asymétrique au-delà d'une valeur limite du nombre de Froude FIL , tout dépendant de la hauteur relative initiale M .

De même pour la longueur caractéristique du ressaut, nous allons aborder à travers ce chapitre un autre paramètre caractéristique du ressaut ; ce paramètre est le rapport des hauteurs conjuguées Y , obtenu par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut.

II.2. Caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal :

Le ressaut hydraulique, comme dissipateur d'énergie, est couramment utilisé dans les bassins d'amortissement. Les sections transversales de ces bassins prennent souvent une forme rectangulaire, alors que de point de vue pratique le canal trapézoïdal représente un cas particulière intéressant.

II.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées :

L'équation de la quantité de mouvement appliquée aux sections initiales et finales d'un ressaut se produisent dans un canal horizontal de section droite trapézoïdale, pour lequel :

$$\rho Q^2 / A_2 - \rho Q^2 / A_1 = F_1 - F_2 \quad (2.2)$$

Où :

- Q est le débit volume
- ρ est la masse volumique du liquide.
- A1 et A2 sont respectivement, l'aire de la section au pied et à la fin du ressaut.

$$A_1 = b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2 \quad (2.3)$$

$$A_2 = b \cdot h_2 + m \cdot h_2^2 \quad (2.4)$$

Où : $m = \text{Co tang}(\theta)$

-Les centres de gravité des sections initiales et finales sont :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6} \cdot \left(\frac{3b+2mh_1}{A_1} \right) \quad (2.5)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6} \cdot \left(\frac{3b+2mh_2}{A_2} \right) \quad (2.6)$$

-Les forces de pressions des sections initiales et finales sont :

$$p_1 = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_1 \cdot A_1 \quad (2.7)$$

$$p_2 = \bar{\omega} \cdot \bar{h}_2 \cdot A_2 \quad (2.8)$$

F1 et F2 sont, les forces de pression hydrostatiques au début et à la fin du ressaut. Ces forces de pressions hydrostatiques correspondent au volume de l'épure de pression.

Ainsi :

$$F_1 = \bar{\omega} \left(\frac{bh^2_1}{2} + \frac{mh^3_1}{3} \right) \quad (2.9)$$

$$F_2 = \bar{\omega} \left(\frac{bh^2_2}{2} + \frac{mh^3_2}{3} \right) \quad (2.10)$$

L'injection des équations (2.3) ; (2.4) et (2.9) ; (2.10) dans l'équation (2.2) aboutit à l'équation (2.11), qui suit :

$$\frac{Q^2}{g(bh_1+mh^2_1)} + \frac{bh^2_1}{2} + \frac{mh^3_1}{3} = \frac{Q^2}{g(bh_2+mh^2_2)} + \frac{bh^2_2}{2} + \frac{mh^3_2}{3} \quad (2.11)$$

Le nombre de Froude F_1 au pied du ressaut en canal trapézoïdal caractérisant l'écoulement dans la section initiale du ressaut est tel que :

$$F^2_1 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh^2_1)} \quad (2.12)$$

D'après l'équation de la quantité de mouvement appliquée aux sections initiales et finales d'un ressaut se produisant dans un canal horizontal de section droite trapézoïdale nous avons obtenons la relation (2.12).

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

$$2F_1 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)_2} \left[Y_2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (2.13)$$

Tels que :

- $Y = \frac{h_2}{h_1}$
- $M = \frac{m h_1}{b}$

La relation (2.12) exprime ainsi, dans le cas d'un canal trapézoïdal, la variation du nombre de Froude à l'amont du ressaut en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées et de la hauteur relative M.

L'équation (2.12) à cinq variables est réduite à trois variables (F^2_1 , M, Y).

Les éléments connus sont Q, h₁, b et m qui forment la relation (2.11), avec $M = \frac{m h_1}{b}$

L'élément inconnu est h₂ = ?

Connaissant F^2_1 et M on peut tirer à partir du graphique, le rapport $Y = \frac{h_2}{h_1}$

D'où :

$$h_2 = Y \cdot h_1$$

II.2.1.1. Cas particulier du canal rectangulaire :

Pour obtenir la fonction Y(F₁) pour le cas du ressaut hydraulique évaluant en canal rectangulaire, il suffit d'annuler dans l'équation (2.12) m et M (m=0 et M=0).

L'équation (2.12)

Devient :

$$F^2_1 \left(1 - \frac{1}{Y}\right) = \frac{Y^2}{2} - 1$$

Ou encore :

$$F^2_1 = \frac{Y(Y+1)}{2} \tag{2.14}$$

Et F^2_1 devient :

$$F^2_1 = \frac{Q^2 b}{g(bh_1)^3}$$

Éléments connus: Q , b , h_1 donne F_1

Éléments inconnus: $h_2 = ?$

L'équation (1.14) conduit à la relation.

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} [\sqrt{1 + 8F^2_1} - 1]$$

C'est l'équation de Bélanger (1828), cette équation traduit un ressaut classique sans obstacle en aval.

Elle a été reprise par Hager (1988) :

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

Hager a vérifié expérimentalement que pour des ressauts où $F_1 > 3$

$$\sqrt{1 + 8F_1} \approx \sqrt{8F_1}$$

d'où la relation :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2} \quad (2.15)$$

II.2.1.2. Cas particulier du canal triangulaire :

En remplaçant dans l'équation (2.12) : $b = 0$ et $\frac{1}{M} = 0$ ($M \rightarrow \infty$), l'équation (2.13)

Donne :

$$F^2_1 = \frac{2Y^2(Y^2+Y+1)}{3(Y+1)} \quad (2.16)$$

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

$$Y = \left(\frac{3}{2} F^2_1 - 1\right)^{1/3} \quad (2.17)$$

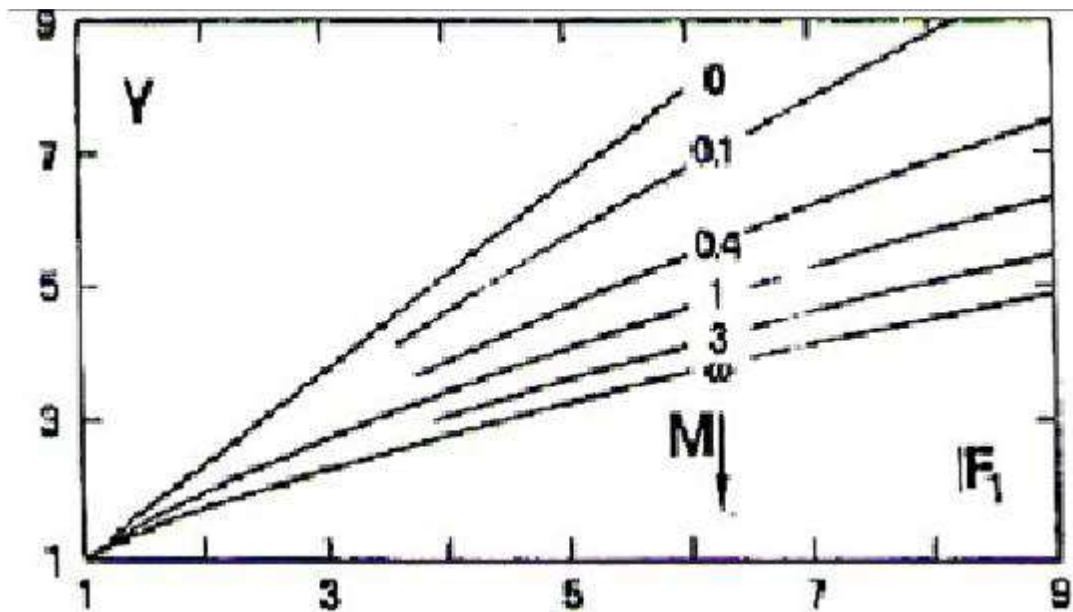


Figure (2.1) : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M .
 $M \rightarrow 0$: profil rectangulaire. $0 < M < \infty$: profils trapézoïdaux.

La figure (2.1) montre clairement que la plus faible valeur du rapport Y des

Hauteurs conjuguées du ressaut est obtenue dans le cas du profil triangulaire, pour une même valeur du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident.

II.2.2. Longueurs du ressaut :

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

La longueur du ressaut hydraulique en canaux trapézoïdaux mesurée le long de l'axe du canal est trouvée moins détachée que celle en canal rectangulaire.

Posey et Hsing (1938) ont exprimé la longueur relative $\lambda_j = \frac{L_j}{h_2}$ par la relation :

$$\lambda_j = \frac{L_j}{h_2} = 5 \left[1 + 4 \left(\frac{w_2 + w_1}{w_1} \right)^{1/2} \right] \quad (2.18)$$

Où :

$$W = b + 2mh \quad \text{avec} \quad w : \text{largeur de la surface d'eau.}$$

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

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

$$\frac{L_j}{(h_2 - h_1)} = 7.1(1 + 10M)$$

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

$$\text{Log}_{10} \left(\frac{L_j}{\Delta h} \right) = 1,71\xi + 0,315m + 1,58$$

Où :

- $\xi = \frac{\Delta H}{H_i}$: la perte d'énergie relative à travers le ressaut.
- ΔH : la perte d'énergie du ressaut.
- H_i : la charge totale d'eau.

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

- L_u : distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau du fond.
- L_b : longueur du rouleau du fond.
- h_b : hauteur maximale du rouleau du fond (Figure 2.2).

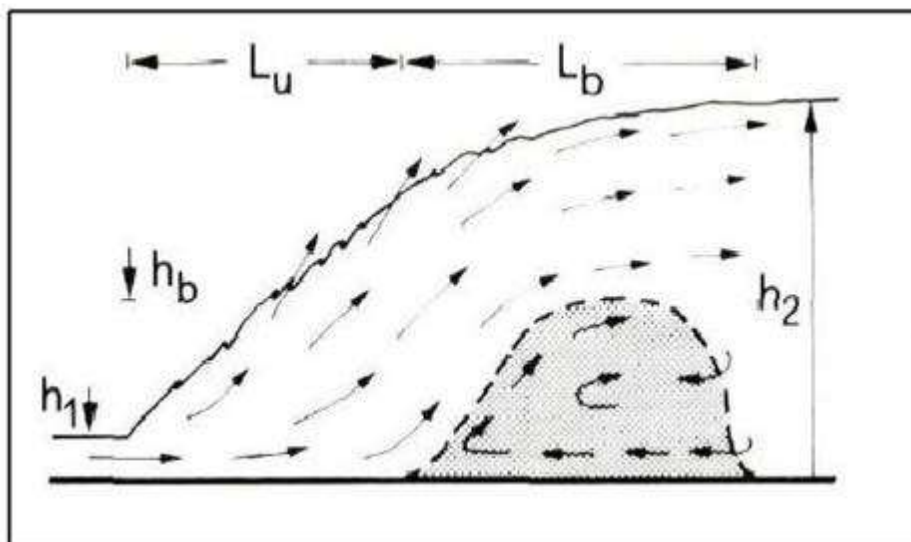


Figure (2.2) : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale

II.3. Rendement :

La perte de charge ΔH du ressaut est par définition la différence des charges initiale et finale :

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

La perte de charge relative est définie comme étant le rapport de la ΔH à la charge initiale H_1 :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} \quad (2.19)$$

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

$$H_1 = h_1 + \frac{\alpha_1 + Q^2}{2g A^2_1} \quad (2.20)$$

$$H_2 = h_2 + \frac{\alpha_2 + Q^2}{2g A^2_2} \quad (2.21)$$

Où :

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$$

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2$$

L'injection des expressions (2.3) (2.4) et (2.20) (2.21) dans l'équation (2.17) aboutit à l'équation (2.16), qui suit, exprimant le rendement du ressaut hydraulique en canal

trapézoïdale :

$$\eta = \frac{Y + \frac{F^2_1 (1+M)^3}{2Y^2(1+2M)(1+MY)^2}}{1 + \frac{F^2_1 (1+M)}{2(1+2M)}} \quad ; \quad 0 < \eta < 1 \quad (2.22)$$

Puisque, d'après l'équation (2.13), le rapport des hauteurs conjuguées Y est directement lié au nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident et au facteur de forme M , le rendement η ne dépend lui aussi, d'après l'équation (2.22), que de F_1 et de M .

Lorsque $M = 0$, la relation (2.22) mène à l'expression du rendement du ressaut évoluant dans un canal horizontal de section droite rectangulaire. Par contre, lorsque $1/M = 0$, la relation (2.3) conduit à l'expression du rendement du ressaut évoluant dans un canal de section droite triangulaire constante.

II.3.1 : Cas particulier du canal rectangulaire :

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

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F^2_1}{2Y^2}}{1 + \frac{F^2_1}{2}} \quad (2.23)$$

Sinniger (1985) a proposé une bonne approximation de l'équation (2.17) :

$$\eta = [1 - \sqrt{2}/F_1]^2 \quad ; \quad F_1 > 2,5$$

II.3.2. Cas du canal triangulaire :

Pour le cas du canal triangulaire on a : $\frac{1}{M} = 0$

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

Hager et Sinniger (1985) proposent la relation approchée suivante :

$$\eta = [(1 - \frac{12}{F_1^2})^{1/3}]^2 \quad ; \quad F_1 > 3 \quad (2.24)$$

La relation (1.22) est représentée sur la figure (2.3) et (2.4). La variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour différentes valeurs du facteur de forme M_1 , est illustrée. On voit bien sur la figure (1.3), que le rendement augmente aussi bien avec l'accroissement du facteur de forme M_1 qu'avec le nombre de Froude F_1 .

La courbe inférieure correspond à $M_1=0$, représentant la forme rectangulaire, et la courbe supérieure correspond à $M^{-1} = 0$, représentant la forme triangulaire.

Le ressaut en canal triangulaire dissipe donc plus d'énergie, suivi du canal Trapézoïdal de différentes valeurs de M_1 et en fin, le canal rectangulaire dissipant Moins d'énergie.

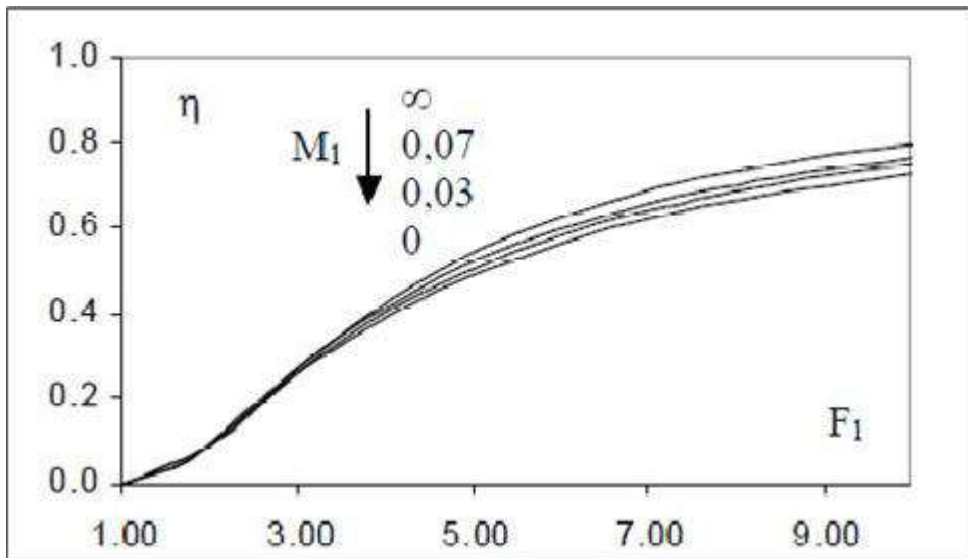


Figure (2.3) : Variation du rendement η du ressaut en canal trapézoïdal en fonction du nombre de Froude F_1 pour différentes valeurs de M_1 (Equation (2.22))

II.4. conclusion :

Dans ce deuxième chapitre on a présenté l'étude de Wanoschek et Hager (1989) sur le ressaut dénoyé dans un canal trapézoïdal, des relations seront données pour la quantification des longueurs caractéristiques du ressaut noyé se produisant dans canal rectangulaire et triangulaire ainsi que la longueur du ressaut dénoyé pour le canal trapézoïdal.

Le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal Asymétrique

II.2.2.1. Approche d'Alberto José et Rodriguez-Diaz, 1954 :

Dans cette approche, Alberto José et Rodriguez-Diaz ont étudié le ressaut dans un canal trapézoïdal dans lequel les parois latérales sont verticales, la surface de l'eau et le canal inférieur ne sont pas parallèles. La section non rectangulaire à étudier est présentée en coupe transversale dans la figure (2.4).

Cette étude a pour but de déterminer:

- 1- Les caractéristiques de la vague déferlante du ressaut hydraulique, dans un canal non rectangulaire particulier.
- 2- Le critère de l'existence du ressaut hydraulique de toute forme et distribution de vitesse.

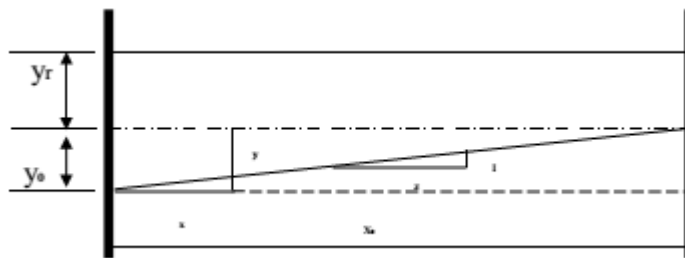


Figure (2.4): Section transversale du canal

X_0 : Largeur de la section transversale

Y_0 : Différence entre la profondeur de l'eau dans le fond et les cotés peu profonds.

Y_r : Profondeur de l'eau dans le côté peu profond

Y_{are} : Profondeur moyenne

X_s : Longueur du retour latéral sur le côté peu profond du canal

X_d : Longueur du retour latéral sur le côté profond du canal

V : Vitesse

Q : Débit

$P+M$: Force de pression + quantité de mouvement

G : Rapport de la force de pression et de l'écoulement amont et aval

$$\Psi = P + M / At \cdot \frac{y_0}{2}$$

$At = \frac{x_0 y_0}{2}$ Surface du triangle (Air d'apparition du ressaut)

$$\Phi = y_r / y_0$$

$$\theta = (Q / At)^2 / g y_0$$

F_1 = Nombre de Froude

γ : Poids spécifique de l'eau

φ : Densité de la masse

g : Accélération de la gravité

L'indice 1 est utilisé pour noter la section en amont du front d'onde, et 2 pour la section en aval du front d'onde. L'indice S signifie la bande.

II.2.2.2. Analyse de la section totale :

L'expression de la force de pression plus l'équation de quantité de mouvement d'écoulement dans la section est comme suit :

$$P+M= 12 \times 0 \gamma r^2 + 12 \times 0 \gamma (y_r + y_0/3) + \varphi Q^2 / x_0 \gamma r + (12 \times 0 \gamma y_0) \quad (2.25)$$

La forme adimensionnelle :

$$\Psi = \phi^2 + \phi + 1/3 + \Theta / (1+2\phi) \quad (2.26)$$

D'après l'équation de la quantité de mouvement, ψ_1 (amont) = ψ_2 (aval) :

$$\phi^2 + \phi + 1/3 + \Theta / (1+2\phi_1) = \phi^2 + \phi + 1/3 + \Theta / (1+2\phi_2) \quad (2.27)$$

D'après le développement de l'expression de Θ , d'après l'équation de continuité, on peut constater que Θ reste constante à l'amont et à l'aval du ressaut.

La solution de Φ_2 pour des valeurs données de Φ_1 et Θ a été réalisée graphiquement en traçant ψ par rapport à ϕ pour une valeur donnée de Θ .

Une série de courbes de ψ par rapport ϕ a été construite, chaque courbe représente une valeur différente de Θ .

D'après ces courbes, la valeur correcte de ψ peut être déterminée pour donner la valeur de ϕ et de Θ , puisque la valeur est la même pour les sections amont et aval.

II.2.2.2. Analyse de bande longitudinale (volume de contrôle) :

La somme de la force de pression et de la quantité de mouvement dans la bande de la section amont de l'onde n'est pas nécessairement la même qu'en aval, en raison de la possibilité de retour latéral de la quantité de mouvement du côté profond au côté peu profond du canal.

L'augmentation de la quantité de mouvement sur le côté profond du canal et également une diminution sur le côté peu profond. Cette condition exige que la quantité de mouvement doit être transférée latéralement à travers le canal. Si le retour latéral de la quantité de mouvement est très grand, le retour physique sera impossible. Les critères de l'existence du ressaut hydraulique sont basés sur l'ampleur (magnitude) du retour latéral de la quantité de mouvement.

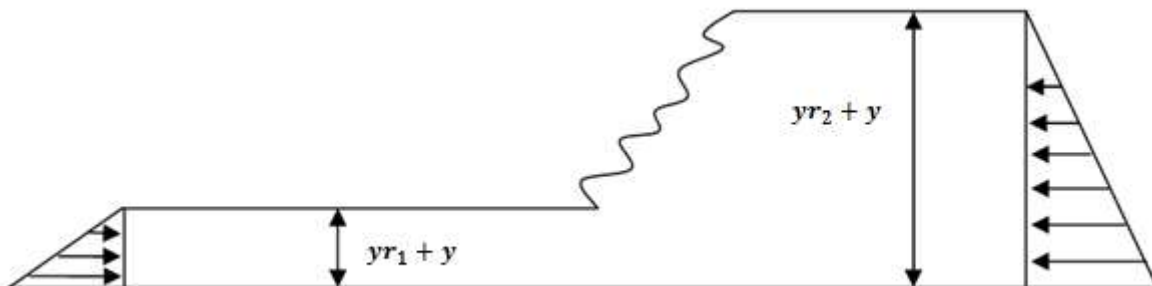


Figure (2.5) : Section de la bande longitudinale

L'équation de la quantité de mouvement pour une bande est présentée sous la forme suivante :

$$\frac{1}{2} \gamma (y r_1 + y)^2 + v_1^2 (y + y r_1) = \frac{1}{2} \gamma (y r_2 + y)^2 + v_2^2 (y + y r_2) \quad (2.28)$$

On a:

$V = Q/At(1+2\phi)$, divisant par γy_o^2 , l'expression suivante est obtenue pour la bande.

$$\begin{aligned} P + M/\gamma y_o^2 &= 1/2 (y/y_o + \phi_1)^2 + \Theta (y/y_o + \phi_1) / (1+2\phi_1)^2 \\ &= 1/2 (y/y_o + \phi_2)^2 + \Theta (y/y_o + \phi_2) / (1+2\phi_2)^2 \end{aligned} \quad (2.29)$$

Pour l'équilibre

$$(P+M)s_1 = (P+M)s_2 \quad (2.30)$$

On a :

$$G = (P+M)s_2 / (P+M)s_1 \quad (2.31)$$

$M=1$ pour l'équilibre

$M>1$ pour P+M déficience en amont

$M<1$ pour P+M surplus en amont

De la géométrie :

$$y/y_o = 1 - x/x \quad (2.32)$$

Remplaçant (2.33) dans (2.30) :

$$\begin{aligned} 1/2 (1-x/x_o + \phi_1)^2 + \Theta (1-x/x_o + \phi_1) / (1+2\phi_1)^2 &= 1/2 (1-x/x_o + \phi_2)^2 + \Theta (1-x/x_o + \phi_2) / \\ (1+2\phi_2)^2 & \end{aligned} \quad (2.33)$$

Remplaçant (2.33) dans (2.31) :

$$\begin{aligned} G &= 1/2 (1-x/x_o + \phi_2)^2 + \Theta (1-x/x_o + \phi_2) / (1+2\phi_2)^2 \quad 1/2 (1-x/x_o + \phi_1)^2 + \Theta (1-x/x_o + \phi_1) / \\ & (1+2\phi_1)^2 \end{aligned} \quad (2.34)$$

Le paramètre G ressemble au paramètre de forme H utilisé dans les études de la couche limite. La valeur de G est une mesure approchée de la quantité de mouvement à toute la bande longitudinale, et la valeur de H représente la mesure approchée de la quantité de mouvement dans la couche limite. Autrement, le critère de séparation de la couche limite est souvent exprimé par le taux de changement de H plutôt que la valeur communément utilisée de H . La valeur de G ou $dG/d(x_0-x)$ peuvent être des mesures valables si le ressaut hydraulique est possible.

La valeur maximale de G se produit au fond le peu profond, où $x/x_0=1$

$$G_m = \frac{1}{2} \phi \phi_2^2 + \Theta \phi \phi_2 / (1+2\phi \phi_2)^2 - \frac{1}{2} \phi \phi_1^2 + \Theta \phi \phi_1 / (1+2\phi \phi_1)^2 \quad (2.35)$$

Les valeurs de G par rapport à ϕ pour les différentes valeurs de Θ sont illustrées dans la figure (2.6).

D'une manière similaire

$$dG/d(x/x_0) \text{ à } x/x_0 = 1 = G(\phi_2 - \phi_1) / \phi_1 \phi_2 \quad (2.36)$$

Les valeurs $dG/d(x/x_0) \text{ à } x/x_0 = 1$ sont tracés en fonction de ϕ_1 pour les différents valeurs de Θ (Figure 2.7).

Le diagramme de G_m et $dG/d(x/x_0) \text{ à } x/x_0 = 1$ montre les valeurs correspondant aux essais. Les essais sont effectués à cinq largeurs différentes de canal ou à cinq valeurs différentes de $y_{r1}/y_{r1} + y_0$.

La valeur du paramètre $Y_{r1}/Y_{r1} + Y_0$ pour la section transversale rectangulaire est égale à l'unité. Dans ce cas, le ressaut est toujours possible et le rapport G c'est 1, il ya la force de pression plus l'équilibre de la quantité de mouvement dans chaque bande longitudinale. Dans une section triangulaire, la valeur de $Y_{r1}/Y_{r1} + Y_0$ est égale à zéro,

La formation du ressaut est impossible et les vagues ondulantes et rouleaux sur le côté peu profond sont présents ; la valeur maximale correspondante de G est infinie, ce qui signifie qu'il y a une force de pression plus une diminution de la quantité de mouvement en aval et qui ne peut pas être fournie, rendant impossible la formation du ressaut hydraulique.

Les valeurs théoriques calculées pour le rapport G_m et tracées dans la figure 3.3 sont toujours plus grandes que l'unité, ce qui veut dire qu'il y a une augmentation de la quantité de mouvement sur le coté profond du canal et une diminution sur le coté le peu profond.

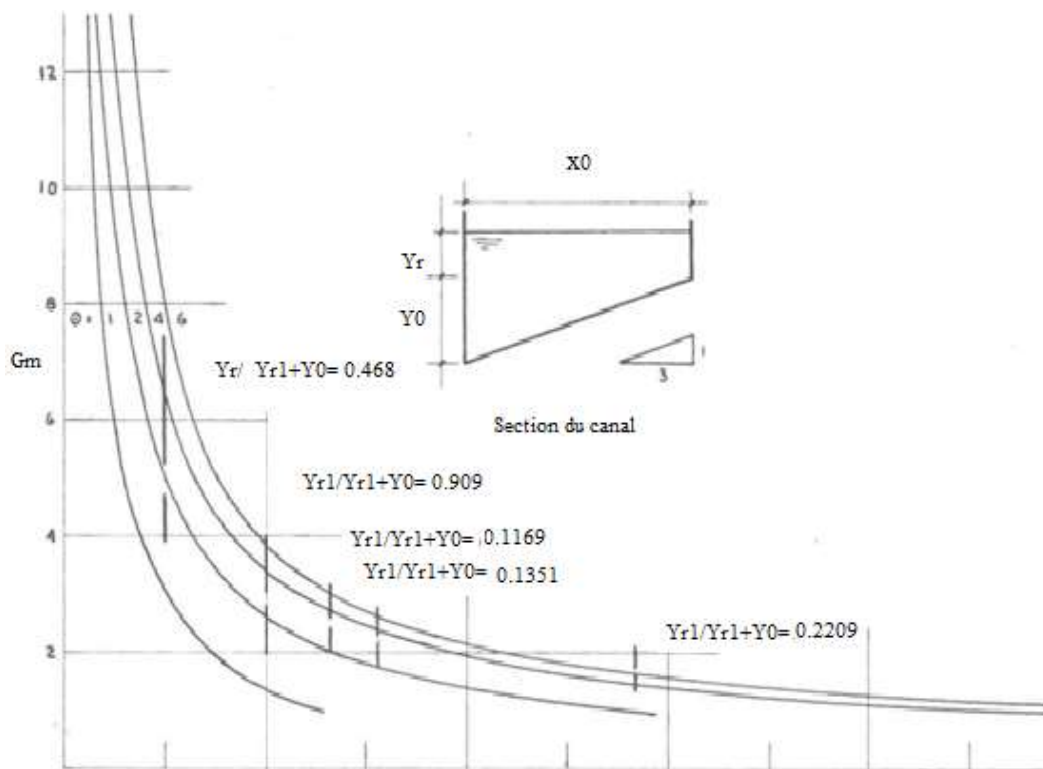


Figure (2.6) : Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté peu profond

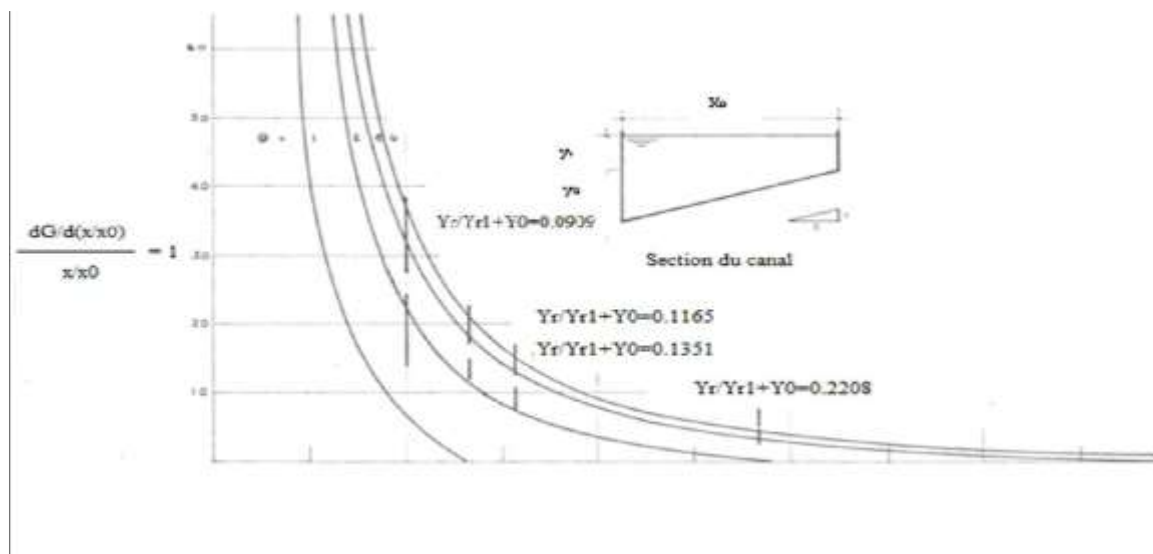


Figure (2.7) : Diagramme adimensionnel du taux de changement de M sur le côté profond

II.2.2.3. Discussion des résultats :

Il existe deux types différents d'écoulement :

- Le premier type se compose d'ondes ondulantes à travers le canal et des rouleaux sur le côté peu profond. Une seconde vague bien définie a toujours été observée avec ce type d'écoulement. Un modèle de ce type d'écoulement est représenté sur les figures (2.8a et 2.8b).
- Le deuxième type consiste en une onde perpendiculaire à la section transversale qui peut être appelée ressaut hydraulique ; aucune seconde vague n'a été observée. Ce type d'écoulement est également esquissé dans les figures (2.8c et 2.8d).

Les critères utilisés pour analyser les deux types de l'écoulement observés sont qu'un certain transfert latéral de la quantité de mouvement est nécessaire pour obtenir une onde perpendiculaire ; dans le cas où ce retour latéral de la quantité de mouvement

ne peut pas être fourni, aucun ressaut hydraulique n'est possible.

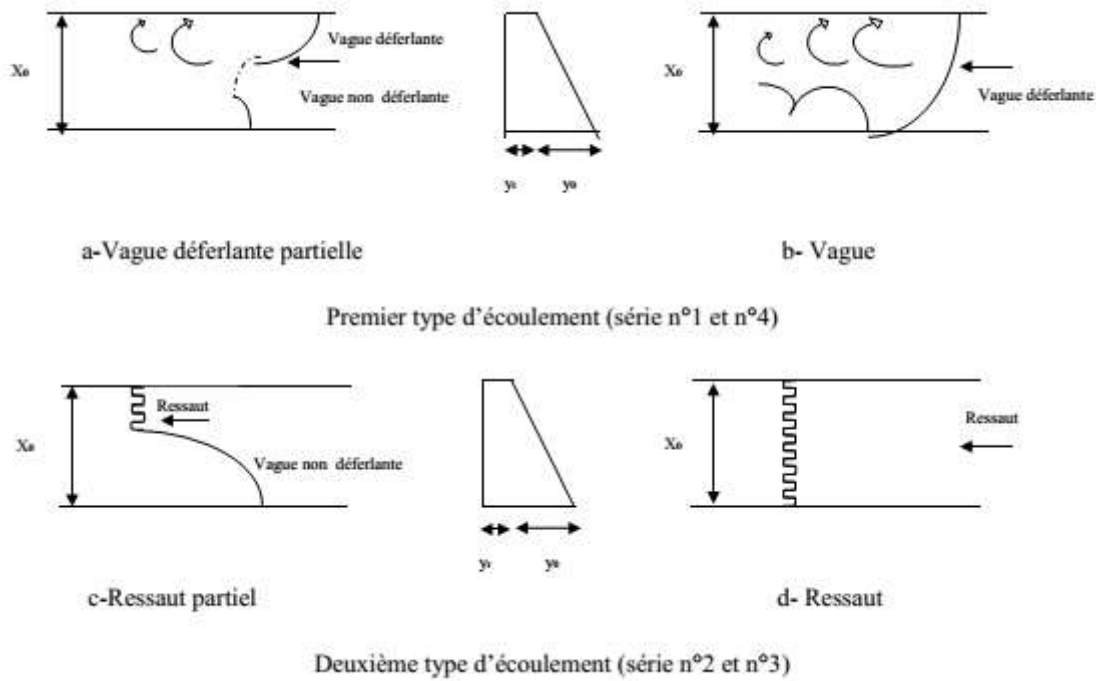


Figure (2.8) : Schéma général d'écoulement

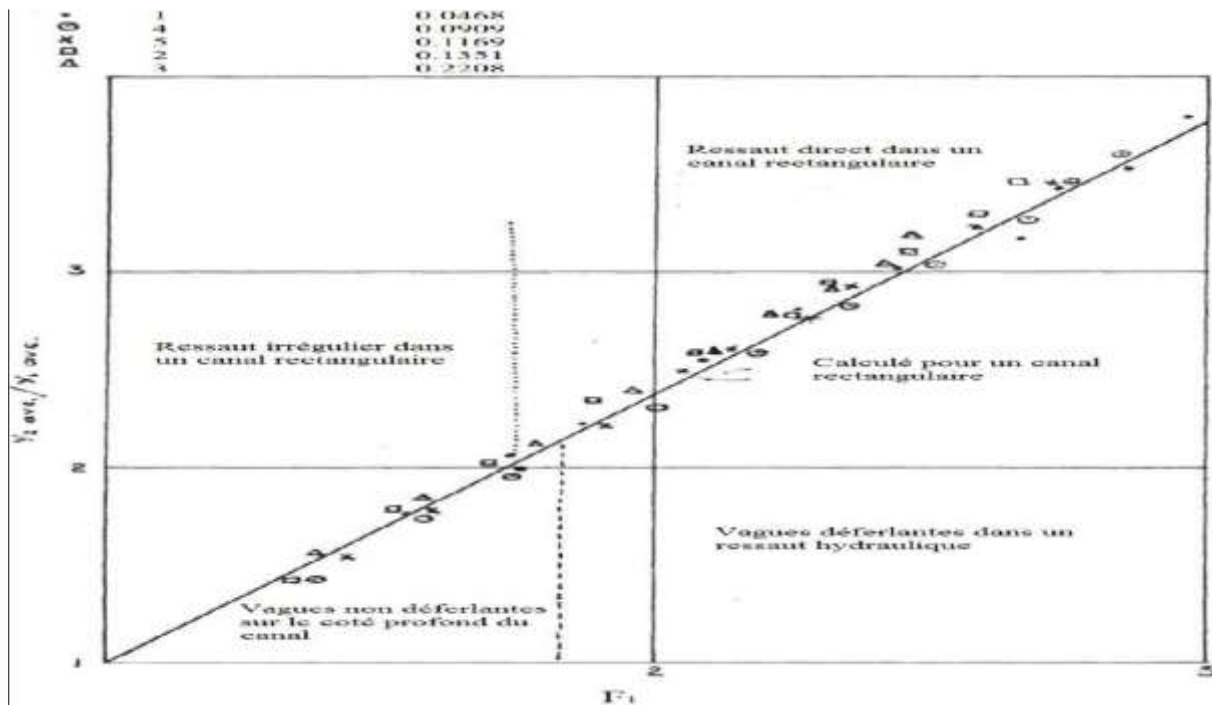


Figure (2.9) : Rapports de profondeur moyenne en fonction de numéro de Froude

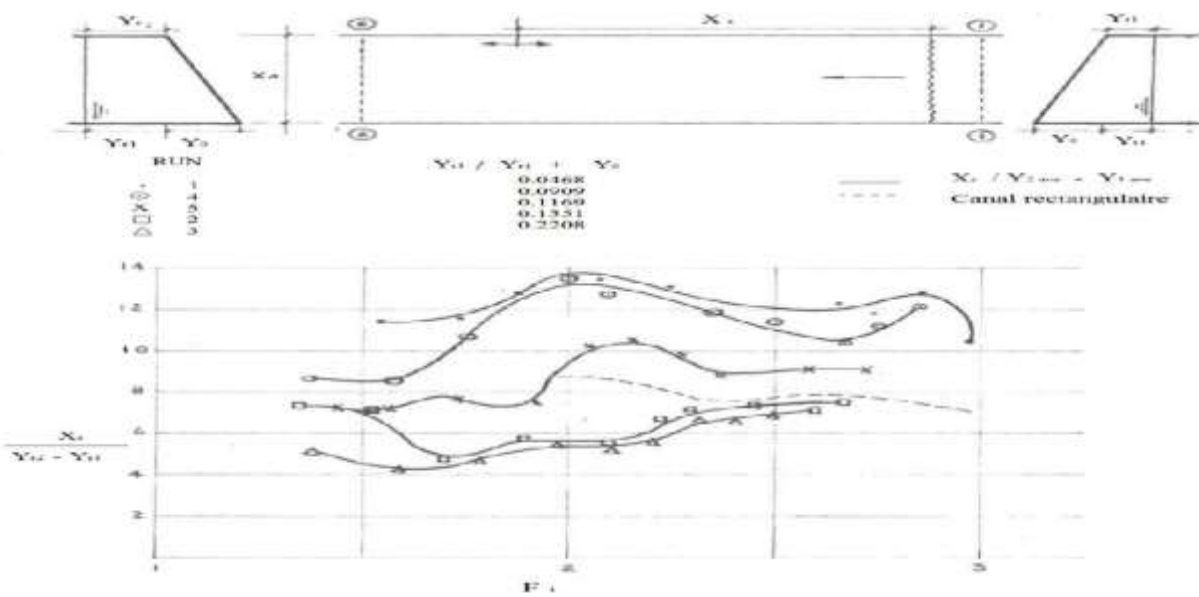


Figure (2.10) : Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral du côté peu profond

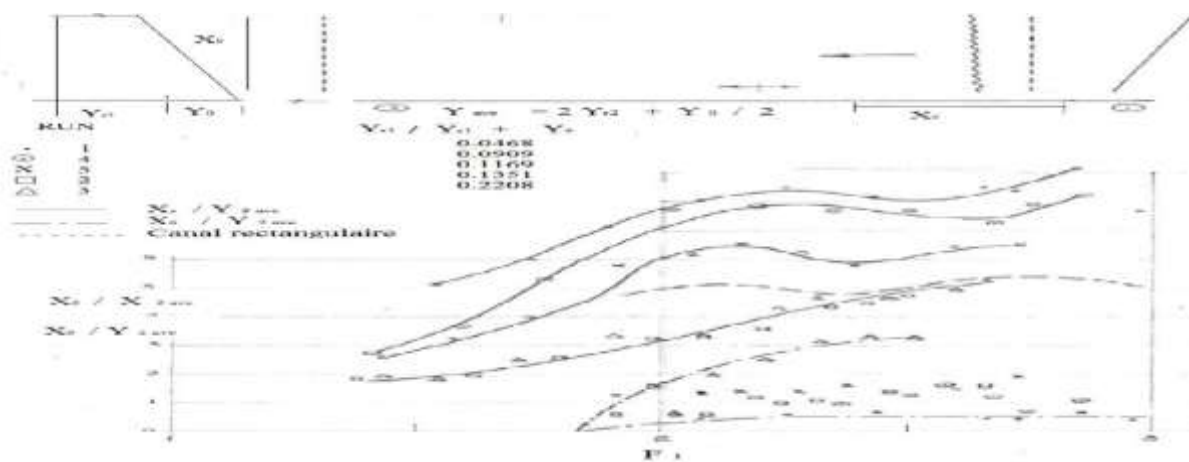


Figure (2.11) : Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral des deux côtés du Canal.

La valeur du nombre Froude légèrement inférieur à 2.0 peut être considérée comme l'entre la vague de rupture et de non-rupture indépendamment de la forme du canal.

Dans la figure n° 3.7, les deux types de l'écoulement (vagues ondulantes ou ressaut hydraulique) sont bien différenciés. Les valeurs de $X_s/Y_{r2}-Y_{r1}$ supérieur à 8 correspondent à des vagues ondulantes et des remous sur le côté peu profond. Quand le ressaut est obtenu, la valeur de $X_s/Y_{r2}-Y_{r1}$ n'est jamais supérieure à 8. Les valeurs maximales obtenues par Bakhmeteff et Matzke pour la longueur sur la hauteur du ressaut dans un canal rectangulaire sont affichés en pointillés dans la figure 3.8 La valeur de ce rapport est d'environ 8 sur un canal rectangulaire.

Si le ressaut n'est pas obtenu, la longueur du retour latéral sur le côté peu profond augmente à mesure que la largeur du canal augmente ; la limite sera lorsque la section transversale du canal est triangulaire, la longueur de l'écoulement inverse sur le côté Peu profond étant infinie ; l'événement est prouvé expérimentalement. Pour la condition du ressaut, la longueur du retour latéral sur le côté peu profond était pratiquement la même pour tous les séries.

Les valeurs maximales du rapport de la longueur de ressaut sur la profondeur amont du ressaut pour un canal rectangulaire (L_j/h_1) obtenu par Bakhmettef et Mr Matzke sont affichées en pointillés sur la figure 8. La valeur maximale de ce rapport est d'environ 5.

II.2.3. Conclusion du deuxième chapitre :

Ce chapitre présente les principaux travaux dans le domaine du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal symétrique et asymétrique. La détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique, a été souvent l'objectif principal des travaux de plusieurs auteurs.

La première étude réalisée sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal est celle de Posey et Hsing (1938). Wanoschek et Hager (1989) ont représenté sur un graphique la variation expérimentale et théorique du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour quatre valeurs du paramètre de forme M_1 (0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4).

La longueur du ressaut a été mesurée par plusieurs auteurs et chacun d'eux avait proposé la relation d'ajustement de ses résultats, Ces auteurs sont Posey et Hsing (1938), Silvester (1964), Otsu (1976) et Wanoschek et Hager (1989).

Les auteurs ont montré aussi, sur un graphique, la variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour toutes les formes du trapèze , allant du rectangle au triangle.

Dans le deuxième sou-chapitre la ressaut hydraulique évoluant dans canal trapézoïdale asymétrique a été exposé a travers les travaux da José Vasques Diaz(1954).

Conclusion de la partie bibliographique

La première partie a concerné les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à fond horizontal et trapézoïdal.

L'étude bibliographique a examiné dans un premier temps, les travaux de *Bradley* et *Peterka* (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de *Hager* (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. Le deuxième chapitre présente l'étude de *Wanoschek* et *Hager* (1989) sur le ressaut dénoyé dans un canal trapézoïdal, des relations seront données pour la quantification des longueurs caractéristiques du ressaut noyé se produisant dans canal rectangulaire et triangulaire ainsi que la longueur du ressaut dénoyé pour le canal trapézoïdal.

Le deuxième chapitre a concerné en deuxième lieu le ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire. Une étude a été proposée qui est celle d'Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954).

Cette étude a été consacrée à l'évaluation par la voie de l'expérimentation des caractéristiques de la longueur et la profondeur du ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire.

L'expérimentation s'est intéressée, également, à évaluer le transfert de la quantité de mouvement latéral. Un paramètre généralisé pour mesurer le retour de cette quantité de mouvement est le rapport de la force de pression plus le débit de la quantité de mouvement aval dans une large bande de l'unité à celle en amont de la transition. Alberto José Rodriguez-Diaz (1954) a montré que lorsque le ressaut hydraulique est formé, la valeur de ce paramètre ne dépasse pas 2,8.

L'étude expérimentale d'Alberto José et Rodriguez-Diaz (1954) ont permis de déterminer les paramètres suivants:

1-En fonction de la valeur du nombre de Froude, l'écoulement est divisé en deux types .Si le nombre de Froude est inférieur à 1.83, des vagues déferlantes partielles sont obtenues ; et si le nombre de Froude est supérieur à 1.83, des vagues déferlantes sur toute la section du canal sont observées.

2-La valeur limite théorique de $Fr_1 = 1.73$ pour les conditions de ressaut irrégulier et direct dans le canal rectangulaire sont très proches de la valeur de $Fr_1 = 1.83$ obtenu pour ce canal. Par conséquent, la valeur du nombre de Froude un peu inférieur à 2 peut être considéré comme la limite entre les vagues déferlantes et non déferlantes indépendamment de la forme du canal.

3-Dans un canal rectangulaire, le nombre de Froude est suffisant pour décrire le type de l'onde, puisque seulement deux types sont possibles ; le ressaut irrégulier et direct. Dans un canal non rectangulaire une division supplémentaire est nécessaire, puisque deux phénomènes complètement différents sont possibles ; le type de l'écoulement constitué des vagues ondulantes et des tourbillons dans le côté peu profond, c'est le ressaut hydraulique. la ligne de démarcation entre ces deux types d'écoulement est donnée soit par la valeur de G ou la valeur de $dG/d(x/x_0)$ du côté peu profond. La condition de formation du ressaut est : $G_m < 2.8$ ou $dG/d(x/x_0) = 1 < 18.4$

4-Dans le cas de G_m est supérieur à 2.8, la longueur de retour latéral sur le côté peu profond augmente rapidement (si il ya une déviation par rapport à la forme rectangulaire) ; et elle devient infinie (si le canal est triangulaire).

5-La longueur du retour latéral sur le côté profond est toujours plus petite que celle sur le côté peu profond, elle augmente également par la diminution de la largeur du canal. Donc, la condition limite dans le canal rectangulaire est obtenue si la longueur des deux côtés du canal est la même.

6-La longueur du retour latéral sur le côté peu profond pour un ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire ($Fr_1 > 1.83$ et $G_m < 2.8$) est plus petite que la longueur du ressaut dans un canal rectangulaire.

7-Les conclusions 5 et 6 indiquent que le ressaut hydraulique dans une section non rectangulaire est plus efficace en tant que dissipateur d'énergie que dans une section rectangulaire.

Discussion Et Conclusion Générale

Discussion Conclusion générale

Notre étude présente une analyse expérimentale du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique. L'étude a pour but de déterminer expérimentalement du rendement.

Deux parties ont été nécessaires :

✚ La première partie a été divisée en deux chapitres :

Le premier chapitre, est consacré au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire. On a commencé par l'équation de base, démontrée par *Bélanger (1928)* ; cette dernière est obtenue par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut classique, et elle exprime la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique, et le facteur adimensionnel connu par le nombre de *Froude F_1* . La détermination de la valeur du nombre de *Froude F_1* de l'écoulement à l'amont du ressaut hydraulique, a permis à *Bradley et Peterka (1957)*, de donner les classifications des différentes formes du ressaut. A travers les études de *Hager et al (1990)*, sur le ressaut hydraulique, les auteurs ont montré que l'estimation des caractéristiques géométriques du ressaut, telle que la longueur du ressaut L_j et la longueur L_r du rouleau, n'est possible que par la voie expérimentale .


A la fin de ce premier chapitre, nous avons examiné, le ressaut hydraulique contrôlé par seuil, et nous avons cité les travaux de Forster et Skrinde (1950) concernant le seuil a paroi mince. Les auteurs ont défini ; en premier lieu, la variation de la hauteur relative $S = s / h_1$ du seuil en fonction du nombre de froude F_1 et pour des valeurs données de x / h_2

Le deuxième chapitre présente l'étude de Wanoschek et Hager (1989) sur le ressaut dénoyé dans un canal trapézoïdal symétrique, des relations seront données pour la quantification des longueurs caractéristiques du ressaut noyé se produisant dans canal rectangulaire et triangulaire ainsi que la longueur du ressaut dénoyé pour le canal trapézoïdal symétrique.

Dans le deuxième sous-chapitre le ressaut hydraulique évoluant dans canal trapézoïdale asymétrique a été exposé à travers les travaux de José Vasques Diaz(1954).

Cette étude a été consacrée à l'évaluation par la voie de l'expérimentation des caractéristiques de la longueur et la profondeur du ressaut hydraulique dans un canal non rectangulaire.

L'expérimentation s'est intéressée, également, à évaluer le transfert de la quantité de mouvement latéral. Un paramètre généralisé pour mesurer le retour de cette quantité de mouvement est le rapport de la force de pression plus le débit de la quantité de mouvement aval dans une large bande de l'unité à celle en amont de la transition. Alberto José Rodriguez-Diaz (1954) a montré que lorsque le ressaut hydraulique est formé, la valeur de ce paramètre ne dépasse pas 2,8.

 La deuxième partie de notre étude sera, entièrement consacrée à notre propre contribution dans l'étude du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique, en examinant l'influence du paramètre du seuil sur les autres caractéristiques. L'étude sera abordée d'une manière expérimentale.

La premier chapitre a été consacré à la description du modèle expérimental, utilisé dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique. Une description détaillée de

L'appareillage utilisé pour les essais avec des illustrations photographiques nous a aidés à donner une vue plus claire sur le déroulement des travaux d'expérimentation.

Le deuxième chapitre de cette partie a concerné l'étude expérimentale sur le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique. Notre objectif sera de déterminer expérimentalement la variation expérimentale du rendement en fonction du nombre de Froude incident F_1 .

D'après les graphes présentés, on a remarqué que le rendement (η) augmente proportionnellement avec le nombre de Froude, pour toutes les positions testées.

PRINCIPALES NOTATIONS

A1	L'aire de la section mouillée initiale	[m ²]
A2	L'aire de la section mouillée finale	[m ²]
A(x)	L'aire de la section mouillée correspondant à x	[m ²]
B	Base du canal trapézoïdal	[m]
Fr1	Nombre de Froude incident	[-]
P1	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du Ressaut	[N]
P2	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du Ressaut	[N]
g	Accélération de la pesanteur	[m .s ⁻²]
h1	Hauteur initiale du ressaut	[m]
h2	Hauteur finale du ressaut	[m]
h2*	Hauteur finale du ressaut classique rectangulaire	[m]
\bar{h}	Profondeur du centre de gravité de la section mouillée par rapport à la surface libre de l'écoulement	[m]
Lr	Longueur du retour latéral du rouleau	[m]
Lj	Longueur du ressaut	[m]
Lr*	Longueur du rouleau ressaut classique	[m]
Lj*	Longueur du ressaut classique	[m]
m	cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du trapèze par rapport à l'horizontale	[-]
Q	Débit volume	[m ³ .s ⁻¹]

Re	Nombre de Reynolds	[-]
	S	Hauteur du seuil
		[m]
S	Hauteur relative du seuil	[-]
V	Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiale et finale	[m ³]
v1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	[m .s-1]
v2	Vitesse moyenne dans la section mouillée	[m .s-1]
x	Position de seuil	[m]
X	Position relative de seuil	[-]
Y*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
Ys	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil	[-]
v	Viscosité cinématique	[m ² .s-1]
λj	Longueur relative du ressaut	[-]
λr	Longueur relative du retour latéral du courant	[-]
ω	Poids spécifique du liquide	[N .m-3]
ρ	Masse volumique du liquide	[kg .m-3]
η	Rendement du ressaut	[-]

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Première partie

Chapitre I

Figure(1) : ressaut hydraulique avec les principales notations

Figure (1.1) : Ressaut ondulé

Figure (1.1.A) : Le pré-ressaut

Figure (1.1.B) : Le ressaut de transition

Figure (1.1.C) : Le ressaut stable

Figure (1.2) : Représentation des forces agissantes sur le ressaut

Figure (1.3) : Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828)

Figure (1.4) : Hauteur du ressaut

Figure (1.5) : Aspect du ressaut classique

a) Rouleau développé b) Rouleau non développé

Figure (1.6): (-----) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

Figure (1.7) : Rendement η du ressaut classique en fonction du nombre de Froude Fr_1 (—) Courbe tracée selon la relation (1.19), (-----) courbe tracée Selon la relation (1.20)

Figure (1.8): Schéma du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince

Figure (1.9) : Ecoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur s et de longueur L Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.

Chapitre II

Figure (2.1) : Variation du nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut et de la hauteur relative M .
 $M \rightarrow 0$: profil rectangulaire. $0 < M < \infty$: profils trapézoïdaux.

Figure (2.2) : Représentation graphique du ressaut en canal trapézoïdale

Figure (2.3) : Variation du rendement η du ressaut en canal trapézoïdal en fonction du nombre de Froude F_1 pour différentes valeurs de M_1 (Equation (1.22)).

Figure (2.4): Section transversale du canal

Figure (2.5) : Section de la bande longitudinale

Figure (2.6) : Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de la quantité de mouvement (amont et aval) sur le côté peu profond

Figure (2.7) : Diagramme adimensionnel du taux de changement de M sur Coté peu profond

Figure (2.8) : Schéma général d'écoulement

Figure (2.9) : Rapports de profondeur moyenne en fonction de numéro de Froude

Figure (2.10) : Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral côté Peu profond

Figure (2.11) : Diagramme adimensionnel de la longueur du retour latéral des deux côtés du Canal.

Deuxième partie

Chapitre I :

Figure (1.1) : Schéma simplifié d'ensemble du dispositif expérimental

Photo (1.1): Photographie du model expérimentale du canal

Photo (1.2) : pompe centrifuge

Photo (1.2.1) : caractéristique de la pompe.

Photo (1.3) : convergent

Photo (1.4) : photographie d'une vanne

Photo (1.5) : photographie d'un manomètre différentiel gradué

Photo (1.6) : photographie d'un débitmètre à diaphragme


Figure (1.2) : courbe d'étalonnage de la variation du débit volume Q en fonction différence des cotes h () : points expérimentaux, (---) courbe d'ajustement


Figure (1.3) : courbe de la variation du débit volume Q_{appr} selon la relation (1.1) en fonction de débit volume Q_{exp} expérimentale (): points expérimentaux, première bissectrice.

Figure (1.4): Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnométrique

Figure (1.5) : Photographie des seuils minces testés

Chapitre II :

Figure (1.6) : La variation du rendement en fonction du nombre de Froude Fr pour la position du seuil $x=6.99$ m

Figure (1.7) : La variation du rendement en fonction du nombre Froude Fr pour la position du seuil $x=6.02$ m

Figure (1.8) : La variation du rendement en fonction du nombre de Froude Fr pour la position du seuil $x=3.98$ m

Figure (1.9) : La variation du rendement en fonction du nombre de Froude Fr pour la position du seuil $x=3.00$ m

Figure (1.10) : La variation du rendement en fonction du nombre Froude Fr pour la position du seuil $x=2.50$ m

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Deuxième partie

Chapitre II

Tableau (1.1) : valeurs des mesures du débit par l'étalonnage

Tableau (1.2) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de figure (1.6)

Tableau (1.3): Mesures expérimentales ayant servi au traçage de figure (1.7)

Tableau (1.4) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de figure (1.8)

Tableau (1.5) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de figure (1.9)

Tableau (1.6) : Mesures expérimentales ayant servi au traçage de figure (1.10)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achour, B., Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire. Journal of Hydraulic Research 41(3), 319-325.

Alberto, J., Rodriguez-D.(1954),The hydraulic jump in non rectangular open chanel. Thesis of master of science in civil engineering. Faculty of the graduate division, Georgia institute of technologie.

Andersen J, V. M., (1978).Undular hydraulic jump, Proc, ASCE, j, Hydraulics Division, Vol. 104, pp. 1185-1188.

Bakhmeteff, B. A., Matzke, A E, (1936). The Hydraulic Jump terms of dynamic similarity, Transactions, American society of civil engineers, Vol.101, pp, 630-647.

Belanger, J.B., (1828). Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes, Carilian-Goeury, Paris.

Bradley, J. N., Peterka, A. J., (1957). The hydraulic design of stilling basins, Hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I), paper 1401; High dams, earth dams, and large canal structures (Basins II), paper 1402; short stilling basins for canal structures, small outlet works, and small spillways (Basin III), paper 1403; stilling basin and wave suppressors for canal structures, outlet works and diversion dams (Basin IV), paper 1404; stilling basin with sloping; apron (Basin V), paper 1405; small basins for pipe or open channel outlets no tail water required (Basin VI), paper 1406, Proceedings, American Society of Civil Engineers, J. hydraulics division, vol. 83, No.HY5.

Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

Debabeche, M., Achour, B., (2007). Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45(1), pp. 135-139.

Forster, J. W. and Skrinde, R. A., (1950). Control of Hydraulic jump by sills, *Trans. ASCE*, 115,9731022.

Hager, W., Bremen R., H., et Kawogoshi N. (1990). Classical hydraulic jump; length of roller, *J. Hydraulic research* 28(5), 591-608.

Hager, W. H., Li, D., (1992). Sill-controlled Energy Dissipator, *J. Hydraulic research*, vol.30, n°2,165181.

Rajaratnam, (1967), Hydraulic jumps. *Advances in Hydrosience*. Vol.4. Academic Press, New York, 197-280.

Rajaratnam, N., (1964), Discussion to Silvester (1964) *Journal of Hydraulic Division*, ASCE 90(HY4), 341-350.

Rajaratnam, N., (1967). *Hydraulique jumps*, *Advances in hydrosience*, 4: 197-280, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York, N.Y.

Silvester, R., (1964), The hydraulic jump in all shapes of horizontal channel. *Journal of hydraulic Division*, ASCE(HYI), 23-55.

Sinniger, R.O., Hager.W.H. (1988), *Ecoulement stationnaire*, Presses Polytechniques Romandes, 439P.

Silvester, R. (1964). *Hydraulics Jump in all Shapes of Horizontal Channels*, *Proc.ASCE, J. Hydr.Divi.*, 90, 23-55.

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

Zaid, Z., (1967). *effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal*. Mémoire de Magister, département Génie civil et d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.