

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Contribution à la localisation du ressaut hydraulique (cas d'un canal rectangulaire) .

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0006-16

APA Citation (APA توثيق):

Yaiche, Lotfi (2016). Contribution à la localisation du ressaut hydraulique (cas d'un canal rectangulaire)[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، الدوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

تأززو التعلیم العالی و البحث العلی

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Département Hydraulique Urbaine

MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

OPTION : Alimentation en eau potable

THEME :

Contribution à la localisation du ressaut hydraulique (Cas d'un canal rectangulaire)

Présenté par :

M^r : YAICHE Lotfi

DEVANT LES MEMBRES DU JURY

Noms et Prénoms	Grade	Qualité
M ^r . KHODJET-KESBA Omar	Professeur.	Président
M ^r . KAHLERRAS Djilali	M.C.B.	Membre
M ^{me} . AMMOUR Fadila	M.A.A.	Membre
M ^{me} . SALHI Chahrazed	M.A.B.	Membre
M ^r . AMMARI Abdelhadi	M.C .B.	Promoteur

JUIN 2016

« Il y a davantage de perfection dans une simple goutte d'eau que dans toutes les machines inventées par les hommes. »

EINSTEIN Albert, Au 5^{ème} congrès SOLVAY.

Remerciements

Je tiens à remercier et rendre grâce à DIEU le tout-puissant de m'avoir donné le courage et la volonté de terminer ce modeste travail.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de mon travail, particulièrement à :

Mes chers parents, mes frères et ma sœur pour les encouragements qu'ils m'ont manifestés tout au long de mon parcours.

Mon Encadreur Mr. A.AMMARI pour son encadrement et ses orientations judicieuses qui m'ont été infiniment utiles.

J'adresse également mes sincères remerciements à :

Mr. N.OUCIEF, Mr. K.KEMIH, Mr. M.BOUKHELIFA et Mr. H.KENOUNI

Pour leur soutien plus qu'indispensable et qui m'ont aidé à la concrétisation de ce travail.

Et à mon cher ami BOUHALI MOHAMED Dit AISSA, qui m'a aidé lors de l'expérimentation et grâce à qui ce travail a vu le jour.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Avant tout à mes chers parents AÏSSA et NASSIMA, Qui m'ont soutenu, motivé et encouragé durant toutes ces années de formation.

A mes frères YACINE, SAMIR, et LYÉS

A ma sœur LEILA

A mon beau frère SALIM et A ma belle sœur HESNA

A mes nièces NOURHEN et YOUSRA

Qui m'ont soutenu et aidé de manière tant physique que morale

Et A tous mes amis sans exception

مصدا

نا حديد موقع القفزة لهيدورلكيية ه هلمية لا تقدر ولاى صحت، بل وعمرفة هذا الأخير مزيين محاية القاع و اضليتن او تملاجدين فلذ اسلد مايشرة. في هذا اسلياق تندجر هذه الدارسة و التي تم ميسقتها إلى مسقين كبيرين، اجزاء اظنلري الذي مضتين حديد اظلاهرة اولاستهشاد بيض الأعمال اسلاقبة وحل هذا اوضوم، ع و اجزاء التجريبي الذي مضتين لاثت تجابر رئيسية التي شتملى لى لى إثناء القفزة اهليدوركيية صبمام سفي لى و صمرف فائض املياه و اردسة ومقهما. و قد ظأهت التناج نأ طبعية الية إثناء القفزو ؤوجد عبتات تؤثر إيجابى لى لى القفرتا التي متيل إلى القصر وبتدير المزيمن اطلاقته، فى اهذلية تم اقترح الاعقات في هذا اسلأن لتسهيل حديد هذا اوملق.

Résumé :

La détermination de la position du ressaut revêt d'une importance incommensurable, en effet la connaissance de cette dernière permettra d'assurer la longueur de protection nécessaire pour les berges et les sols justes en aval d'un barrage. C'est dans cette optique que s'inscrit cette étude qui a été divisée en deux grandes sections. Une partie théorique qui consiste à définir le phénomène et cité quelques travaux antérieurs sur le sujet. Une deuxième partie expérimentale qui scindé en trois principales expériences mettant en jeu une vanne de fond et un déversoir en vue de créer un ressaut et d'en étudier la position. Les résultats ont montrés que la nature de l'ouvrage de contrôle et la présence de seuils influence positivement les ressauts qui tendent à se raccourcir et a dissiper plus d'énergie, des relations ont été proposé à cet effet pour faciliter la détermination de cette position.

Abstract :

The Determination of the position of the hydraulic jump is very important; indeed it enables us to ensure the length of the protection required for the bottom and the downstream banks of a dam. It's in this context that fits this study which was divided into two large sections, a theoretical part which defined the phenomenon and cited some previous work on the subject, and a second experimental part splitted into three main experiments involving a bottom valve and a spillway in order to create a hydraulic jump and study it position. The results showed that the nature of the control structure and the presence of the thresholds influence positively the jump which tends to shorten and dissipate more energy, relationships were proposed to this effect to facilitate the determination of this position.

Sommaire

Liste des tableaux.....	IV
Liste des figures.....	V
Liste des annexes.....	IX
Notations.....	X
Introduction générale.....	1

Chapitre I : La théorie du ressaut

I.1. Ecoulement à surface libre.....	3
I.2. Ressaut hydraulique.....	4
I.2.1. Définition	4
I.2.2. Description du phénomène.....	5
I.2.3. Apparition des ressauts.....	5
I.2.4. Classification des ressauts.....	6
I.2.5. Caractéristiques du ressaut hydraulique.....	8
I.2.5.1. Hauteurs conjuguées.....	8
I.2.5.2. Longueur du ressaut.....	11
I.2.5.3. Dissipation d'énergie.....	13
Conclusion.....	18

Chapitre II : Le ressaut et la dissipation d'énergie

II.1. Utilisation du ressaut.....	19
II.2. Dissipation d'énergie.....	21
II.2.1. Définition.....	21
II.2.2. Généralités sur le phénomène.....	21
II.2.3. Types de bassins de dissipation.....	22
II.2.3.1. Bassins de dissipation d'impact.....	22
II.2.3.2. Bassins de dissipation par roller ou par buckets.....	22

II.2.3.3. Bassins de dissipation par macrorugosité.....	23
II.2.3.4. Bassins de dissipation par ressaut hydraulique.....	24
II.2.3.4.1. Bassins à plan rectangulaire et fond horizontal.....	24
II.2.3.4.2. Bassins à plan rectangulaire, murs verticaux et fond incliné.....	27
II.3. Localisation et Position du ressaut.....	27
Conclusion.....	30

Chapitre III : Méthodes et matériels

III.1. Description du dispositif.....	31
III.2. Position du problème.....	36
III.3. Protocole expérimental.....	36
III.3.1. Etude du ressaut en aval d'une vanne plane sans obstacles en aval.....	36
III.3.2. Etude du ressaut en aval d'une vanne plane avec utilisation de seuils dentés.....	38
III.3.3. Etude du ressaut en aval d'un déversoir à crête arrondie sans obstacles en aval.....	40
Conclusion.....	41

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Analyse des résultats.....	42
IV.1.1. Cas de la vanne de fond sans obstacles en aval.....	43
IV.1.1.1. Exposition des résultats.....	43
IV.1.1.2. Analyse et comparaison des résultats.....	44
IV.1.1.3. Discussion des résultats.....	46
IV.1.2. Cas de la vanne de fond avec seuils terminaux.....	47
IV.1.2.1. Exposition des résultats.....	47
IV.1.2.2. Analyse et comparaison des résultats.....	47
IV.1.2.3. Discussion des résultats.....	49
IV.1.3. Cas du déversoir a crête arrondie.....	50
IV.1.3.1. Exposition des résultats.....	50
IV.1.3.2. Analyse et comparaison des résultats.....	50
IV.1.3.3. Discussion des résultats.....	53

IV.1.4. Comparaison entre les différents cas traités.....	53
IV.2. Traitement des résultats.....	54
IV.2.1. Evaluation des données.....	54
IV.2.1.1. Cas de la vanne de fond sans obstacles en aval.....	54
IV.2.1.2. Cas de la vanne de fond avec seuils terminaux.....	57
IV.2.1.3. Cas du déversoir a crête arrondie.....	60
IV.2.2. Méthode graphique de calcul des courbes de remous.....	63
IV.2.2.1. Méthode et programme de calcul.....	64
IV.2.2.2. Détermination du coefficient de Manning.....	65
IV.2.2.3. Comparaison des résultats.....	66
IV.3. Conclusion.....	70
Conclusion générale.....	72
Bibliographie.....	74

Liste des Tableaux

Chapitre III : Méthodes et matériels

Tableau III.1 : Caractéristique du dispositif d'inclinaison.....	32
Tableau III.2 : Caractéristiques de la pompe du banc d'essai.....	33
Tableau III.3 : Accessoires disponibles avec le canal.....	35

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau IV.1 : Résultats des essais pour le cas de la vanne de fond sans obstacle en aval....	43
Tableau IV.2 : Analyse des résultats des essais de la vanne de fond sans obstacle en aval...	44
Tableau IV.3 : Résultats des essais pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux...	47
Tableau IV.4 : Analyse des résultats des essais pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux.....	47
Tableau IV.5 : Résultats des essais pour le cas du déversoir à crête arrondie.....	50
Tableau IV.6 : Analyse des résultats des essais pour le cas du déversoir à crête arrondie.....	51
Tableau IV.7 : Comparaison entre les différentes relations obtenus pour le cas de la vanne de fond sans obstacles en aval.....	56
Tableau IV.8 : Comparaison entre les différentes relations obtenus pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux.....	59
Tableau IV.9 : Comparaison entre les différentes relations obtenues pour le cas du déversoir à crête arrondie.....	62
Tableau IV.10 : Comparaison des résultats expérimentaux et ceux avec MATLAB.....	67
Tableau IV.10 : Comparaison des résultats expérimentaux et ceux avec MATLAB.....	68
Tableau IV.10 : Comparaison des résultats expérimentaux et ceux avec MATLAB.....	69

Liste des figures

Chapitre I : La théorie du ressaut

Figure I.1 : Ecoulement à surface libre.....	4
Figure I.2 : Ressaut hydraulique (Photo prise par Baptiste MONSION).....	4
Figure I.3 : description du ressaut.....	5
Figure I.4 : Ressaut ondulé.....	6
Figure I.5 : Le Pré-ressaut.....	6
Figure I.6 : Le ressaut de transition.....	7
Figure I.7 : Le ressaut stable.....	7
Figure I.8 : Ressaut agité.....	8
Figure I.9 : Schéma d'un ressaut classique.....	8
Figure I.10 : Schéma d'un ressaut hydraulique.....	9
Figure I.11 : Courbe expérimentale de l'USBR obtenue par PETERKA, 1964 pour la détermination du rapport L/y_2 en fonction de F_1	12
Figure I.12 : Courbe expérimentale pour la détermination de la longueur du ressaut tirée de LENCASTRE.....	13
Figure I.13 : Dissipation d'énergie.....	13
Figure I.14 : Rendement du ressaut en fonction du nombre de Froude amont par HAGER...	15
Figure I.15 : Courbe expérimentale obtenue par l'USBR pour la détermination du rapport E_2/E_1 en fonction du nombre de Froude amont.....	16
Figure I.16 : Détermination rapide des caractéristiques du ressaut.....	17

Chapitre II : Ressaut et dissipation d'énergie

Figure II.1 : Seuil denté de REHBOCK.....	19
Figure II.2 : Fosse de stabilisation.....	20

Figure II.3 : Partiteur à ressaut.....	20
Figure II.4 : Bassin de dissipation par impact.....	22
Figure II.5 : Bassin de dissipation par Roller : a) Bucket simples : b) Bucket avec déflecteurs...23	
Figure II.6 : Bassin de dissipation par macrorugosité.....	23
Figure II.7 : Bassin avec blocs de chute et seuil dentelé (Bassin de type II USBR).....	25
Figure II.8 : Bassin avec bloc de chute, blocs d'amortissement et seuil terminal continue (Bassin de type III USBR).....	25
Figure II.9 : Bassin avec déflecteurs et seuil terminal continue (Bassin de type IV USBR).....	26.
Figure II.10 : Récapitulation des bassins de types USBR.....	27
Figure II.11 : détermination de la position du ressaut.....	28
Figure II.12 : Localisation du ressaut.....	29

Chapitre III : Méthodes et matériels

Figure III.1 : Photo du canal d'essai.....	31
Figure III.2 : Dispositif d'inclinaison automatique.....	32
Figure III.3 : Réservoirs du canal de type Hm1 60.....	33
Figure III.4 : Pompe d'essai du dispositif.....	33
Figure III.5 : Débitmètre électromagnétique.....	34
Figure III.6 : Schéma du dispositif expérimental.....	34
Figure III.7 : Coffret de commande du dispositif.....	35
Figure III.8 : Vanne plane.....	37
Figure III.9 : Appareil de jaugeage.....	37
Figure III.10 : Jeu de seuils.....	39
Figure III.11 : Seuil denté n°1.....	39
Figure III.12 : Seuil denté n°2.....	39
Figure III.13 : Déversoir à crête arrondie.....	40

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV.1 : Schéma explicatif des cas traités.....	43
Figure IV.2 : Séries de courbes de la perte d'énergie en fonction du débit $\Delta H = fct (Q)$ pour le premier cas de la vanne de fond sans obstacle en aval.....	44
Figure IV.3 : Séries de courbes de la perte d'énergie en fonction du nombre de Froude $\Delta H = fct (F)$ pour le premier cas de la vanne de fond sans obstacle en aval.....	45
Figure IV.4 : Séries de courbes du pourcentage de perte d'énergie en fonction du nombre de Froude $\% \Delta H = fct (F)$ pour le premier cas de la vanne de fond sans obstacle en aval.....	45
Figure IV.5 : Séries de courbes de la perte d'énergie en fonction du débit $\Delta H = fct (Q)$ pour le deuxième cas de la vanne de fond avec seuil terminal.....	48
Figure IV.6 : Séries de courbes de la perte d'énergie en fonction du nombre de Froude $\Delta H = fct (F)$ pour le deuxième cas de la vanne de fond avec seuils terminaux.....	48
Figure IV.7 : Séries de courbes du pourcentage de dissipation d'énergie en fonction du nombre de Froude $\% \Delta H = fct (F)$ pour le deuxième cas de la vanne de fond avec seuils terminaux.....	49
Figure IV.8 : Séries de courbes de la perte d'énergie en fonction du débit $\Delta H = fct (Q)$ pour le troisième cas du déversoir à crête arrondie	51
Figure IV.9 : Séries de courbes de la perte d'énergie en fonction du nombre de Froude $\Delta H = fct (F)$ pour le troisième cas du déversoir à crête arrondie.....	52
Figure IV.10 : Séries de courbes du pourcentage de dissipation d'énergie en fonction du nombre de Froude $\% \Delta H = fct (F)$ pour le troisième cas du déversoir à crête arrondie.....	52
Figure IV.11 : Séries de courbes de la distance du ressaut en fonction de la hauteur en amont $D_{mesurée} = fct (H_{amont})$ pour le premier cas de la vanne de fond sans obstacles en aval.....	54
Figure IV.12 : Comparaison entre les résultats donnés par les différentes relations pour le cas de la vanne de fond sans obstacles en aval.....	57
Figure IV.13 : Séries de courbes de la distance du ressaut en fonction de la hauteur en amont $D_{mesurée} = fct (H_{amont})$ pour le deuxième cas de la vanne de fond avec seuils terminaux.....	58

Figure IV. 14 : Comparaison entre les résultats donnés par les différentes relations pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux.....60

Figure IV.15: Séries de courbes de la distance du ressaut en fonction de la hauteur en amont $D_{\text{mesurée}} = fct (H_{\text{amont}})$ pour le troisième cas du déversoir à crête arrondie60

Figure IV.16: Séries de courbes de la distance du ressaut en fonction du nombre de Froude $D_{\text{mesurée}} = fct (F)$ pour le troisième cas du déversoir à crête arrondie.....61

Figure IV. 17 : Comparaison entre les résultats donnés par les différentes relations pour le cas du déversoir à crête arrondie.....63

Figure IV.18 : Les différents types de courbes de remous.....64

Figure IV.19 : Organigramme du programme de calcul.....66

Notations

∂X : Dérivé partielle par rapport a x.

∂Y : Dérivé partielle par rapport a y.

∂T : Dérivé par rapport au temps.

∂V : Dérivé partielle par rapport a la vitesse.

H_1 : Première hauteur conjuguée du ressaut en (m).

H_2 : Deuxième hauteur conjuguée du ressaut en (m).

H_c : Hauteur critique en (m).

Fr : Nombre de Froude.

Y_1 : Profondeur du centre de gravité de la section en amont du ressaut en (m).

Y_2 : Profondeur du centre de gravité de la section en aval du ressaut en (m).

V_1 : Vitesse moyenne à l'amont du ressaut en (m/s).

V_2 : Vitesse moyenne a l'aval du ressaut en (m/s).

S_1 : Section en amont du ressaut en (m²).

S_2 : Section en aval du ressaut en (m²).

g : Accélération de la pesanteur : 9.81 (m²/s).

Q : Débit circulant (m³/s).

β : Coefficient de quantité de mouvement.

P_1 : Pression hydrostatique en amont du ressaut.

P_2 : Pression hydrostatique a l'aval du ressaut.

L : Longueur du ressaut en (m).

USBR : United states bureau of reclamations.

H : Charge critique (m).

α et α' : Paramètres de Coriolis.

b : largeur du canal en (m).

η : Efficacité de dissipation d'énergie.

E_1 : Energie en amont du ressaut.

E_2 : Energie en aval du ressaut.

NEYRPRIC : Société Française de fabrication d'équipements hydraulique.

u : Vitesse d'amenée dans les bassins de dissipation en (m/s).

H_{min} : Hauteur minimale en (m).

H_{\max} : Hauteur maximale en (m).

i : Pente en m/m.

D : Distance de formation du ressaut en (m).

L_{exprime} : Longueur du ressaut expérimentale en (m).

L_{Smetana} : Longueur du ressaut calculée par la formule de SMETANA en (m)

$L_{\text{M. district}}$: Longueur du ressaut calculée par la formule de MIAMI DISTRICT en (m).

ΔH : Perte d'énergie en (c.c.e).

$H_{2 \text{ expprime}}$: Deuxième hauteur conjuguée du ressaut mesurée expérimentalement en (cm).

$H_{2 \text{ théorie}}$: Deuxième hauteur conjuguée du ressaut calculée par la formule de BELANGER en (cm).

Δh_2 : Pourcentage d'erreur sur la deuxième hauteur du ressaut.

RMSE : Root mean squart

Liste des annexes

Annexe I

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

Annexe II

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

Annexe III

Annexe III.1 : Tableau suite des résultats des essais pour le cas de la vanne de fond sans obstacles en aval

Annexe III.2 : Tableau suite de l'analyse des résultats des essais de la vanne de fond sans obstacles en aval

Annexe III.3 : Tableau suite des résultats des essais pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

Annexe III.4 : Tableau suite de l'analyse des résultats des essais pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

Annexe III.5 : Tableau suite des résultats des essais pour le cas du déversoir à crête arrondie

Annexe III.6 : Tableau suite de l'analyse des résultats des essais pour le cas du déversoir à crête arrondie

Annexe III.7 : Tableau suite de la comparaison entre les différentes relations obtenus pour le cas de la vanne de fond sans obstacles en aval

Annexe III.8 : Tableau suite de la comparaison entre les différentes relations obtenus pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

Annexe III.9 : Tableau suite de la comparaison entre les différentes relations obtenus pour le cas du déversoir à crête arrondie

Annexe III.10 : Tableau du détail de calcul du coefficient de Manning

Annexe IV

Annexe IV : Programme MATLAB pour la détermination de la longueur d'une courbe de remous de type H_3

Introduction générale

Introduction générale

Glacée, liquide, dans les mers, sur terre ... l'eau est une merveille qu'il est nécessaire de protéger et sauvegarder, cette dernière peut se trouver sous différentes formes et être à l'origine de plusieurs phénomènes comme les brinicles, les fleurs de givres, les mascarets ou les ressauts.

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

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

Les recherches expérimentales ont d'abord validé le fait que le ressaut hydraulique soit régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. C'est-à-dire l'application de la seconde loi de Newton, énonçant que la variation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut hydraulique est égale à la résultante des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement. L'application de cette dernière a eu pour but d'évaluer le rapport des hauteurs du ressaut en fonction du nombre de Froude caractérisant l'écoulement amont. La résolution la plus simple de ce système est celle obtenue par BELANGER en an 1828. Les scientifiques ont aussi établi des relations permettant la détermination des autres caractéristiques du ressaut tel que la longueur et la quantité de dissipation d'énergie.

L'ébignement du ressaut par rapport à l'ouvrage de contrôle demeure néanmoins une caractéristique que les scientifiques ne sont pas arrivés à déterminer analytiquement, l'unique

manière reste d'inter-croisé les courbes de remous et leurs conjuguées graphiquement d'où l'intérêt de ce travail.

Dans ce travail, nous allons présenter une nouvelle approche pour contribuer à la détermination de l'éloignement du ressaut dans un canal rectangulaire choisi pour sa disponibilité et sa simplicité géométrique. Nous chercherons à établir une relation entre des paramètres adimensionnels hydrauliques et géométriques traduites respectivement par les conditions amont et aval de l'écoulement et la nature de l'ouvrage de contrôle entre autres la hauteur en amont de l'ouvrage et le nombre de Froude.

Afin d'atteindre ces objectifs, l'étude a nécessité deux grandes parties subdivisées en quatre chapitres :

- Une partie bibliographique qui mettra en revue l'approche scientifique et théorique du phénomène ainsi que de la dissipation d'énergie.
- Une deuxième partie qui traitera du protocole expérimental qui sera adopté ainsi que de l'analyse et de la discussion des résultats.

Chapitre I :

La théorie du ressaut

Dans le domaine de l'hydraulique, l'étude des caractéristiques de la structure externe d'un écoulement revêt un enjeu très important surtout pour les écoulements brusquement variés. En effet un écoulement rapidement varié est un écoulement dont nous constatons une évolution rapide voire discontinue des caractéristiques de l'écoulement d'une section à une autre et sur une très courte distance d'où l'utilité de la connaissance de ses paramètres, ce phénomène est distingué dans des contractions, des chutes libres ou des ressauts hydrauliques.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à un cas particulier de l'écoulement brusquement varié qui est le ressaut hydraulique, nous allons nous pencher sur les différents types de ressauts et leurs paramètres en vue de mieux appréhender ce phénomène, le maîtriser et pouvoir en tirer profit.

I.1. Ecoulement à surface libre

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

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

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

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

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

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

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

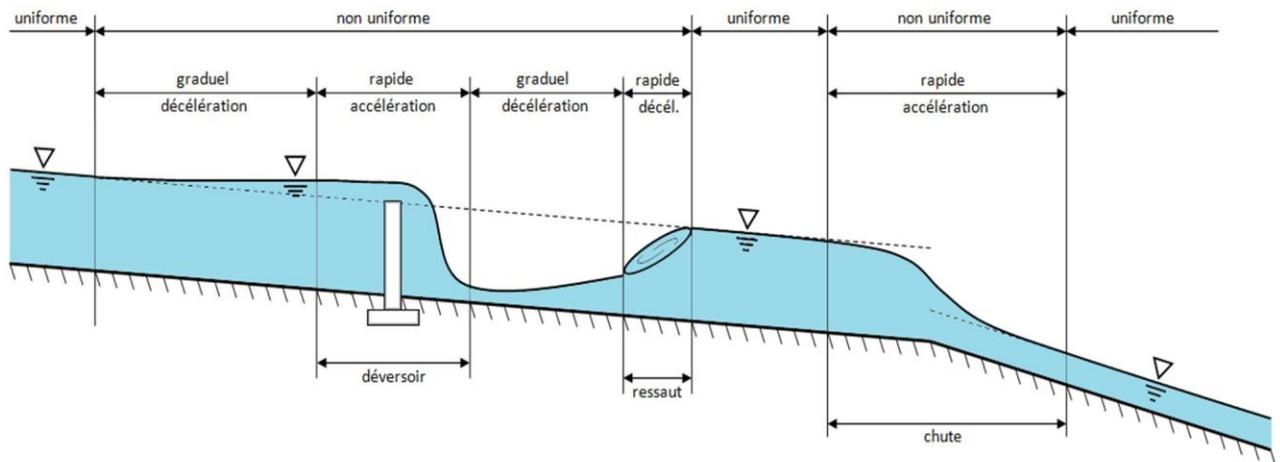


Figure I.1 : Ecoulement à surface libre

I.2. Ressaut hydraulique

I.2.1. Définition

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



Figure I.2 : Ressaut hydraulique (Photo prise par Baptiste MONSION)

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

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

I.2.2. Description du phénomène

D'après Frédéric Murzyn et Hubert Chanson (2009), lorsque le fluide subit une perte importante de vitesse, la surface de l'écoulement s'élève brusquement. L'énergie cinétique est transformée en énergie potentielle et en turbulence, qui se traduit par des pertes irréversibles de charge. Le flot, qui était rapide, ralentit et s'empile sur lui-même à la manière d'une onde de choc supersonique.

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

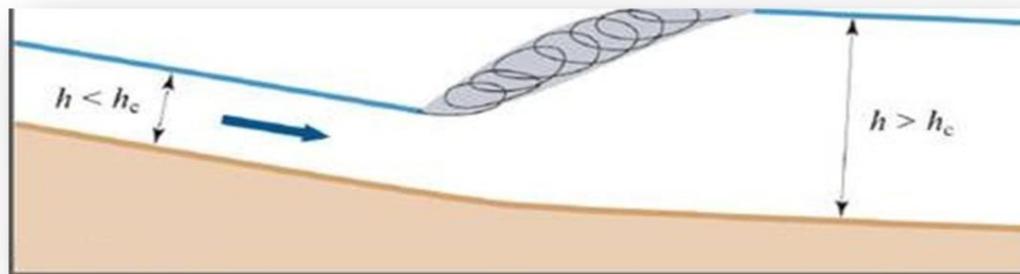


Figure I.3 : Description du ressaut

I.2.3. Apparition des ressauts

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

Ils peuvent aussi se produire dans un évier ou un lavabo, où nous observons la formation d'un ressaut circulaire.

Nous pouvons aussi recréer des ressauts hydrauliques en laboratoire. Ces ressauts dits "classique" se forment dans un canal horizontal, de section rectangulaire et dont le fond est lisse. C'est ce type de ressaut qui sera étudié dans ce document.

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

De façon générale, le ressaut nécessite que certaines conditions soient rencontrées afin qu'il se réalise. Ces conditions sont le respect de l'équation de continuité (I.1) et de l'équation dite "impulsion-quantité de mouvement" (I.2).

I.2.4. Classification des ressauts

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

Pour les valeurs de $F_1 = 1$, le régime est lent, ou critique, et il n'y a pas de ressaut.

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

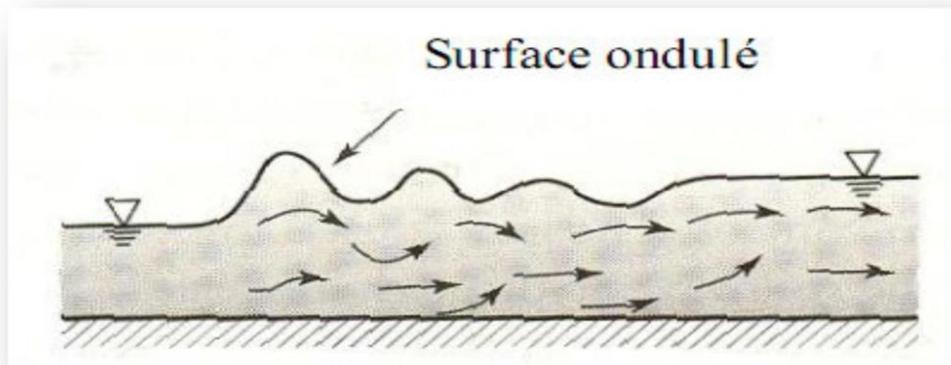


Figure I.4 : Ressaut ondulé

Selon Armando Lencastre, le ressaut hydraulique peut prendre plusieurs formes et approuve la classification de Bradley et Peterka (1957) qui préconisent quatre formes du ressaut hydraulique selon le même principe d'Andersen (1978) :

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

Il se vit lorsque $1,7 < F_1 < 2,5$. Pour un nombre de Froude avoisinant les 1.7, La surface du ressaut est alors composée d'une série de petits rouleaux, ces derniers s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente.

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

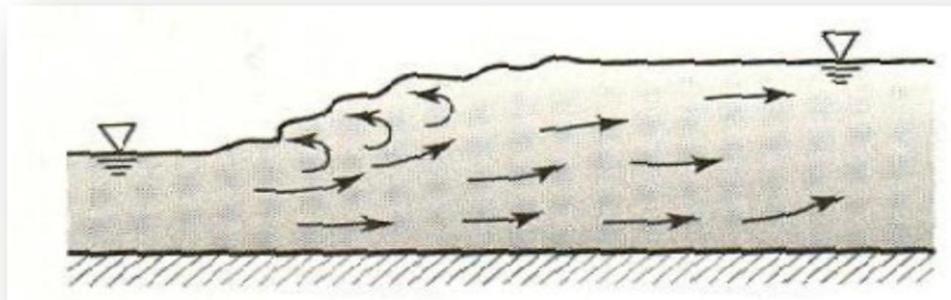


Figure I.5 : Le Pré-ressaut

I.2.4.2. Le ressaut de transition ou oscillatoire

Il est remarqué pour $2,5 < F1 < 4,5$, Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

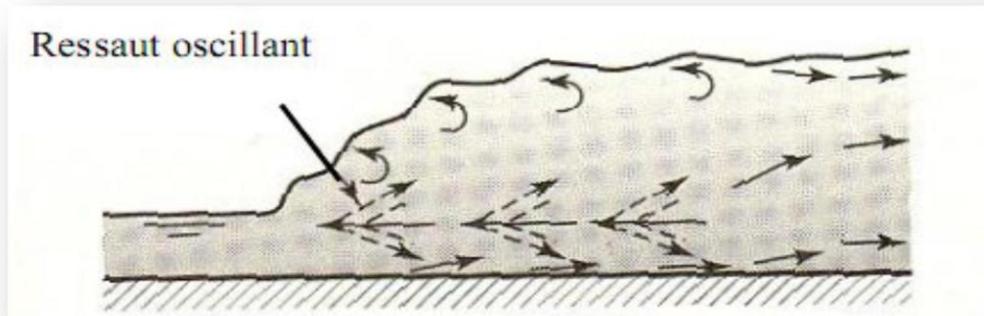


Figure I.6 : Le ressaut de transition

I.2.4.3. Le ressaut stable ou établi

Obtenu pour $4,5 < F1 < 9$, Ce type de ressaut est dit établi et est souvent utilisé dans les bassins de dissipation et ce pour plusieurs raisons, entre autres :

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

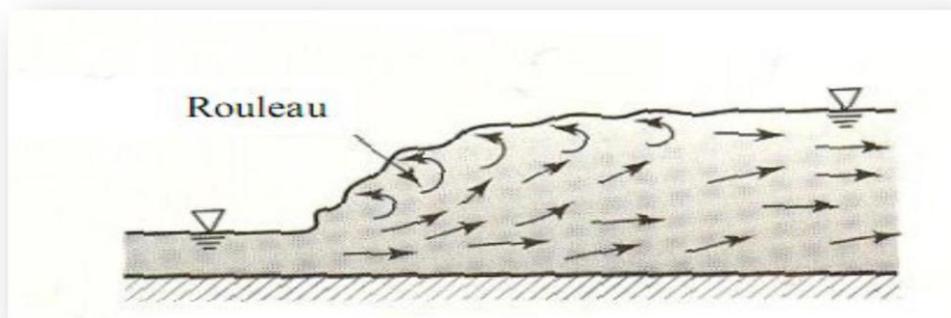


Figure I.7 : Le ressaut stable

I.2.4.4. Le ressaut agité (Fort)

Il sévit pour $F1 > 9$, Il est caractérisé par un écoulement amont ayant une très faible profondeur et une vitesse relativement élevée. Il présente une instabilité verticale du moment qu'il ne peut pas adhérer constamment au fond du canal ainsi qu'une surface libre irrégulière et très écumeuse.

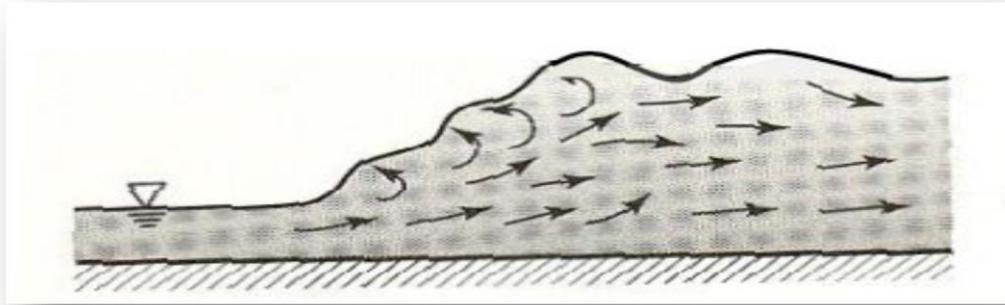


Figure I.8 : Ressaut agité

Remarque

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

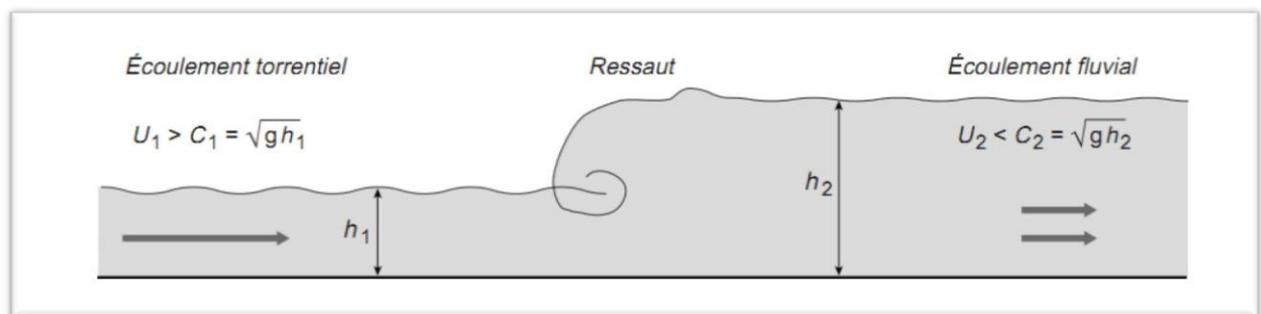


Figure I.9 : Schéma d'un ressaut classique

I.2.5. Caractéristiques du ressaut hydraulique

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

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

I.2.5.1. Hauteurs conjuguées

Les hauteurs conjuguées d'un ressaut sont les profondeurs de la lame d'eau respectivement au début et à la fin du ressaut c'est à dire dans ses sections initiale et finale, avec néanmoins la condition que la hauteur d'eau en amont (première hauteur conjuguée) soit inférieure à la hauteur d'eau aval (respectivement deuxième hauteur conjuguée).

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

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

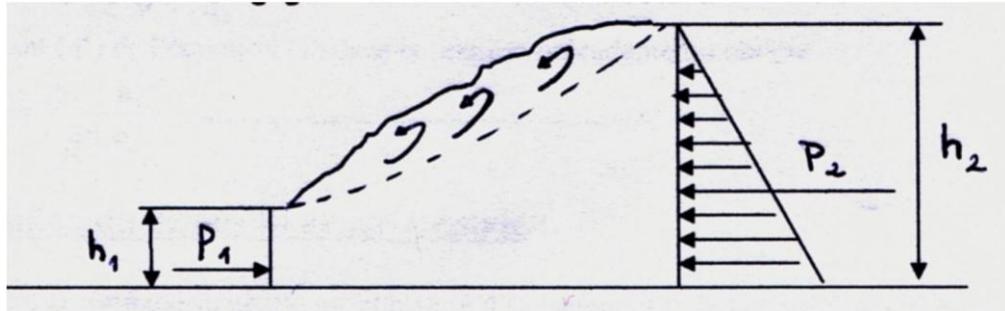


Figure I.10 : Schéma d'un ressaut hydraulique

L'équation de continuité s'écrit :

$$y_1 V_1 = y_2 V_2 \dots\dots\dots(I.1)$$

L'équation d'impulsion-quantité de mouvement s'écrit :

$$\dots\dots\dots(I.2)$$

Avec :

- y_1, y_2 : Sont les profondeurs des centres de gravité des sections 1 et 2
- V_1, V_2 : Vitesses moyennes respectivement à l'amont et à l'aval du ressaut
- S_1, S_2 : Section respectivement en amont et en aval du ressaut
- g : Accélération de la pesanteur : 9.81 (m²/s)
- Q : Débit circulant (m³/s)
- C : Coefficient de quantité de mouvement.

D'après Belanger (1928) et Hager (1980), l'application du théorème d'Euler nécessite quelques hypothèses simplificatrices :

1. La répartition des pressions dans les sections initiale et finale est hydrostatique;
2. La distribution des vitesses est uniforme c'est à dire que la vitesse des filets liquides en amont et en aval du ressaut soit parallèle et égale à la vitesse moyenne dans chacune des sections considérée
3. Les pertes dues au frottement sont négligeables par rapport à la perte de charge créée par la turbulence due au ressaut.
4. La résistance de l'air est négligeable.
5. La pente du canal doit être nulle ou très faible (canal horizontal) de sorte que la projection du poids sur un axe parallèle au fond soit nulle ou négligeable

Ainsi, les forces extérieures appliquées à la masse liquide en mouvement se résument aux forces de pressions hydrostatiques P_1 et P_2 s'exerçant sur les sections 1 et 2.

Puisque la distribution des vitesses est uniforme, le coefficient de quantité de mouvement sera pris égal à l'unité c'est à dire, $C = 1$.

Nous aurons donc :

$$+ = + \dots\dots\dots(I.3)$$

Sachant que le débit représente le produit de la vitesse par la section (Q = V.S) Nous obtenons

$$- + = - + \dots\dots\dots(I.4)$$

En réajustant les paramètres entre eux nous aurons :

$$- = - - - \dots\dots\dots(I.5)$$

La profondeur du centre de gravité peut être écrite en fonction de la hauteur de la section considérée.

Ce qui donne $y_1 = .h$ et $y_2 = .h$.

En remplaçant dans l'équation I.5, et en introduisant le nombre de Froude en amont nous aurons :

$$- . - - = 1 - - \dots\dots\dots(I.6)$$

L'équation (I.6) a été résolue en 1928 par BELANGER , donnant ainsi le rapport des hauteurs conjuguées pour un canal rectangulaire :

$$- = - - 1 + \sqrt{1 + 8} \dots\dots\dots(I.7)$$

C'est l'équation dite de Belanger pour la détermination des hauteurs conjuguées d'un ressaut hydraulique classique sans obstacle en aval

Cette approche a été reprise par Hager (1988) donnant le rapport des hauteurs conjuguées valable pour $Fr_1 > 3$:

$$- = - - + \frac{\quad}{2} \dots\dots\dots(I.8)$$

La validité des ces solutions a été vérifiée par plusieurs auteurs notamment Debabèche et Achour (2007).

Le rapport des hauteurs conjuguées a fait l'objet de nombreuses mesures. La mesure de la profondeur après le ressaut est rendue ardue par les fluctuations de la surface libre d'un ressaut qui se répercutent assez loin en aval de celui-ci. La profondeur en amont du ressaut est stable ; en revanche, sa valeur peut être très faible, ce qui pose un problème de précision de mesure. Des études existent quant à la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude, nous citons notamment Achour (2007).

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

Plusieurs auteurs notamment (Leutheusser & Kartha, 1972), (Resch & Leutheusser, 1971, 1972), (Resch *et al.*, 1976) ont mentionné une tendance des

mesures expérimentales du rapport des hauteurs conjuguées à être légèrement inférieures aux valeurs prévues par la relation de Belanger.

I.2.5.2. Longueur du ressaut

La longueur du ressaut dite L est la distance entre les deux hauteurs conjuguées H_1 et H_2 , de toute évidence, si le début d'un ressaut est relativement facile à identifier, la fin d'un ressaut est très difficile à définir. De nombreux critères ont été proposés par divers auteurs et dont l'avis diverge quant à l'identification de la fin du ressaut, en effet Hager (1990) a conseillé de laisser la position de la fin du ressaut là où l'ébullition de surface disparaît. A ce stade, les poches de bulles d'air remontent à la surface indiquant la fin de la zone de dégazage, de toute évidence, le niveau de turbulence diminue ensuite de manière significative et indique la fin du ressaut. Tandis que Posey et Hsing (1938) qui avaient travaillé sur les canaux trapézoïdaux ont stipulé que la fin du ressaut était compatible avec la diminution des grosses perturbations de la surface libre.

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

Cette valeur n'a pu être évaluée analytiquement, d'où l'utilisation de relations empiriques ou de courbes expérimentales.

Analytiquement parlant, les formules les plus utilisées sont :

- Formule MIAMI DISTRICT : $L = 5.(H_2 - H_1)$
- Formule de SAFRANEZ : $L = 0,45 \cdot H_2$
- Formule de SMETANA : $L = 6.(H_2 - H_1)$
- $L = 9.H_1 \left(\frac{V_1}{\sqrt{gH_1}} - 1,57 \right)$ avec V_1 en /

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

$$\frac{L}{h_1} = 220. \operatorname{Tgh} \left[\frac{F - 1}{22} \right]$$

Ces mêmes essais lui ont aussi permis d'émettre une relation donnant la longueur du ressaut par rapport à la deuxième hauteur conjuguée mais applicable seulement pour $Fr_1 > 4$:

La longueur du ressaut peut aussi être déterminée via des courbes expérimentales indiquant la variation du rapport L/y_1 , L/y_2 ou $L/(y_2 - y_1)$ en fonction de Fr_1 .

Les courbes obtenues par l'U.S. Bureau of Reclamation (Peterka, 1964) sont les mieux connues. Elles donnent le rapport L/y_1 ou L/y_2 en fonction de Fr_1 .

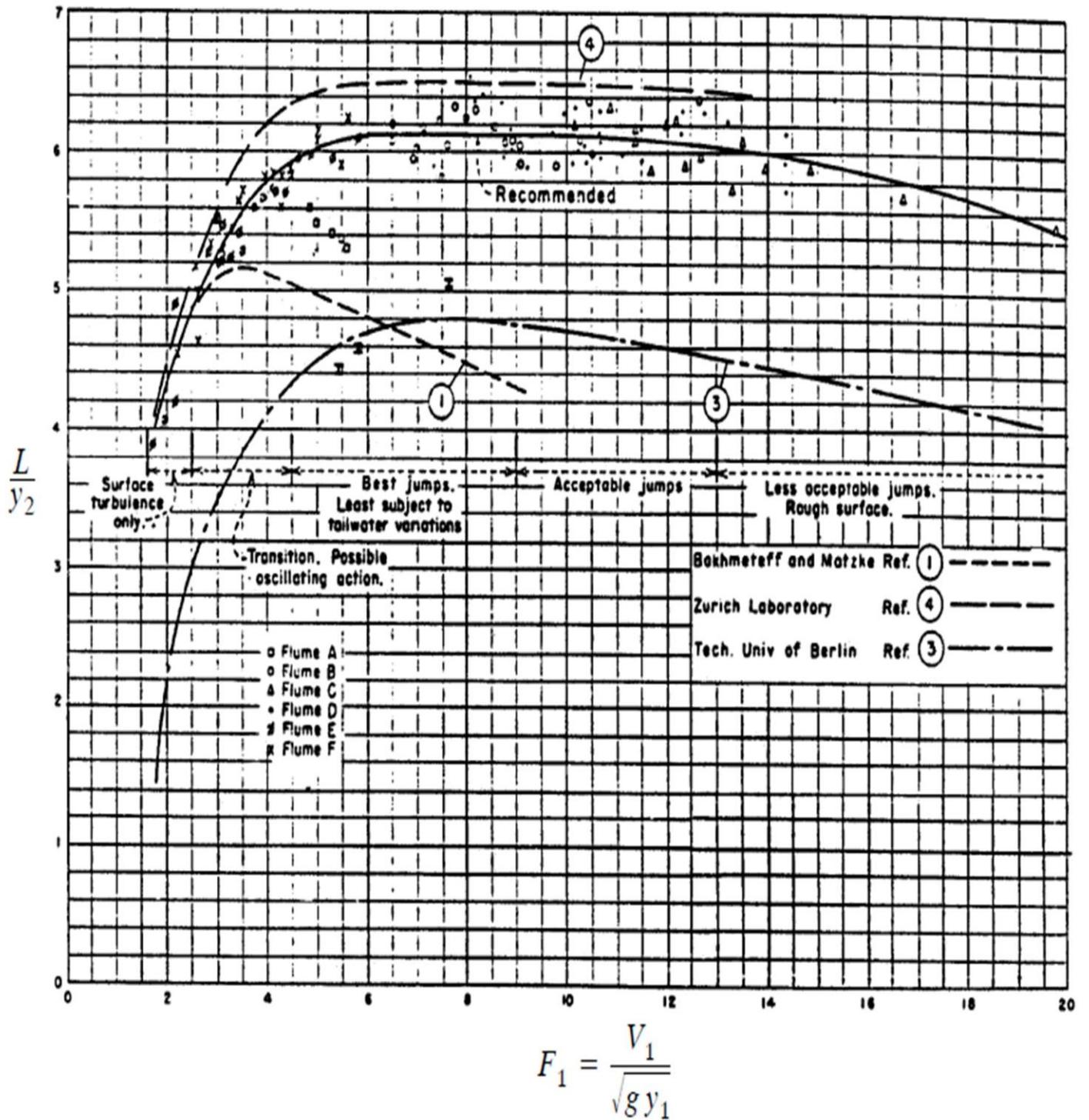


Figure I.11: Courbe expérimentale de l'USBR obtenue par Peterka, 1964 pour la détermination du rapport L/y_2 en fonction de F_1

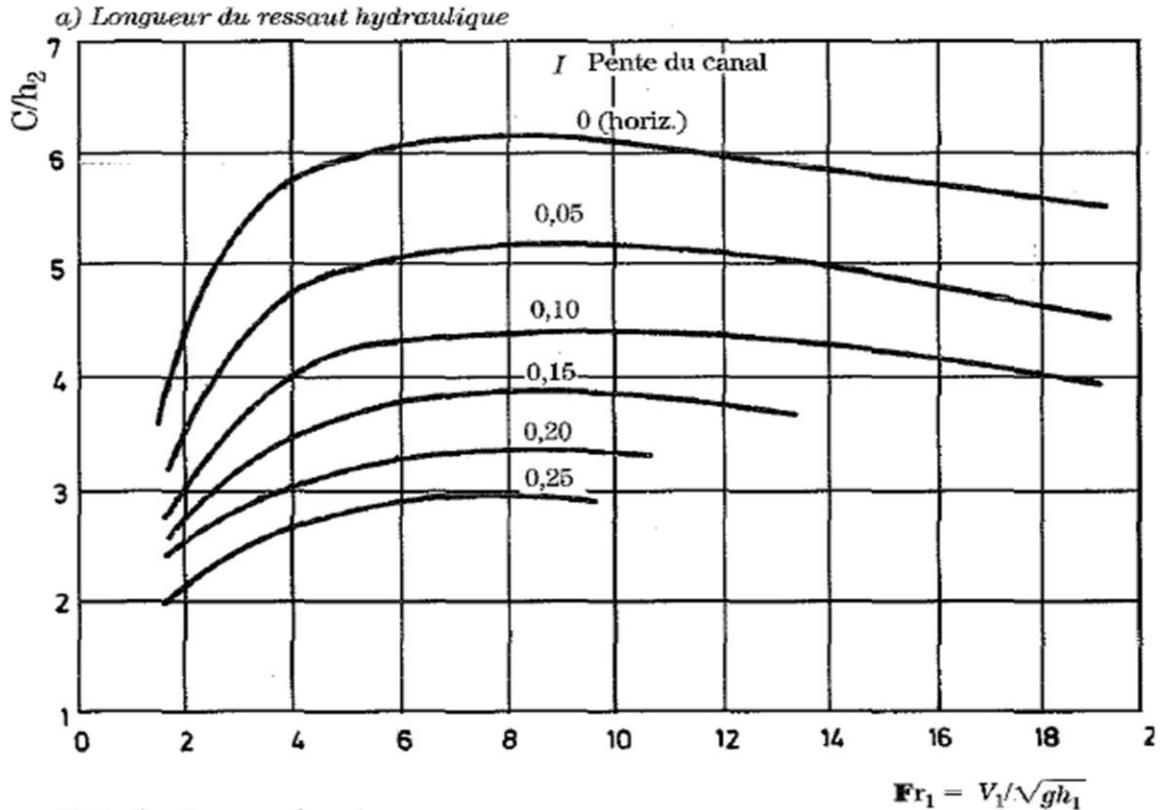


Figure I.12 : Courbe expérimentale pour la détermination de la longueur du ressaut tirée de Lencastre.

I.2.5.3. Dissipation d'énergie

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

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

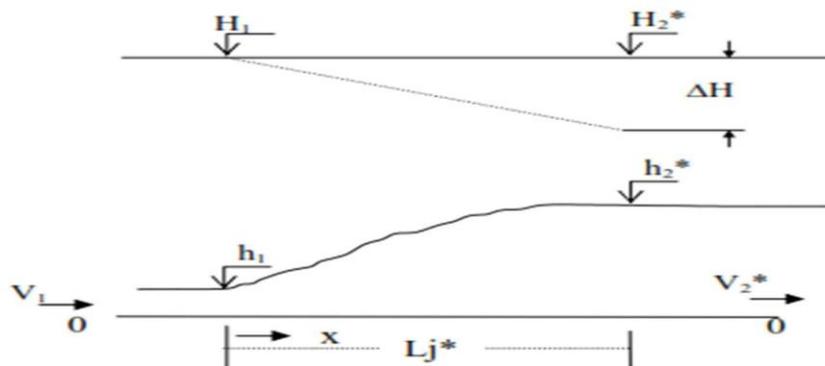


Figure I. 13 : Dissipation d'énergie

Avec :

$$H = h_1 + \alpha_1 \quad \text{et} \quad H = h_2 + \alpha_2$$

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

Nous aurons donc : $\Delta H = h_1 + \alpha_1 - h_2 + \alpha_2$

En raison du caractère permanent de l'écoulement

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \Leftrightarrow S_1 v_1 = S_2 v_2$$

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

$$\Delta H = (h_1 - h_2) + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g}$$

$$\Delta H = (h_1 - h_2) \left[1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right]$$

$$\Delta H = (h_1 - h_2) \left[1 - \frac{h_2^3}{h_1^3} \right]$$

Or d'après l'équation de quantité de mouvement, pour un canal rectangulaire en remplaçant dans l'équation I.5 :

$$h_1 = 2 \cdot y_1, \quad h_2 = 2 \cdot y_2, \quad S_1 = b \cdot h_1, \quad S_2 = b \cdot h_2$$

Nous aurons :

$$h_1 h_2 + h_1 h_2 = \frac{v_1^2}{g} - \frac{v_2^2}{g}$$

Cela permet d'écrire :

$$\Delta H = (h_1 - h_2) + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} = (h_1 - h_2) \left[1 + \frac{v_1^2}{2g(h_1 - h_2)} - \frac{v_2^2}{2g(h_1 - h_2)} \right]$$

$$\Delta H = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g(h_1 - h_2)} + (h_1 - h_2)$$

$$\Delta H = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g(h_1 - h_2)} + (h_1 - h_2)$$

Nous aurons au final :

$$\Delta H = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g(h_1 - h_2)} + (h_1 - h_2) \dots \dots \dots (I.9)$$

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

$$\eta = \frac{E_2}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1}$$

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

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

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

$$\eta = 1 - \frac{1}{\sqrt{2} F_1}$$

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

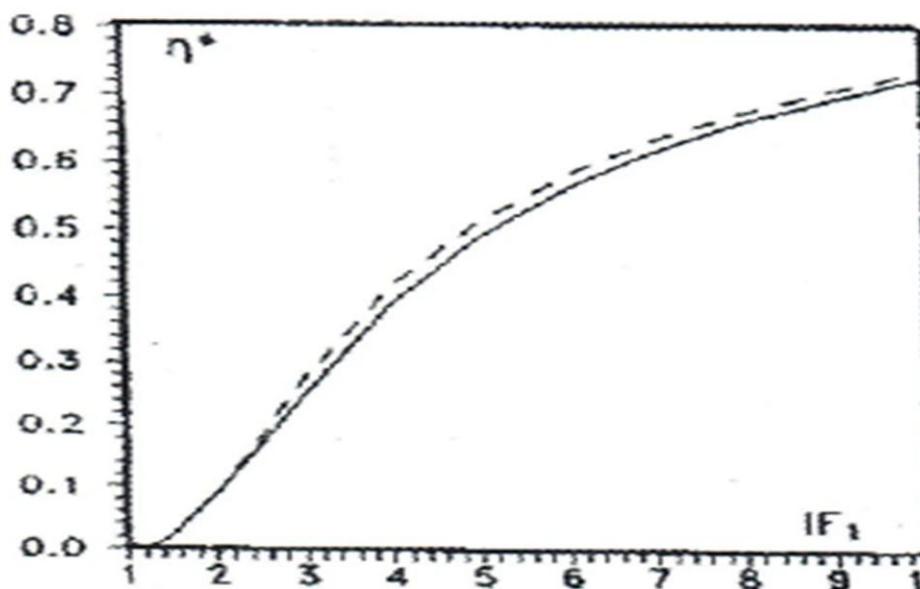


Figure I.14 : Rendement du ressaut en fonction du nombre de Froude amont par Hager

Le rapport E_2/E_1 , peut aussi être évalué de façon graphique par projection du nombre de Froude amont sur la courbe expérimentale obtenue par l'USBR pour la détermination rapide de l'efficacité de dissipation d'énergie.

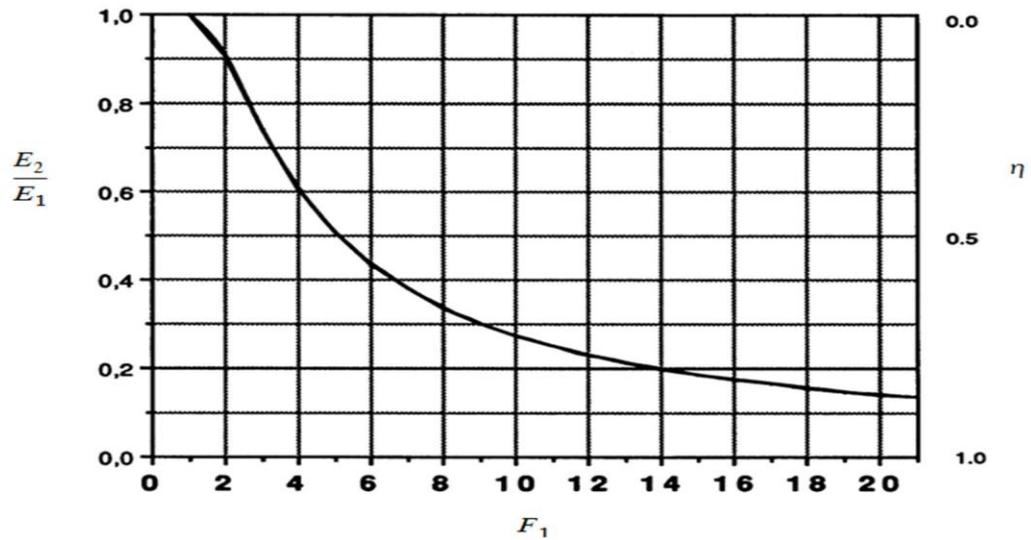


Figure I.15 : Courbe expérimentale obtenue par l'USBR pour la détermination du rapport E_2/E_1 en fonction du nombre de Froude amont

Remarque

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

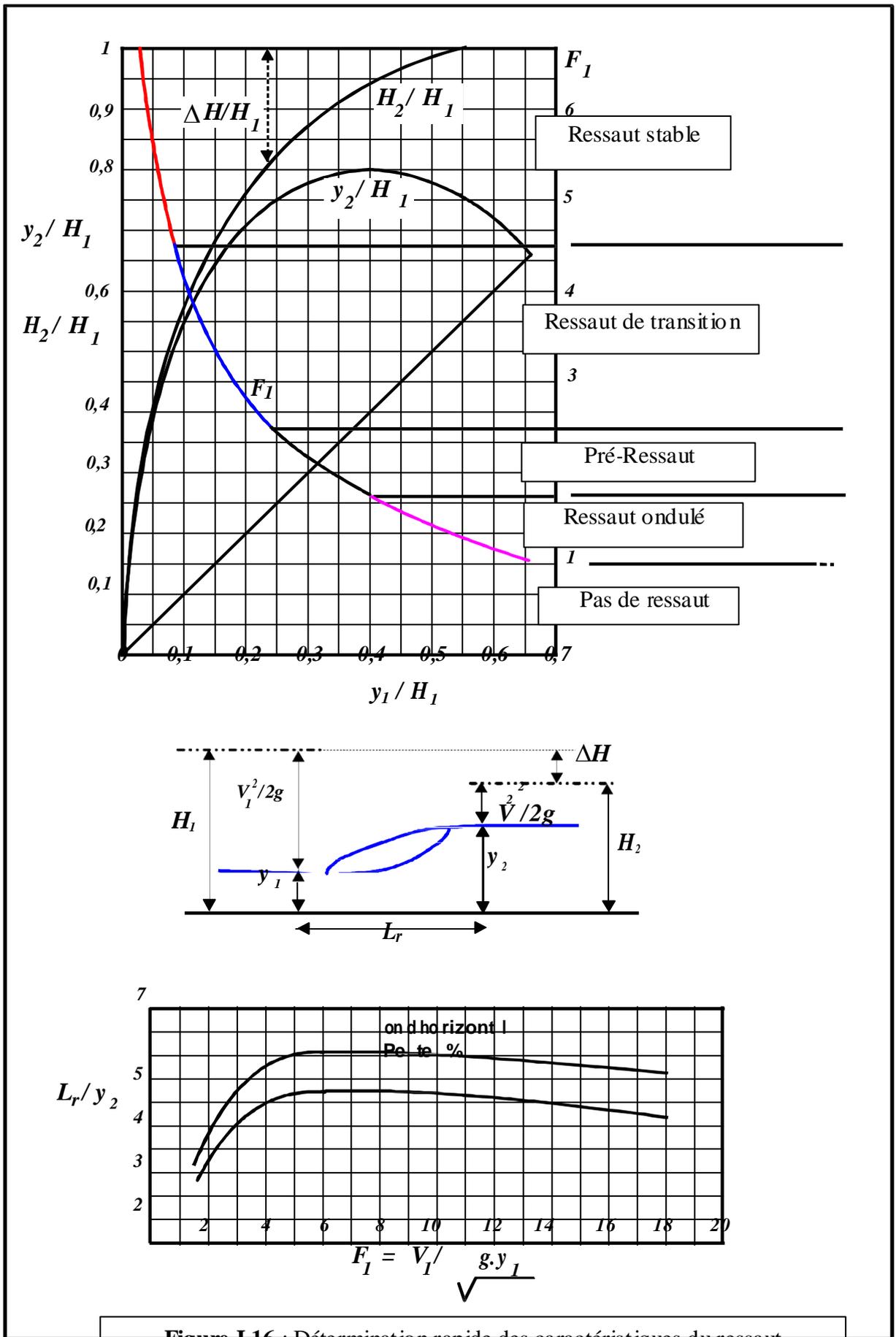


Figure I.16 : Détermination rapide des caractéristiques du ressaut

Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons pu définir le ressaut en tant que phénomène hydraulique à part entière. Nous avons pu décrire le phénomène en question et ses multiples apparitions dans la nature, puis nous nous sommes intéressés à ses différents types à travers une classification issue de plusieurs auteurs notamment Andersen (1978), Armando Lencastre et Bradley et Peterka (1957).

Nous avons aussi pu énuméré et décrire les principales caractéristiques du ressaut qui sont ses hauteurs conjuguées, sa longueur et sa capacité de dissipation d'énergie suivant l'approche de différents auteurs comme Belanger et Hager dont les équations ont été reprises et validées récemment par plusieurs auteurs notamment Debabèche ET Achour, Nous avons aussi proposé des abaques pour la détermination rapide de ces mêmes caractéristiques qui vont nous aider dans un chapitre ultérieure.

Chapitre II :

Ressaut et dissipation d'énergie

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux multiples utilisations du ressaut dans tous les domaines, spécialement en agriculture ainsi que dans le domaine de la valorisation des ressources hydriques, nous allons définir le procédé de dissipation d'énergie et son lien avec le ressaut hydraulique.

Nous allons aussi nous pencher sur la localisation du ressaut ainsi qu'à la recherche de la position précise à partir de laquelle s'effectuera ce phénomène.

II.1. Utilisation du ressaut

Comme nous l'avons mentionné en section (I.2.3.5), le ressaut entraîne une perte d'énergie appréciable, par ailleurs les vitesses à l'aval du ressaut autrement dit en régime fluvial sont très inférieures aux vitesses issues de la section amont c'est-à-dire en régime torrentiel.

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

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

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

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

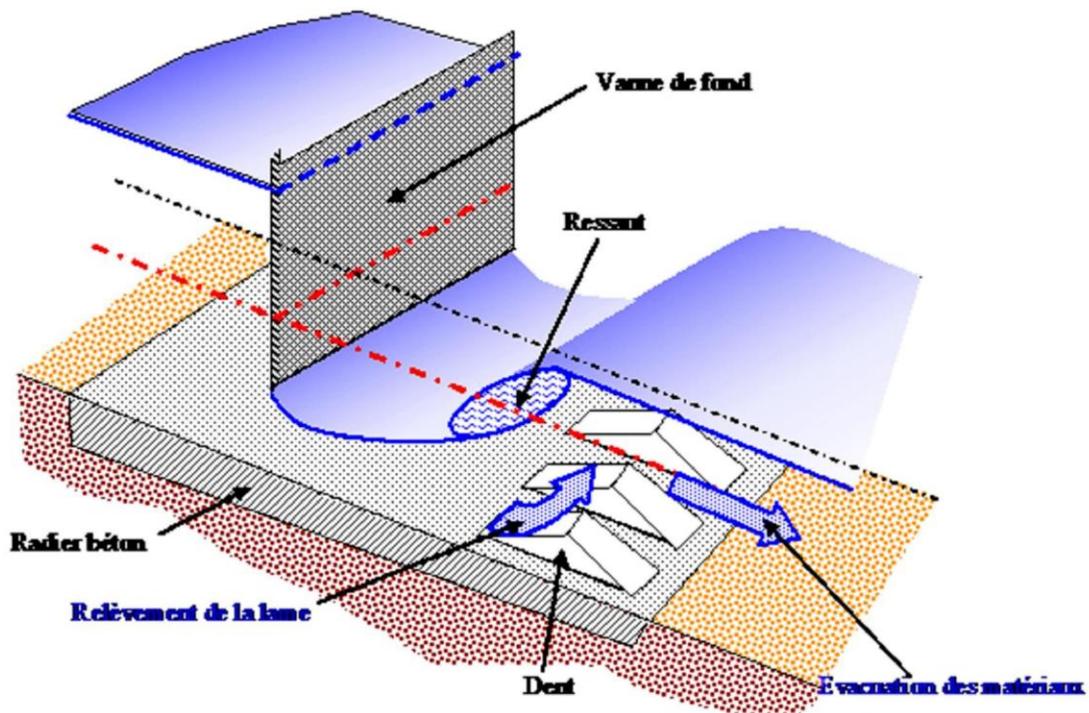


Figure II.1 : Seuil denté de REHBOCK

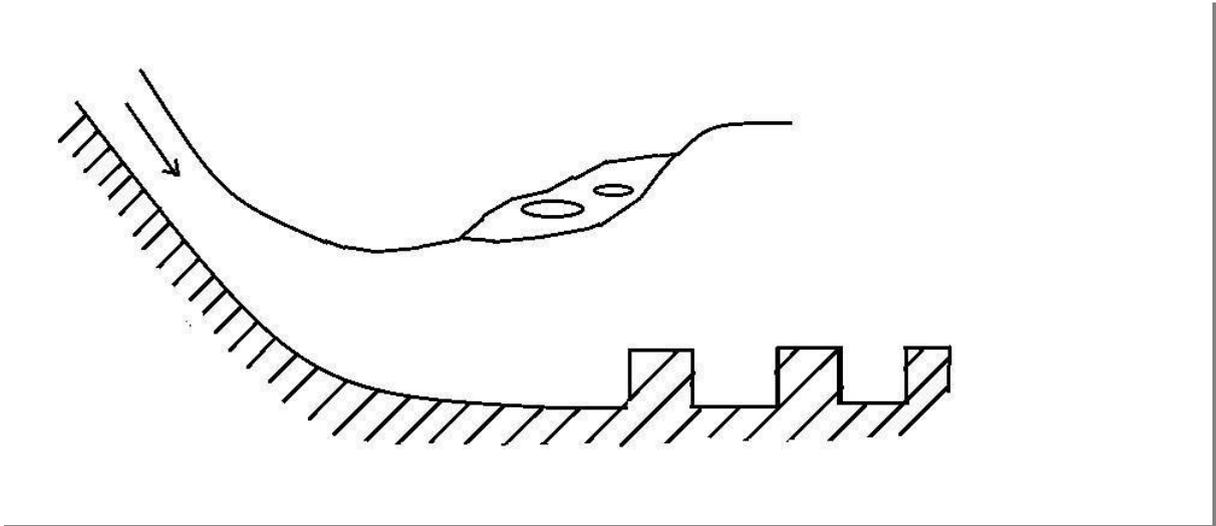


Figure II.2 : Fosse de stabilisation

Par ailleurs, le ressaut obligeant la surface libre à traverser brusquement le niveau critique, réalise de ce fait une sorte de coupure hydraulique entre les deux biefs, en particulier pour un débit et une section de forme donnée, la profondeur critique est imposée. Si la profondeur h_1 est fixée, la profondeur conjuguée h_2 sera unique et donnée par l'équation (I.8).

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

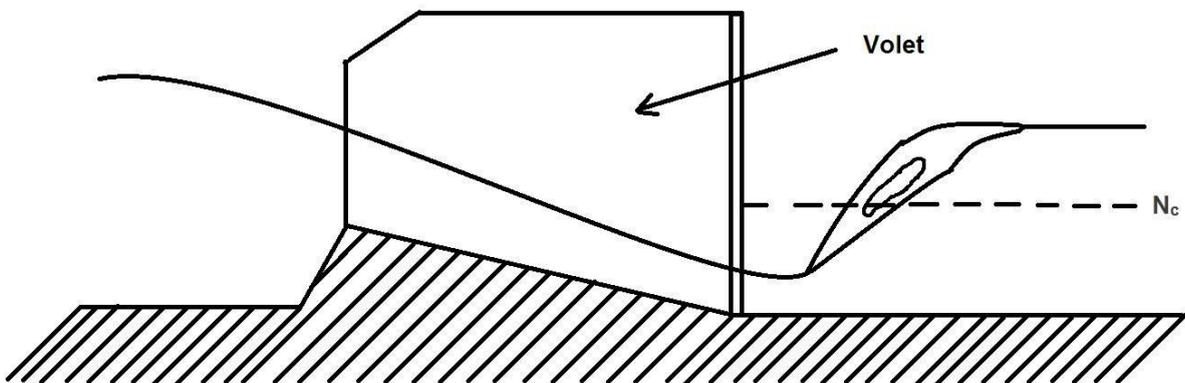


Figure II.3 : Partiteur à ressaut

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

Dans ces conditions, toutes perturbations apportées à l'aval par exemple en modifiant la pente de la rigole provoquent une modification de la ligne d'eau aval et un léger déplacement du

ressaut au droit du volet où se produit la répartition des débits, les débits dérivés ne sont donc pas modifiés.

Nous trouvons une application analogue du ressaut dans le module à masque où la présence d'un ressaut à l'aval du masque réalise la coupure hydraulique qui interdit la fraude.

Le ressaut est aussi utilisé comme mélangeur du fait de son action violente dans les rouleaux qui brassent l'eau avec l'air ou avec un autre fluide contenant des produits chimiques ajoutés par exemple.

II.2. Dissipation d'énergie

II.2.1. Définition

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

II.2.2. Généralités sur le phénomène

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

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

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

Outre ces types, il est également adopté des structures du type saut de ski, chute libre, et jets croisés.

Pour choisir le type de structure de dissipation d'énergie il faut tenir compte de tout un ensemble de facteurs parmi lesquels les plus importants sont : la topographie, la géologie, l'hydrologie, le type de barrage et naturellement les considérations d'ordre économique.

Remarque

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

II.2.3. Types de bassins de dissipation

II.2.3.1. Bassins de dissipation d'impact

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

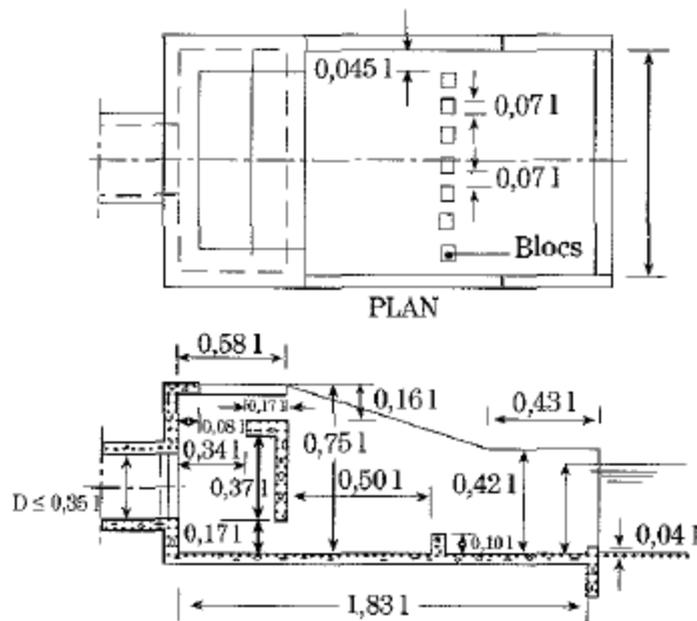


Figure II.4 : Bassin de dissipation par impact

II.2.3.2. Bassins de dissipation par roller ou par buckets

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

- Des buckets Solides ;
- Des buckets avec déflecteurs ;

Dans les buckets solides, l'écoulement à la sortie de la lèvre est entièrement dirigé vers le haut et forme à la surface de l'eau un matelas et deux rouleaux l'un situé sur le bucket et l'autre immédiatement en aval près du lit.

Dans les buckets avec déflecteurs, l'écoulement à la sortie est en partie dirigé vers le haut par les déflecteurs, il passe en partie entre les déflecteurs et est dirigé davantage horizontalement que vers le haut, nous obtenons ainsi une grande dispersion de l'écoulement.

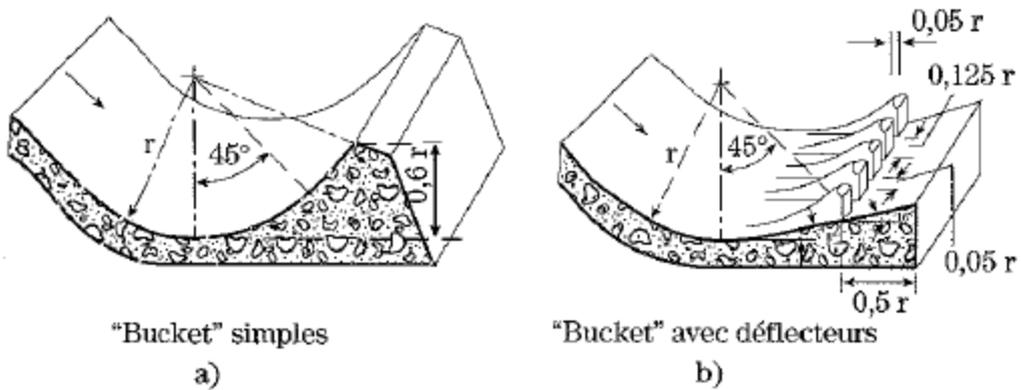


Figure II.5 : Bassin de dissipation par Roller
 a) Bucket simples
 b) Bucket avec déflecteurs

II.2.3.3. Bassins de dissipation par macrorugosité

Elles ont été principalement utilisées dans les canaux, la structure la plus fréquemment adoptée pour ce type est celui correspondant à la Macrorugosité à blocs, leur emploi est limité à de faibles débits par unités de largeur et aux régions où il ne se forme pas de glace et ou nous ne prévoyons pas la présence de corps flottants. La possibilité de cavitation sur les blocs impose une limitation du débit max admissible.

D'après Lencastre, Le débit déversé par unité de largeur "q" ne doit pas dépasser les 5.6 m²/s et la vitesse d'amenée "U" doit être inférieure à la vitesse du régime critique :

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

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

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

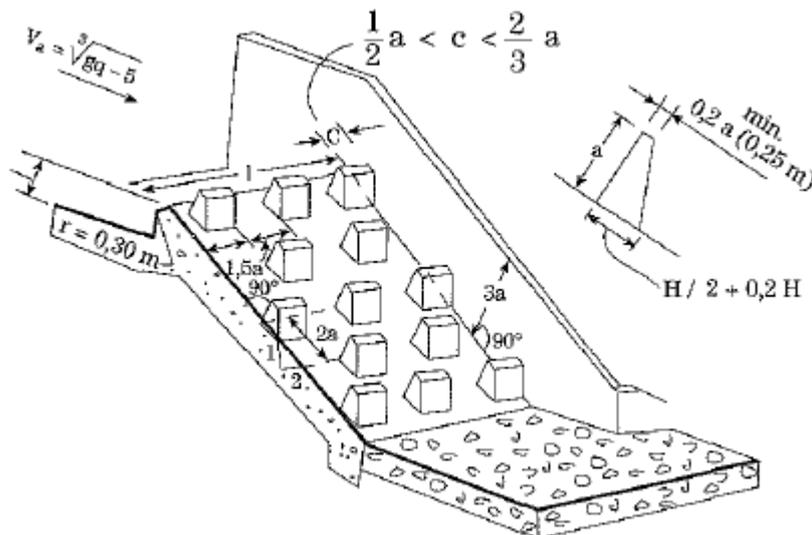


Figure II.6 : Bassin de dissipation par macrorugosité

II.2.3.4. Bassins de dissipation par ressaut hydraulique

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

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

II.2.3.4.1. Bassins à plan rectangulaire et fond horizontal

Ces bassins auront les dimensions nécessaires pour confiner le ressaut formé dans les limites du débit de dimensionnement, il convient d'en vérifier le comportement pour les débits inférieurs, le mode de détermination des profondeurs conjuguées a été exposé en section (I.2.5.1).

La hauteur des murs latéraux est fonction des caractéristiques du ressaut, en particulier des oscillations de la surface libre comme ordre de grandeur de la marge de sécurité à adopter nous pourrions prendre la valeur de $0.25 h_2$.

Ce type de ressaut est utilisé pour des chutes supérieures à 60 mètres et pour des débits par unité de largeur $q > 45 \text{ m}^3/\text{s}$. Le degré de submersion du ressaut dans ce type de bassin devra avoir une valeur de 0.1 soit de 10%, Le ressaut est très sensible à l'abaissement des niveaux aval qui ne pourront en aucun cas être inférieures au niveau conjugué du ressaut.

Pour cela la " United states bureau of reclamations " a préconisé 3 types de bassins :

a) Bassins avec blocs de chute et seuil dentelé (Bassins de type II USBR)

Utilisable pour des chutes inférieures à 65m et des débits par unité de largeur inférieur à $45 \text{ m}^3/\text{s}$ grâce à ce procédé nous pouvons réduire jusqu'à 70 % la longueur du bassin par rapport à celle d'un bassin simple de Type I USBR par exemple, toutefois il ne faut jamais les adopter pour une valeur de $FR_1 < 4.5$.

Le dimensionnement est effectué conformément à la figure (III.4), Ou h_1 représente la profondeur d'eau, FR_1 le nombre de Froude correspondant au régime torrentiel immédiatement en amont du bassin et h_2 la profondeur conjuguée du ressaut en aval donnée par des formules ou des abaques.

Nous recommandons un degré de submergence du ressaut égal à 0.15 au minimum autrement dit la profondeur d'eau en aval devra être supérieur à $1.05 h$.

La longueur "L" du bassin peut être égale à 0.7 fois la longueur du ressaut s'il n'y a ni blocs ni seuil c'est à dire à 0.7 fois la valeur donnée par l'abaque en figure (I.15) et pour une pente du canal égale à $i = 0$.

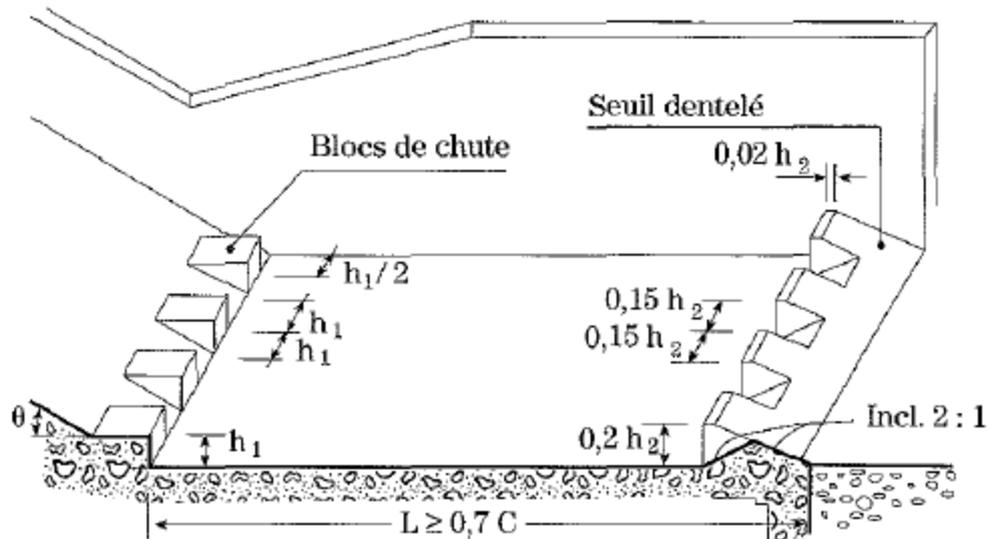


Figure II.7 : Bassin avec blocs de chute et seuil dentelé (Bassin de type II USBR)

b) Bassins avec bloc de chute, blocs d'amortissement et seuil terminal continue (Bassins de type III USBR)

Nous utilisons ce type de bassin quand en amont du ressaut nous avons $U_1 < 18$ m/s et $q < 18$ m²/s, pour des vitesses supérieures, la cavitation pourra se produire sur les blocs d'amortissement, placés comme il est indiqué sur la figure (III.5).

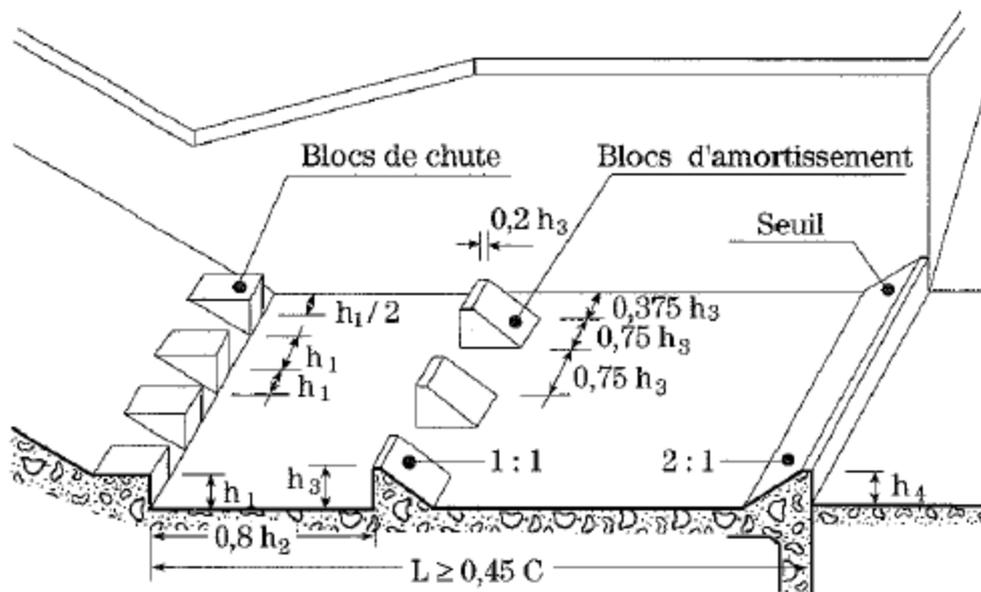


Figure II.8 : Bassin avec bloc de chute, blocs d'amortissement et seuil terminal continue (Bassin de type III USBR)

Les blocs de chute correspondant à la première ligne à partir de l'amont sur la figure (III.5) sont identiques à ceux du bassin de type II (Figure (III.4)), les blocs d'amortissement et le seuil de sortie sont dimensionnés en accord avec l'abaque en (Annexe I).

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

c) Bassins avec déflecteurs et seuil terminal continue (Bassins de type IV USBR)

Ces bassins sont spécialement indiqués dans le cas où le ressaut est oscillant, ce qui arrive quand le nombre de Froude dans la section de première profondeur conjuguée est compris en 2.5 et 4.5. Leur efficacité dans les limites de ces valeurs du nombre de Froude réside dans l'action des déflecteurs qui atténuent d'une manière significative les ondulations. Leur dimensionnement est effectué conformément à la figure (III.6).

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

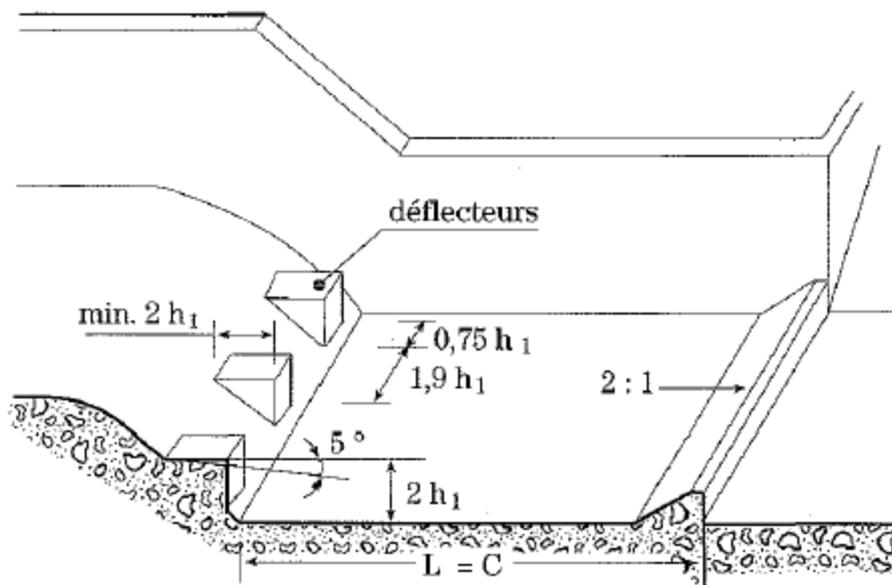
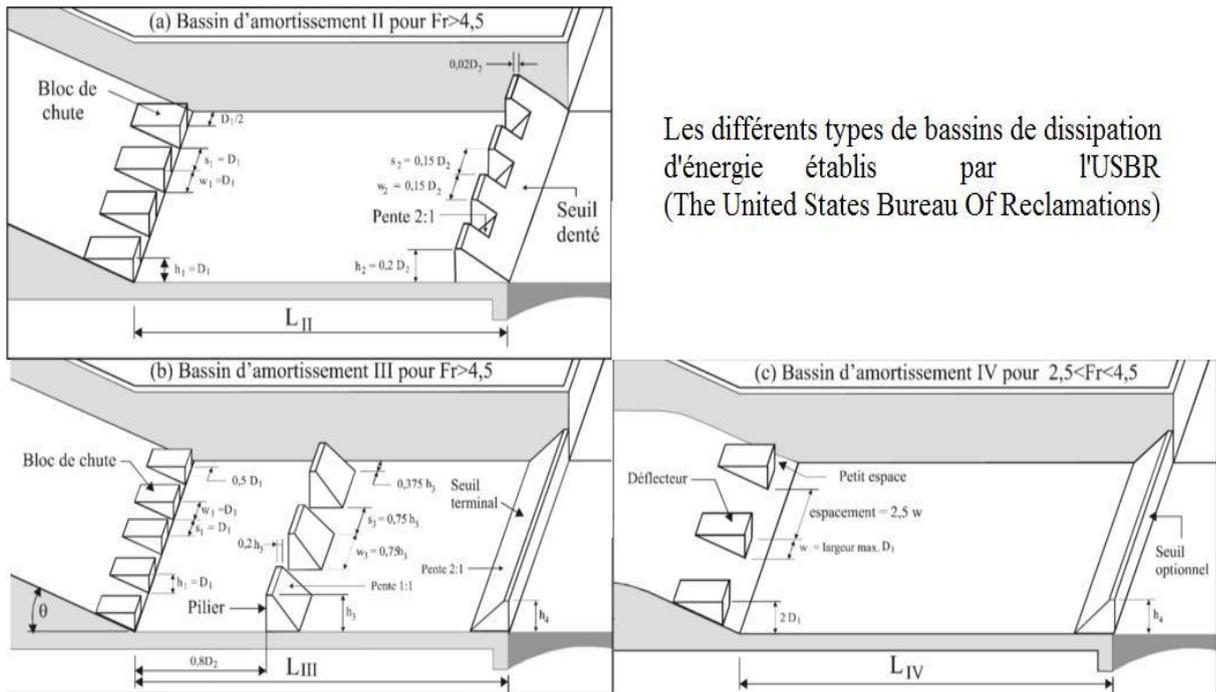


Figure II.9 : Bassin avec déflecteurs et seuil terminal continue (Bassin de type IV USBR)



Les différents types de bassins de dissipation d'énergie établis par l'USBR (The United States Bureau Of Reclamations)

Figure II.10 : Récapitulation des bassins de types USBR

II.2.3.4.2. Bassins à plan rectangulaire, murs verticaux et fond incliné

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

II.3. Localisation et Position du ressaut

D'après Laborde (2007), Le ressaut apparaît lorsqu'une courbe de remous doit traverser le niveau critique pour passer d'un régime supracritique à un régime infracritique. La recherche de la position d'un ressaut a fait l'objet de plusieurs études mais en vain, il n'existe hélas aucune formule empirique permettant la détermination de la position exacte du ressaut, néanmoins la méthode graphique permet de connaître de façon justifiable la position d'un ressaut.

Dans ces conditions, nous pouvons calculer une courbe de remous amont supracritique et une courbe de remous aval infracritique. Le ressaut se produira à une abscisse telle que ses sections limites S_1 et S_2 aient des hauteurs h_1 et h_2 conjuguées et que la longueur soit égale à la longueur "L" estimée empiriquement.

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

a) Cas où il n'y a pas de régime uniforme :

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

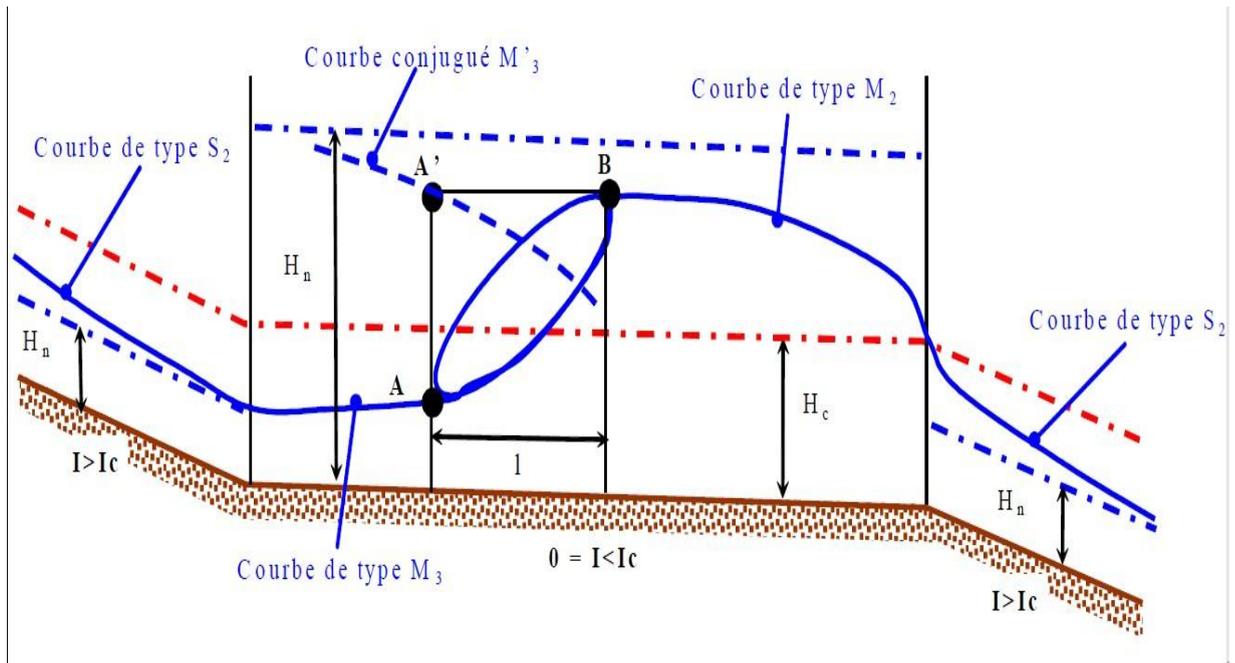


Figure II.11 : Détermination de la position du ressaut

b) Cas où le régime aval est uniforme :

Dans ce cas, Nous connaissons la hauteur d'eau aval, il suffit alors de calculer la hauteur conjuguguée, puis de déterminer d'après la courbe de remous amont, l'abscisse où nous rencontrons cette hauteur.

La connaissance de l'endroit exact où se produit le ressaut après l'ouvrage de contrôle (incliné ou verticale) est très importante. Dans le cas du ressaut libre (cas de notre étude), cette position est déterminée par la hauteur de l'écoulement h_3 du cours d'eau en aval du ressaut. En effet, celui-ci ne peut avoir lieu que si la condition donnée par l'équation (I.8) est respectée. Trois cas peuvent alors se présenter :

a) Si la hauteur de l'écoulement aval h_3 et la hauteur conjuguguée du ressaut h_2 sont égales, alors le ressaut s'effectue immédiatement après l'ouvrage et sa longueur "L" est calculée empiriquement. Ce cas est idéal mais ne peut se présenter (sauf coïncidence) pour tous les débits rencontrés dans un cours d'eau.

b) Si la hauteur h_3 en aval est inférieure à la hauteur conjuguguée du ressaut h_2 , le ressaut se déplace vers l'aval. Ainsi immédiatement après l'ouvrage de contrôle, l'écoulement sera torrentiel et graduellement varié. La hauteur d'eau h_1 avant le ressaut augmentera jusqu'à ce qu'elle respecte l'équation de Bélanger. La hauteur d'eau sera alors $h_1' > h_1$, la vitesse $u_1' < u_1$ et le nombre de Froude sera également plus petit. Connaissant la hauteur d'eau de l'écoulement aval h_3 , nous calculerons la hauteur h_1' à laquelle devrait s'initier le ressaut. À l'aide des courbes de remous et de la valeur de h_1' , la position à laquelle le ressaut s'effectue peut être calculée. Dans ce cas, la longueur totale nécessaire à la réalisation du ressaut est supérieure à celle obtenue dans le premier cas.

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

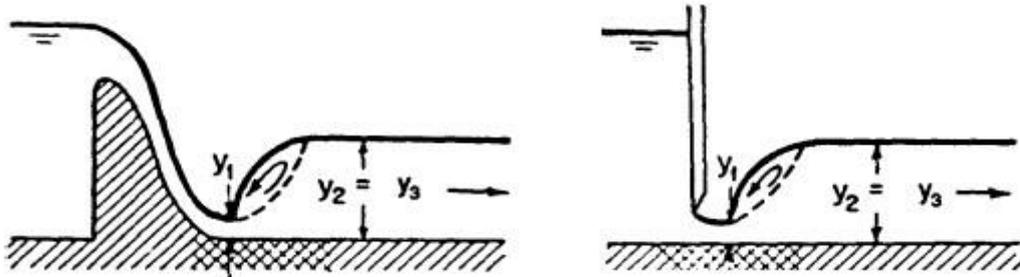
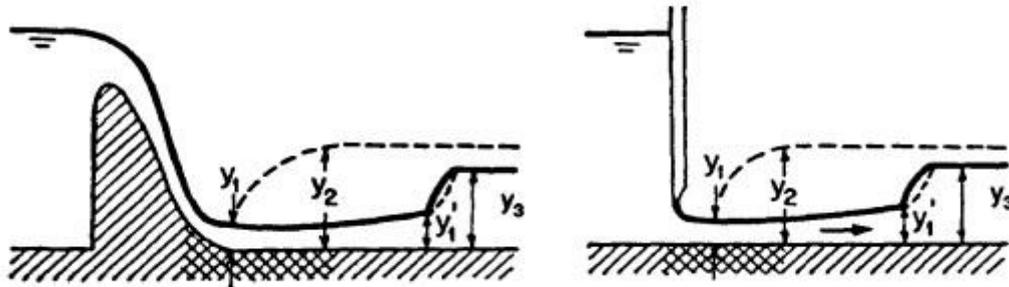
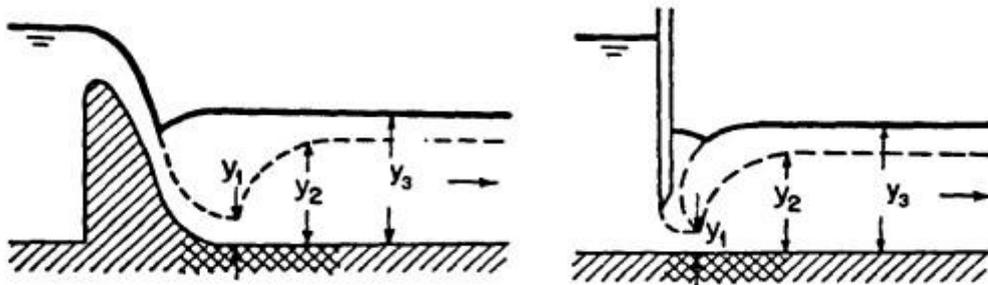
Cas 1 : $y_3 = y_2$ Cas 2 : $y_3 < y_2$ Cas 3 : $y_3 > y_2$

Figure II.12 : Localisation du ressaut

Conclusion

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

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

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

Chapitre III :

Méthodes et matériels

Ce chapitre, a pour objet de donner une brève description du dispositif expérimental utilisé dans cette partie ainsi que de définir le protocole expérimental adopté et ce dans l'optique d'obtenir des résultats concrets et exploitables.

Cette étude expérimentale a pour but de contribuer grâce à un certain nombre d'essais à l'étude de la localisation du ressaut dans les ouvrages hydrauliques, et ce, en adoptant un canal de géométrie rectangulaire.

III.1. Description du dispositif

Nous disposons d'un canal d'essai de marque GUNT Hamburg de type HM 162 (Figure III.1), c'est un dispositif utilisé pour des essais d'envergure sur le thème des écoulements dans des canaux.

Ce dernier Possède une section d'écoulement rectangulaire 450x309 mm par 12.5m de longueur avec un circuit d'eau fermé.



Figure III.1 : Photo du canal d'essai

Ce dispositif possède un système d'ajustage électronique de l'inclinaison qui peut varier de $[-0,5 \text{ à } +2,5\%]$ avec un pas de 0.1 %, La hauteur du vérin de stabilisation est ajustée par le biais d'un entraînement à broche avec moteur d'entraînement électrique, ce système est constitué essentiellement d'un coffret de commande et d'un moteur d'entraînement dont les caractéristiques sont récapitulées dans le tableau ci-après :

Tableau III.1 : Caractéristique du dispositif d'inclinaison

Désignation	Valeur
Puissance du moteur	1.1 KW
Vitesse de rotation	935 min ⁻¹
Rapport de transmission	i = 24:1
Course	0.25 mm/tour / 233 mm/min
Poids	20 Kg

**Figure III.2** : Dispositif d'inclinaison automatique

Le canal est alimenté en amont par quatre (04) réservoirs en matière plastique renforcée de fibres de verre contenant chacun 1100 L et se déverse en aval dans un bac de décharge aussi appelé élément d'entrée, chaque réservoir est de dimensions 2180 x 1000 x 765mm possédant un couvercle en aluminium de 2000 x 1000 x 5 mm et une surface antidérapante.



Figure III.3 : Réservoirs du canal de type Hm160

L'eau est puisée des réservoirs à l'aide d'une pompe de type Aquafirst (Figure III.4) donnant un débit maximal de $132 \text{ m}^3/\text{h}$ avec une hauteur de refoulement maximal de 16 m.c.e, la plage de mesure des débits varie de 5.4 à $130 \text{ m}^3/\text{h}$. Cette pompe possède une vitesse de rotation de 1450 min^{-1} s'accompagnant d'une puissance absorbée de 4 KW.

Tableau III.2 : Caractéristiques de la pompe du banc d'essai

Désignation	Valeur
Types	Aquafirst à 8 ailettes
Débit maximal	$132 \text{ m}^3/\text{h}$
Hauteur de refoulement maximal	16 m
Puissance absorbée	4 KW
Vitesse de rotation	1450 min^{-1}



Figure III.4 : Pompe d'essai du dispositif

Le débit circulant dans le dispositif peut être mesuré à l'aide d'un débitmètre électromagnétique donnant la valeur réelle du débit.



Figure III.5 : Débitmètre électromagnétique

Les parois latérales de la section d'essai sont en verre trempé permettant l'observation optimale des essais. Tous les composants en contact avec l'eau sont fabriqués dans des matériaux résistants à la corrosion (acier inoxydable, plastique renforcé de fibres de verre).

L'élément d'entrée est conçu de telle manière à minimiser les turbulences de l'écoulement à son arrivée dans la section d'essai. Afin de permettre la simulation de chutes et l'ajustage d'un écoulement uniforme ayant une profondeur constante, il est possible d'ajuster en continu l'inclinaison du canal d'essai.

Le dispositif a un poids total d'environ 1950 kg et nécessite pour son fonctionnement une tension de 380 V pour une fréquence de 50 Hz sur un système à 3 phases.

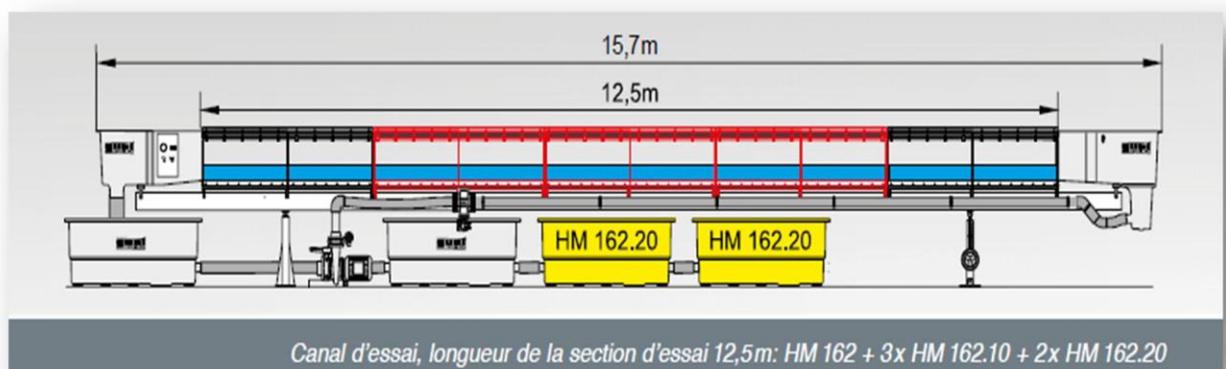


Figure III.6 : Schéma du dispositif expérimental

Le band d'essai peut être commandé à l'aide d'un coffret de commande, il sert à manipuler automatiquement le débit, la fréquence du générateur de vagues, la pompe à sédiment ainsi que le système de trop-plein, et un système d'arrêt qui permet aussi d'arrêter tout le dispositif en cas d'urgence.



Figure III.7 : Coffret de commande du dispositif

Les accessoires dont nous disposons sont consignés dans le tableau ci-après :

Tableau III.3 : Accessoires disponibles avec le canal

Accessoires	Accessoires	Accessoires
Une vanne plane	Une vanne radiale	Un générateur de vagues
Un déversoir à crête arrondie avec mesure de pression	Un déversoir à crête arrondie avec 2 évacuateurs	Un circuit de sédiments fermé ou Piège à sédiments
Un jeu de déversoirs à paroi mince (4 types)	Un support pour instruments	Un alimentateur en sédiments
Un déversoir à seuil épais	Un pilots vibrants	Un jeu de pages
Un déversoir cunéiforme	Un seuil	Un canal trapézoïdal
Un déversoir à siphon	Un passage	Un canal Parshall
Un jeu de dégrilleurs	Un jeu de piles (7 profils)	Un canal Venturi
Une jauge à eau numérique	Un appareil de mesure de vitesse	Un tube de Prandtl
Un manomètre à 10 tubes	-	Une mesure électronique de la pression

Les accessoires sus-cités se vissent au fond de la section d'essai pour plus de stabilité

III.2. Position du problème

Les principales caractéristiques étudiées généralement dans un ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal rectangulaire sont : le débit volumique Q ; la profondeur initiale h_1 , la profondeur finale conjuguée h_2 et la longueur L du ressaut, Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports pouvant servir à indiquer le type de ressaut et sa gamme de variations selon le nombre de Froude F_1 . En vertu des travaux de BRADLEY et PETERKA (1957) concernant les formes du ressaut et ceux de HAGER (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique, nous essaierons d'établir une relation avec la distance de formation du ressaut qui est un paramètre important dans le domaine pratique surtout en ce qui concerne la mobilisation des eaux de surfaces où la position du ressaut revêt un intérêt énorme pour la détermination de la longueur de protection des berges contre l'érosion provoquée par un ressaut en aval de la digue ou de l'évacuateur de crue. Il est primordial de vérifier à l'issue de cette expérimentation la relation de BELANGER qui est tirée du développement théorique du théorème d'EULER.

III.3. Protocole expérimental

La partie expérimentale de cette étude s'est déroulée en trois (03) parties :

- Etude du ressaut en aval d'une vanne plane sans obstacle en aval.
- Etude du ressaut en aval d'une vanne plane avec utilisation de seuils dentés
- Etude du ressaut en aval d'un déversoir.

III.3.1. Etude du ressaut en aval d'une vanne plane sans obstacle en aval

Cette première expérience dédiée à l'étude du ressaut en aval d'une vanne plane, a pour but d'essayer de trouver une relation entre la distance de formation du ressaut et la hauteur d'eau en amont de la vanne.

Les vannes planes sont utilisées généralement pour garantir une profondeur d'évacuation minimum de l'eau en amont en cas de débit variable. Pour cela nous avons utilisé une vanne plane de type GUNT, ayant les dimensions $L \times l \times h$: 370 x 263 x 710 mm pouvant s'ouvrir jusqu'à 15 cm à l'aide d'une roue manuelle et pesant environs 5 kg.



Figure III.8 : Vanne plane

Cette première partie débute par le nettoyage du canal et l'élimination de toute substance externe au dispositif. Plusieurs autres étapes se succéderont par la suite notamment le Branchement du banc d'essai au système électrique ainsi que le réglage de l'inclinaison et l'établissement d'une pente nulle.

Dans cette expérience, nous allons jouer sur l'ouverture de la vanne jumelée avec une variation du débit, nous avons proposé donc de fixer l'ouverture de la vanne à 1 cm puis faire varier le débit de 3 à 110 m³/h avec un pas fixe de 3 m³/h, cela va nous permettre de visualiser de façon adéquate le ressaut hydraulique.

Pour chaque série de mesure nous allons donc jauger à l'aide des prises de mesure :

- La hauteur d'eau en amont de la vanne
- Les deux hauteurs conjuguées
- La longueur du ressaut
- La distance de formation du ressaut

Une fois l'expérience achevée pour la première ouverture, l'ouverture sera changée successivement de 1 à 10 cm avec un pas fixe de 1 cm et toute la série de débit sera refaite.

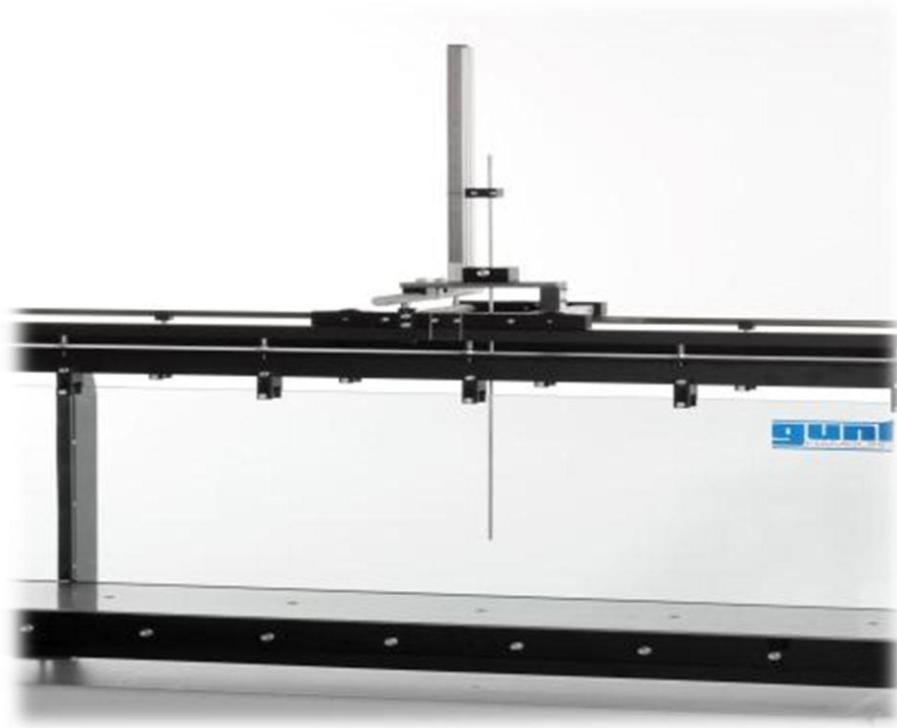


Figure III.9 : Appareil de jaugeage

Donc pour cette première partie, le mode opératoire va s'effectuer de la manière suivante :

- 1) Vérifier l'appareillage et nettoyer le canal.
- 2) Brancher le dispositif au système électrique.
- 3) A l'aide de la commande automatique de l'inclinaison, Nous donnerons une pente nulle au canal pour qu'il soit parfaitement horizontal
- 4) Mettre en marche la pompe qui aspirera l'eau des réservoirs pour la refouler dans le canal.
- 5) Mettre en place une vanne de fond dont la hauteur est réglable.
- 6) Fixer la hauteur de la vanne de fond à 1 cm.
- 7) faire varier le débit successivement de 3 à 105 m³/h pour la même hauteur de la vanne.
- 8) Pour chaque débit, mesurer à l'aide de l'appareil de jaugeage les hauteurs conjuguées, la longueur du ressaut et la distance à partir de laquelle le ressaut prend effet et la hauteur d'eau en amont de la vanne.
- 9) Faire varier la profondeur de la vanne de fond par pas fixe de 1 à 10 cm et refaire la manipulation pour la même série de débits et prendre les mêmes mesures.
- 10) Consigner les résultats dans un tableau.

III.3.2. Etude du ressaut en aval d'une vanne plane avec utilisation de seuils dentés

Lorsqu'un écoulement supercritique se trouve juste après un ouvrage de contrôle, il est très chargé en énergie, et peut donc provoquer des dommages sur le fond du canal. Les seuils dentés permettent de dissiper cette énergie cinétique, ce qui a un effet sur la position du ressaut, c'est dans ce cadre que s'inscrit cette seconde expérience, en effet suite à la première

expérience réalisée sans obstacle en aval de la vanne, nous voudrions voir l'influence des seuils dentés sur la position du ressaut.

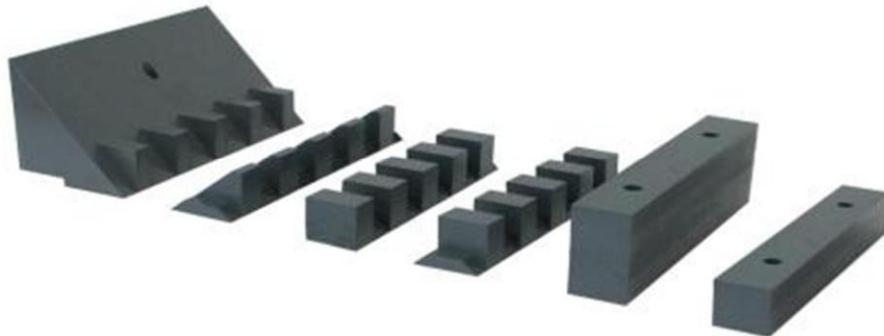


Figure III.10 : Jeu de seuils

Pour se faire, le même protocole expérimental que la première expérience sera maintenu à l'exception de l'ajout de deux seuils dentés en aval. Ces derniers auront les dimensions $L \times l \times h$: 304 x 50 x 55 mm avec des dents de 30x40mm

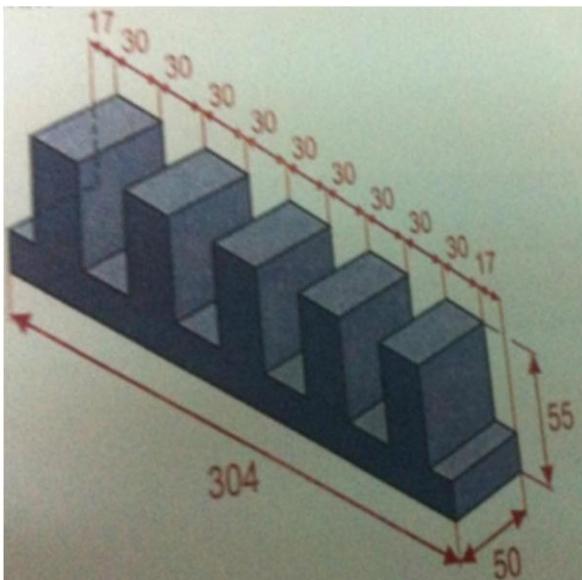


Figure III.11 : Seuil denté n°1

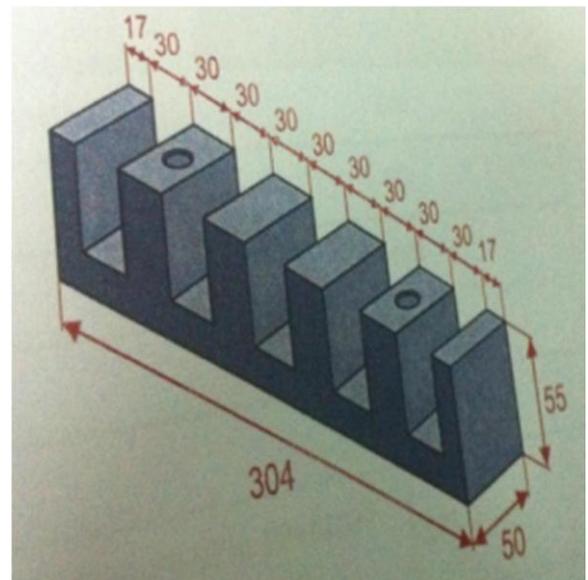


Figure III.12 : Seuil denté n°2

Ces seuils sont placés sur une plaque de base pourvue d'alésages espacés de 5 cm, les seuils y sont fixés pour éviter d'être emportés par le mouvement de la masse liquide.

La plaque de base a été installée à 709 cm de la vanne de manière à bien observer l'influence des seuils sur le ressaut, tandis que le premier seuil est placé sur une distance de 721 cm et l'autre à 757 cm de la vanne.

III.3.3. Etude du ressaut en aval d'un déversoir à crête arrondie sans obstacles en aval

Cette dernière expérience dédiée à l'étude du ressaut en aval d'un déversoir, a pour but d'essayer de trouver une relation entre la distance de formation du ressaut et la hauteur d'eau en amont du déversoir ainsi que de déceler la différence avec la première expérience issue du montage d'une vanne plane.

Les déversoirs à crête arrondie sont des déversoirs fixes qui font partie des ouvrages de contrôle. Les contours extérieurs du déversoir ont plus ou moins la forme d'un triangle, son dos est conçu de manière à favoriser l'écoulement, afin d'atteindre un débit Q maximum.

Pour cela nous avons utilisé un déversoir à crête arrondie de type GUNT ayant les dimensions $L \times l \times h : 620 \times 304 \times 430$ mm et ayant un poids de 15kg.



Figure III.13 : Déversoir à crête arrondie

Dans cette expérience, nous allons considérer deux facteurs qui seront le débit et la pente. Nous commencerons à pente nulle, le débit sera varié de 2 à 110 m^3/h avec un pas fixe de 2 m^3/h , pour chaque débit les mesures suivantes vont être prises :

- La hauteur d'eau avant le déversoir ;
- Les hauteurs conjuguées du ressaut ;
- La longueur du ressaut ;
- La distance de formation du ressaut ;

Une fois la série de mesure achevée à pente nulle, la pente va être changée successivement à 0.1 et 0.2 % avec toute fois répétition des mesures.

Une fois les trois expériences terminées, la pompe à eau et le dispositif d'inclinaison seront éteints, le canal nettoyé et l'alimentation électrique retirée.

Pour cette troisième partie, le mode opératoire suivie sera différents tu premier uniquement du point de vue appareillage, en effet ce mode opératoire sera comme suit :

- 1) Vérifier l'appareillage et nettoyer le canal.
- 2) Installé un déversoir a crête arrondie.
- 3) Donner une pente nulle au canal
- 4) Mettre en marche la pompe qui aspirera l'eau des réservoirs pour la refouler dans le canal.
- 5) faire varier le débit successivement de 2 à 110 m³/h.
- 6) Pour chaque débit, mesurer a l'aide de l'appareil de jaugeage les hauteurs conjuguées, la longueur du ressaut et la distance a partir de laquelle le ressaut prend effet et la hauteur d'eau en amont du déversoir.
- 7) Une fois la première série terminée, Faire varier la pente du canal a 0.1 puis 0.2 % et refaire la manipulation pour la même série de débits et prendre les mêmes mesures.
- 8) Consigner les résultats dans un tableau.

Conclusion

A travers ce chapitre matériels et méthodes, nous avons expliqué le dispositif utilisé dans l'étude expérimentale du ressaut hydraulique en détails ainsi que tous ces composants avec illustrations. Nous avons développé le protocole expérimental pour les trois expériences réalisées dans cette étude à savoir :

- L'étude du ressaut en aval d'une vanne plane sans obstacle en aval
- L'étude du ressaut en aval d'une vanne plane avec des seuils dentés en aval
- L'étude du ressaut en aval d'un déversoir à crête arrondie sans obstacle en aval

Ces expériences vont nous permettre d'acquérir des résultats concrets et valides que nous pourrons par la suite analysé et discuté en vue de contribuer a la localisation du ressaut hydraulique, l'analyse de ces mêmes résultats fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV :

Résultats et discussions

A l'issus de toute étude, expérimentale soit-elle ou théorique, l'exposition des résultats demeure le point fort que le lecteur se voit d'apprécier. Nous voici au terme de notre travail, avec ce chapitre qui lèvera le voile sur les résultats que nous avons trouvé tout au long de notre expérimentation.

Ce chapitre sera divisé en deux grandes parties, la première partie concernera l'analyse des résultats obtenus comparativement aux formules théorique tandis que la seconde sera pour le traitement des résultats par l'établissement d'équations servants d'approche et la comparaison avec la méthode graphique des courbes de remous.

IV.1. Analyse des résultats

L'analyse des résultats est une étape très importante dans toutes études expérimentale, en effet elle consiste en la comparaison des résultats obtenus expérimentalement avec l'approche théorique du phénomène en question, et ce dans le but de connaître si les résultats sont exploitable ou non a travers le pourcentage d'erreur qu'il y a entre les résultats obtenus expérimentalement et ceux trouvé théoriquement.

Dans ce document, nous allons comparer les résultats obtenus par rapport à l'approche théorique du ressaut hydraulique issu de plusieurs auteurs.

En premier lieu, nous allons comparer la deuxième hauteur conjuguée h_2 avec celle obtenu théoriquement par l'équation de Belanger (équation (I.8)). Ensuite, nous allons comparer la longueur du ressaut trouvée expérimentalement avec celle donnée par les formules empiriques cités en section (I.2.5.2) notamment celle de SAFRANEZ ou SMETANA.

En dernier lieu nous allons identifier le type de ressaut a travers le calcul du nombre de Froude en amont du ressaut FR_1 et bien entendu déterminer la perte d'énergie et le rendement de dissipation et ce pour chaque série de mesure.

Remarque

La figure IV.1 illustré ci-dessous est un schéma explicatif mettant en relief les notations utilisées dans les tableaux qui vont suivre pour les cas 1 et 2, le troisième cas quant a lui se voit d'être différent uniquement par rapport a la nature de l'ouvrage de contrôle, c'est a dire que pour le troisième cas, la vanne de fond sera remplacée par un déversoir a crête arrondie.

Dans ce qui suit les notations :

H_1 , H_2 et H_{amont} représentent respectivement les hauteurs en amont, en aval du ressaut et en amont de l'ouvrage de control.

L , D et Fr_1 représentent respectivement la longueur, l'éloignement du ressaut et le nombre de Froude en amont.

ΔE , ΔH_2 et ΔH représentent respectivement l'énergie dissipée, le pourcentage d'erreur sur la deuxième hauteur du ressaut et le pourcentage d'énergie dissipée.

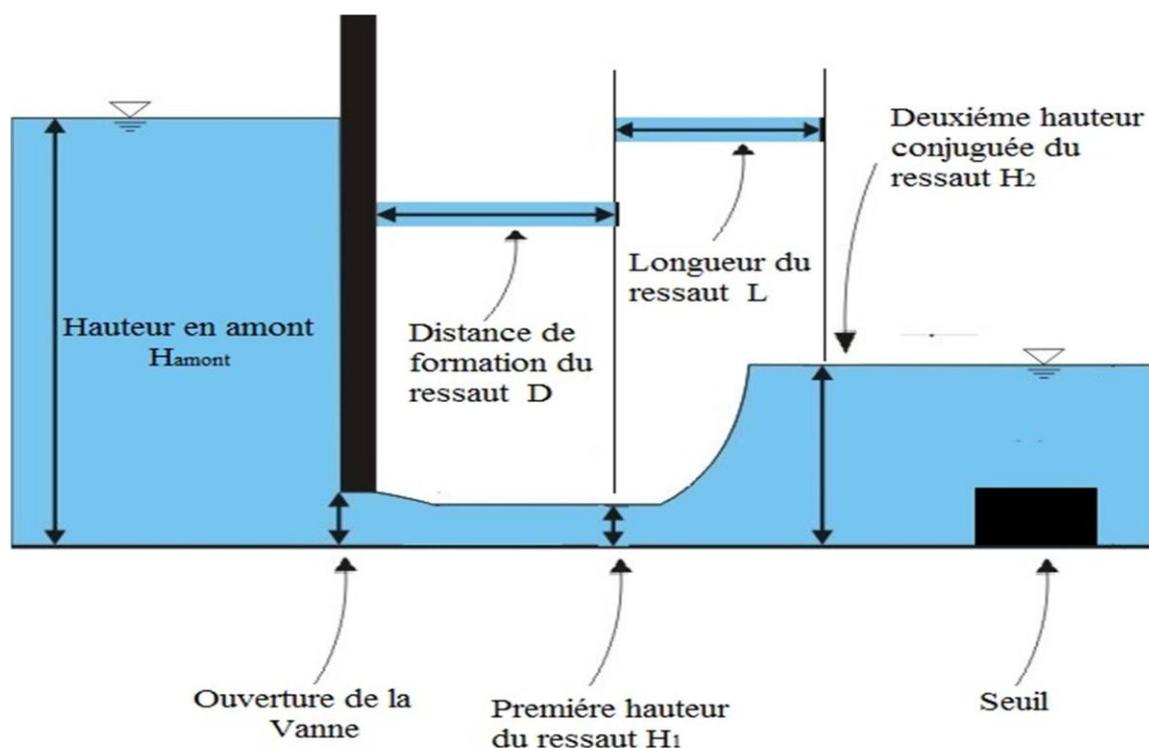


Figure IV.1 : Schéma explicatif des cas traités

IV.1.1. Cas de la vanne de fond sans obstacles en aval

IV.1.1.1. Exposition des résultats

Les résultats obtenus pour le premier cas sont consignés dans le tableau ci-après

Tableau IV.1 : Résultats des essais pour le cas de la vanne de fond sans obstacle en aval

Ouverture De vanne (cm)	Essais	Débit (m^3/h)	H_1 (Cm)	H_2 (Cm)	H_{amont} (Cm)	L (Cm)	D (Cm)	FR_1	Type De Ressaut
1	1	12	0,8	4,6	12,7	64,9	76	4,81	Ressaut Stable
1	2	15	1	5	19,8	69,2	119	4,31	R. Oscillatoire
1	3	18	1,5	4,7	28,6	53,5	300	2,81	R. Oscillatoire
2	1	18	1,1	5,9	9,5	63,4	27	4,48	R. Oscillatoire
2	2	21	1,5	5,7	11,6	58,0	94	3,28	R. Oscillatoire
2	3	24	1,6	6	15,6	59,8	204	3,40	R. Oscillatoire
2	4	27	2,2	5,7	19,4	51,6	314	2,37	Ressaut faible
2	5	36	2,6	5,8	24,6	48,9	435	2,05	Ressaut faible
2	6	33	2,9	5,8	29,6	46,2	568	1,92	Ressaut faible
2	7	36	3,3	5,9	36,4	43,5	727	1,72	Ressaut faible

IV.1.1.2. Analyse et comparaison des résultats

L'analyse des résultats du premier cas sont illustrés dans le tableau qui suit :

Tableau IV.2 : Analyse des résultats des essais de la vanne de fond sans obstacle en aval

Ouverture De vanne (cm)	Débit (m ³ /h)	H ₂ Experi (Cm)	H ₂ théori (Cm)	L Experi (Cm)	L Smetana (Cm)	L Safranez (Cm)	L District (Cm)	ΔE en (C.C.E)	ΔH ₂ en (%)	ΔH en (%)
1	12	4,6	5.06	64,9	27,55	20,7	22,96	3,73	9,1	37,05
1	15	5	5.61	69,2	29,94	22,5	24,95	3,20	10,9	31,17
1	18	4,7	5.26	53,5	28,11	21,15	23,43	1,16	10,7	15,61
2	18	5,9	6,44	63,4	28,8	26,55	24	4,26	8,4	35,12
2	21	5,7	6,25	58,0	25,2	25,65	21	2,17	8,8	22,63
2	24	6	6,94	59,8	26,4	27	22	2,22	7,8	24,84
2	27	5,7	6,37	51,6	21	25,65	17,5	0,85	9,0	10,88
2	36	5,8	6,36	48,9	19,2	26,1	16	0,54	8,8	6,72
2	33	5,8	6,55	46,2	17,4	26,1	14,5	0,36	9,9	4,79
2	36	5,9	6,56	43,5	15,6	26,55	13	0,23	8,6	3,03

Ce dernier tableau nous permet d'établir les courbes ci-dessous pour ce premier cas :

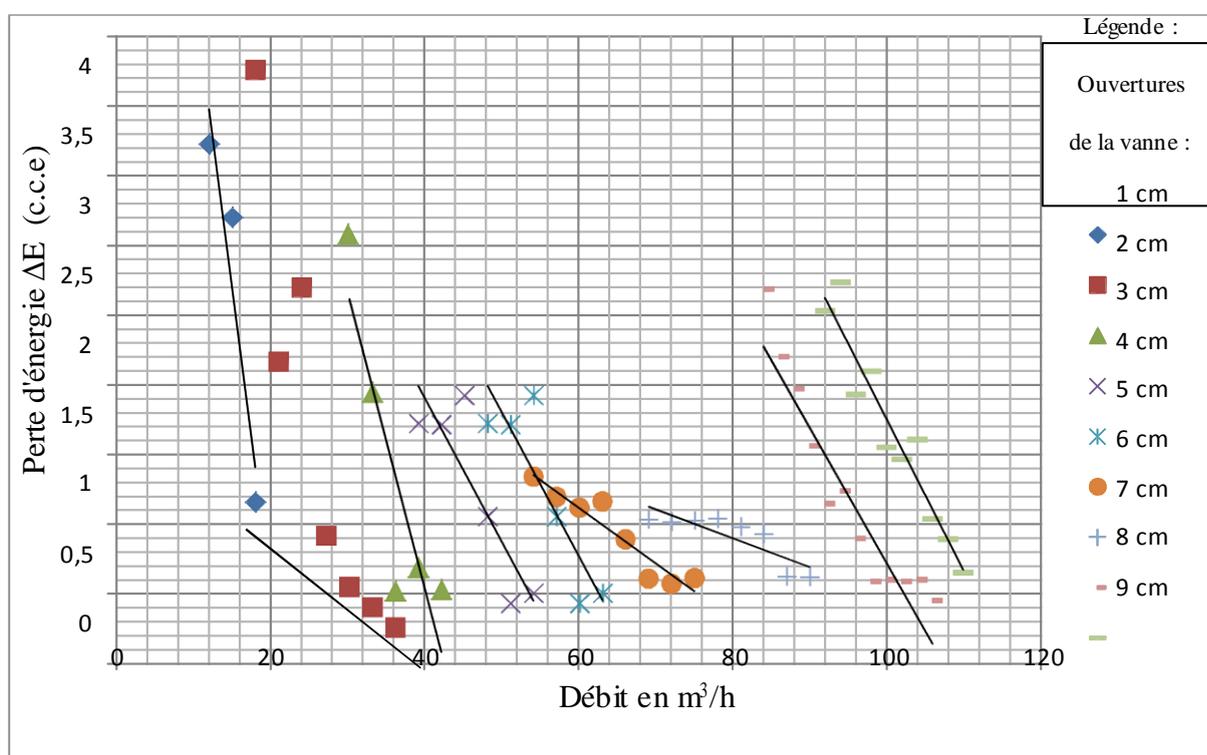


Figure IV.2 : Séries de courbes de la perte d'énergie en fonction du débit $\Delta E = fct(Q)$

pour le premier cas de la vanne de fond sans obstacle en aval

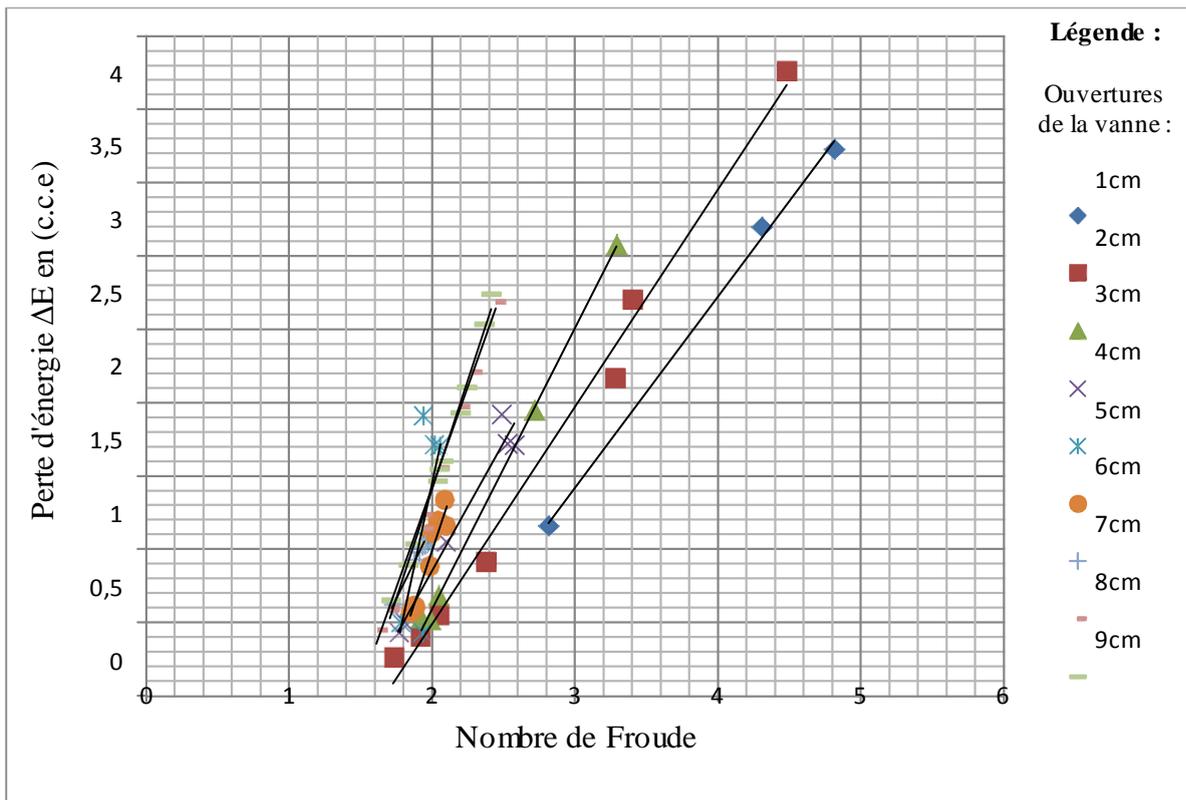


Figure IV.3 : Séries de courbes de la perte d'énergie en fonction du nombre de Froude

$\Delta E = fct (F)$ pour le premier cas de la vanne de fond sans obstacle en aval

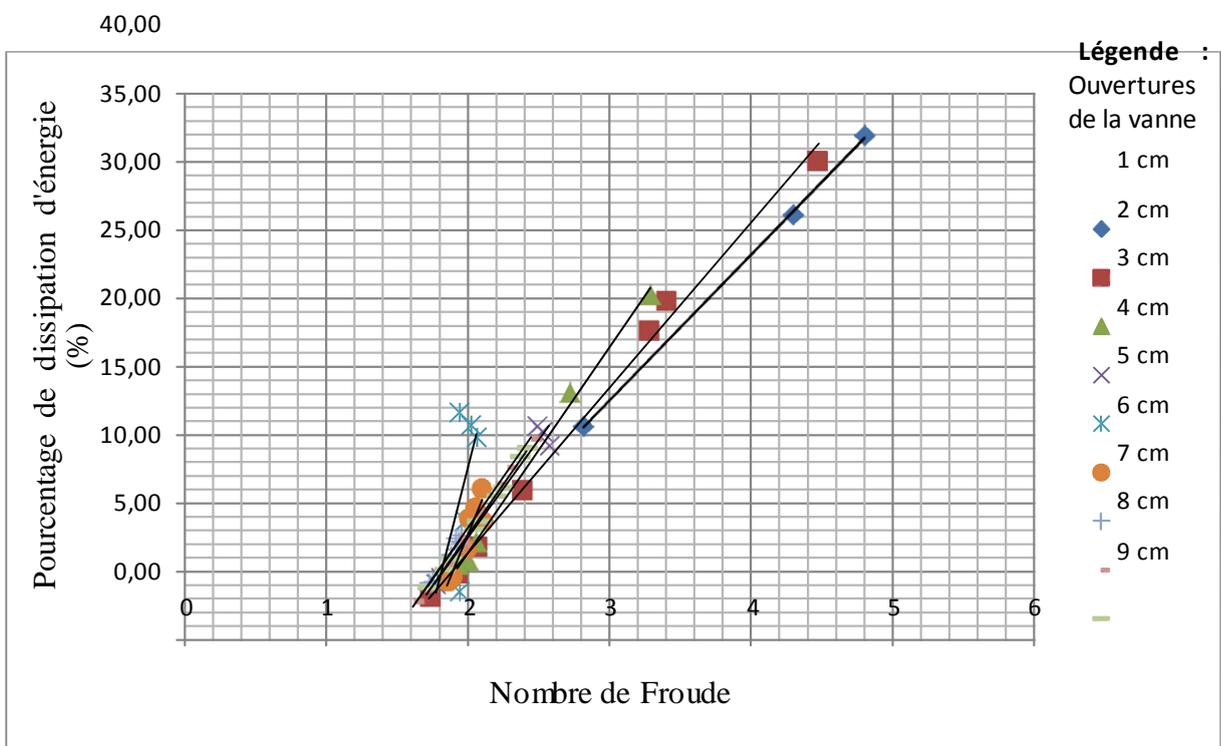


Figure IV.4 : Séries de courbes du pourcentage de perte d'énergie en fonction du nombre de Froude $\% \Delta H = fct (F)$ pour le premier cas de la vanne de fond sans obstacle en aval

IV.1.1.3. Discussion des résultats

D'après les tableaux IV.1 et IV.2 et le graphique IV.2, IV.3 et IV.4, nous avons pu remarquer que :

- ❖ Pour chaque série de mesures, lorsque l'ouverture de la vanne augmente, le nombre de Froude en amont diminue c'est ce qui explique que pour les petites ouvertures de vanne le ressaut est de type oscillatoire et qu'il tend à diminuer pour toutes les autres ouvertures changeant ainsi le type du ressaut à un ressaut faible. Ceci dit, ce changement est relatif à la modification de la section contractée de l'ouvrage de contrôle, en effet en prenant en compte un seul débit pour plusieurs ouvertures, nous avons remarqué que pour les petites ouvertures, le ressaut se forme plus rapidement, c'est à dire que pour une petite ouverture de vanne le débit qui y passe est important ce qui explique que le nombre de Froude soit aussi important.
- ❖ Pour chaque série de mesure, la longueur du ressaut calculé avec la formule de SAFRANEZ est supérieure à celles calculés avec la formule de SMETANA ou de MIAMI DISTRICT. La longueur du ressaut mesuré expérimentalement est supérieure à celle calculé par toutes les autres formules proposées, cela est probablement dû à de multiples facteurs notamment à la difficulté de distinguer avec précision le débit et la fin du ressaut.
- ❖ La deuxième hauteur conjuguée du ressaut mesurée expérimentalement est inférieure à celle calculée théoriquement avec la formule de Belanger, avec toute fois un taux d'erreur maximal de 10%. Ces valeurs inférieures, comme nous l'avons mentionné en section (I.2.5.1) sont tout à fait justifiables dans la mesure où nous ne pouvons aboutir à une expérimentation parfaite et que selon Resch (1971), un écart jusqu'à 10% est acceptable à la vue d'une comparaison entre une étude expérimentale et théorique du ressaut. Ces erreurs peuvent être aussi expliquées par l'application de l'équation de quantité de mouvement qui ne prend pas en considération l'effet du frottement et aussi parce qu'elle est basée sur des hypothèses simplificatrices. Toute fois, la présence de valeurs assignées en (-) à savoir -3.19; -0.33; -1.02 indiquent que la valeur des hauteurs expérimentales sont supérieures à celles théoriques, elles ne représentent que 3 valeurs sur un total de 68 et pourront être expliquées par une erreur de lecture de la hauteur expérimentale.
- ❖ Par comparaison des pentes des droites obtenues, nous pouvons aisément remarquer divers intervalles distincts. Pour chaque série de mesure, à chaque fois que l'ouverture de la vanne diminue, la perte d'énergie augmente, Néanmoins, toutes les valeurs de la perte d'énergie pour ce cas sont relativement faibles plafonnées par une valeur de 4.26 C.C.E. Le pourcentage de dissipation d'énergie diminue au fur et à mesure que l'ouverture de la vanne augmente, Aussi, à chaque fois que le nombre de Froude diminue la dissipation d'énergie ainsi que le pourcentage de dissipation diminue. Cela pourra être expliqué par le fait que pour une ouverture de vanne grandissante et un même débit, le débit qui y passe et qui est contrôlé par l'opérateur devient de moins en moins important ce qui explique que le nombre de Froude soit important, le ressaut passe d'un ressaut oscillatoire à un ressaut faible ce qui explique cette diminution de dissipation d'énergie c'est-à-dire que le ressaut change et tend à s'affaiblir. Le pourcentage de dissipation d'énergie diminue encore pour la même raison du changement du type du ressaut.

IV.1.2. Cas de la vanne de fond avec seuils

Les résultats des essais expérimentaux du deuxième cas sont consignés dans le tableau qui suit :

IV.1.2.1. Exposition des résultats

Tableau IV.3 : Résultats des essais pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

Ouverture De vanne (cm)	Essais	Débit (m ³ /h)	H ₁ (Cm)	H ₂ (Cm)	H _{amont} (Cm)	L (Cm)	D (Cm)	FR ₁	Type De Ressaut
2	1	39	1,4	12	40.1	84.3	20	6.76	Ressaut Stable
3	1	54	1,9	13,4	35,8	85,7	44	5,92	Ressaut Stable
3	2	57	1,9	14	39,9	90,1	218	6,25	Ressaut Stable
4	1	63	2,6	14,6	31,7	91,5	4	4,31	R. Oscillatoire
4	2	66	2,7	14,8	32,4	92,3	11	4,27	R. Oscillatoire
4	3	69	2,8	15,3	34,1	95,3	62	4,23	R. Oscillatoire
4	4	72	2,8	15,9	37	99,9	112	4,41	R. Oscillatoire
4	5	75	2,9	16,3	39.6	102.2	202	4.36	R. Oscillatoire

IV.1.2.2. Analyse et comparaison des résultats

L'analyse des résultats pour le deuxième cas sont représenté dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 : Analyse des résultats des essais pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

Ouverture De vanne (cm)	Débit (m ³ /h)	H ₂ Experi (Cm)	H ₂ théori (Cm)	L Experi (Cm)	L Smetana (Cm)	L Safranez (Cm)	L District (Cm)	ΔE en (C.C.E)	Δh ₂ en (%)	Δh en (%)
2	39	12	12.7	84.3	63,6	54	53	17,72	5,5	53,11
3	54	13,4	14.98	85,7	69	60,3	57,5	14,93	10,5	42,46
3	57	14	15.86	90,1	72,6	63	60,5	16,65	11,7	42,73
4	63	14,6	14,61	91,5	72	65,7	60	11,4	0,1	42,49
4	66	14,8	15,01	92,3	72,6	66,6	60,5	11,1	1,4	40,58
4	69	15,3	15,40	95,3	75	68,85	62,5	11,4	0,6	40,98
4	72	15,9	16,12	99,9	78,6	71,55	65,5	12,6	1,4	42,03
4	75	16,3	16,49	102.2	80,4	73,35	67	12,73	1,1	41,79

Ce dernier tableau nous permet d'établir les courbes suivantes :

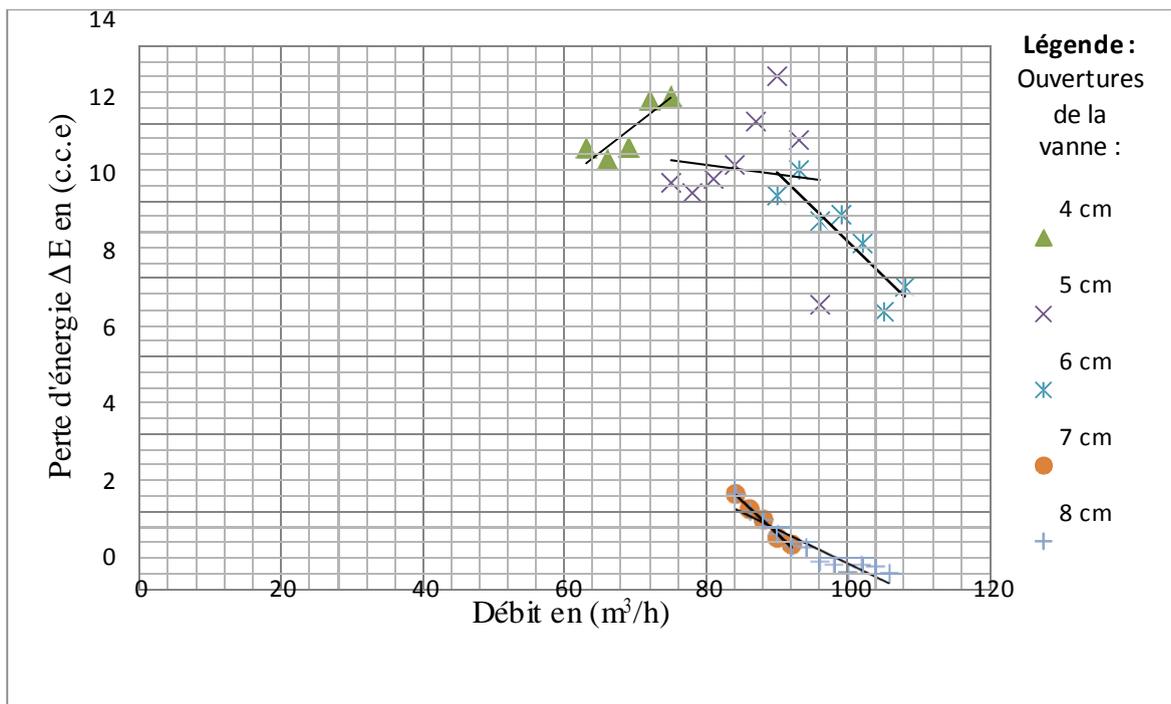


Figure IV.5 : Séries de courbes de la perte d'énergie en fonction du débit $\Delta E = fct (Q)$

pour le deuxième cas de la vanne de fond avec seuil terminaux

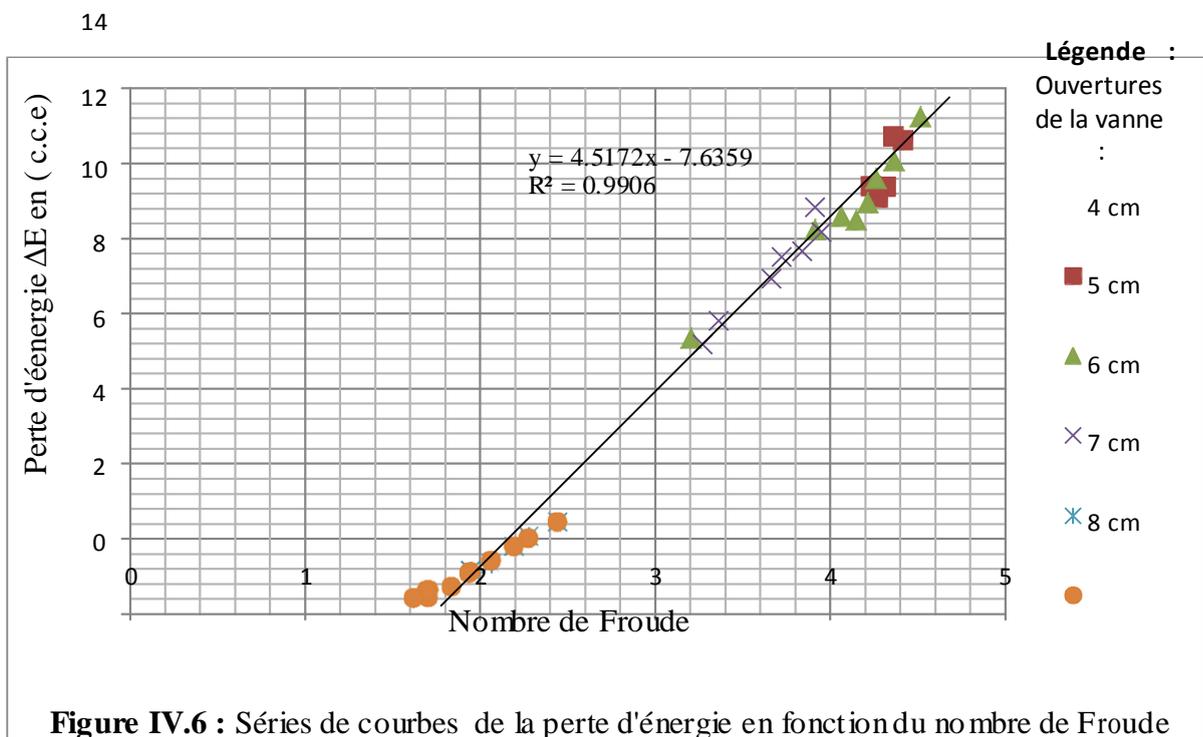


Figure IV.6 : Séries de courbes de la perte d'énergie en fonction du nombre de Froude

$\Delta E = fct (F)$ pour le deuxième cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

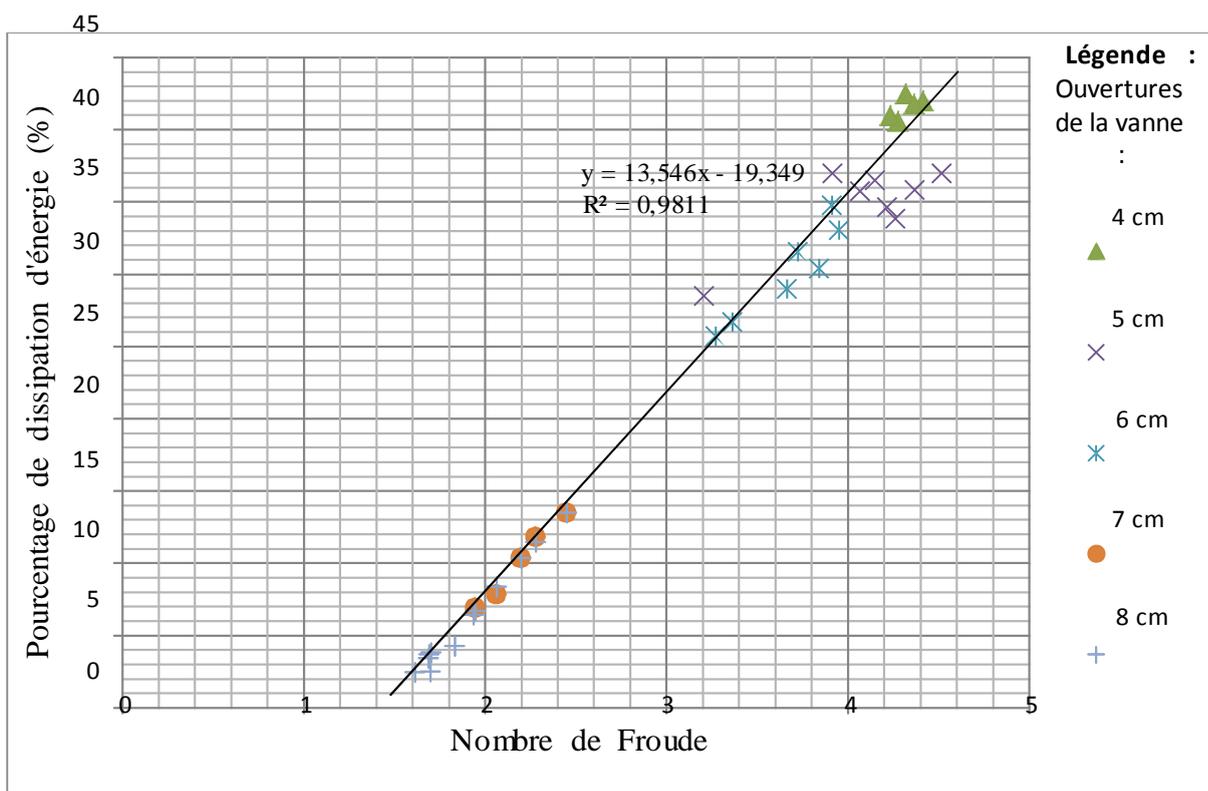


Figure IV.7 : Séries de courbes du pourcentage de dissipation d'énergie en fonction du nombre de Froude $\% \Delta H = fct (F)$ pour le deuxième cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

IV.1.2.3. Discussion des résultats

D'après les tableaux IV.3 et IV.4 et les figures IV.5, IV.6, IV.7, il a été remarqué ce qui suit :

- ❖ Comme il a été mentionné dans le premier cas, Pour chaque série de mesure, lorsque l'ouverture de la vanne augmente, le nombre de Froude en amont diminue. C'est ce qui explique que pour les petites ouvertures de vanne le ressaut est stable et qu'il tend à diminuer pour toutes les autres ouvertures changeant ainsi le type du ressaut à un ressaut oscillatoire puis à un ressaut faible au delà de certaines ouvertures. Ceci dit, ce changement est relatif à la modification de la section contractée de l'ouvrage de contrôle.
- ❖ Les erreurs sur les hauteurs conjuguées pour ce cas sont moindre comparativement au premier cas, l'erreur y est grandissante avec l'ouverture de la vanne expliquée par l'influence du type de ressaut sur la lecture des paramètres expérimentaux, en effet sur ressaut Etabli la marge d'erreur est de l'ordre de 1% parce que le ressaut est stable est tout à fait identifiable comparativement au ressaut faible et au ressaut oscillatoire dont l'erreur affleure les 9%.
- ❖ D'après le graphiques, Pour chaque série de mesure, a chaque fois que l'ouverture de la vanne augmente, le nombre de Froude tant a diminuer ainsi que la perte d'énergie et le pourcentage de dissipation, et comme nous l'avons expliqué pour le premier cas, la modification de la section contractée implique la modification du nombre de Froude c'est a dire que pour un même débit l'augmentation de la section contractée tant a diminuer la valeur du nombre de Froude, la diminution de ce dernier implique le

changement du type du ressaut qui tend à s'affaiblir expliquant ainsi la diminution des valeurs de la perte d'énergie ainsi que le pourcentage de dissipation.

Les valeurs de la perte d'énergie sont relativement élevées plafonnées par une valeur de 16.65 C.C.E.

- ❖ Comparativement avec le premier cas, la perte d'énergie est plus importante que ce qu'elle a été lorsqu'il n'y avait pas de seuil, cette perte d'énergie plus importante est expliquée par l'effet positif des seuils qui tendent à augmenter la dissipation d'énergie en amont.

IV.1.3. Cas du déversoir à crête arrondie

IV.1.3.1. Exposition des résultats

Les résultats des expérimentations du dernier cas sont confinés dans le tableau ci-dessous

Tableau IV.5 : Résultats des essais pour le cas du déversoir à crête arrondie

Pente (%)	Essais	Débit (m ³ /h)	H ₁ (Cm)	H ₂ (Cm)	H _{amont} (Cm)	L (Cm)	D (Cm)	FR ₁	Type De Ressaut
0	1	8	0,4	4,6	33,8	32,3	67	9	Ressaut Stable
0	2	10	0,7	4,3	34,4	27,7	110	4,90	Ressaut Stable
0	3	12	0,9	4,6	34,6	28,4	150	4,03	R. Oscillatoire
0	4	14	1,1	4,7	35	27,7	200	3,48	R. Oscillatoire
0	5	16	1,4	4,7	35,4	25,4	240	2,77	R. Oscillatoire
0	6	18	1,7	4,6	35,7	22,3	275	2,33	R. Oscillatoire
0	7	20	1,7	5,2	35,9	26,9	310	2,59	R. Oscillatoire
0	8	22	2	5,2	36,2	24,6	365	2,23	Ressaut faible
0	9	24	2,1	5,3	36,4	24,6	390	2,26	Ressaut faible
0	10	26	2,4	5,2	36,6	21,5	443	2,01	Ressaut faible
0	11	28	2,6	5,4	37	21,5	500	1,92	Ressaut faible
0	12	30	2,6	5,9	37,3	25,4	540	2,05	Ressaut faible
0	13	32	2,9	6	37,4	23,8	590	1,86	Ressaut faible
0	14	34	3,2	6	37,7	21,5	643	1,70	Ressaut faible
0	15	36	3,2	6,4	37,9	24,6	670	1,81	Ressaut faible
0	16	38	3,4	6,5	38,1	23,8	700	1,74	Ressaut faible
0	17	40	3,6	6,7	38,9	23,8	732	1,7	Ressaut faible

IV.1.3.2. Analyse et comparaison des résultats

L'analyse des résultats du dernier cas sont consignés dans le tableau qui suit :

Tableau IV.6 : Analyse des résultats des essais pour le cas du déversoir a crête arrondie

Pente (%)	Débit (m ³ /h)	H ₂ Experi (Cm)	H ₂ théori (Cm)	L Experim (Cm)	L Smetana (Cm)	L Safranez (Cm)	L District (Cm)	ΔE en (C.C.E)	Δh ₂ en (%)	Δh en (%)
0	8	4,6	4,94	32,3	25,2	20,7	21	10,07	6,8	59,65
0	10	4,3	4,51	27,7	21,6	19,35	18	3,88	4,7	42,56
0	12	4,6	4,70	28,4	22,2	20,7	18,5	3,06	2,2	37,20
0	14	4,7	4,90	27,7	21,6	21,15	18	2,26	4,0	29,03
0	16	4,7	4,83	25,4	19,8	21,15	16,5	1,37	2,8	20,14
0	18	4,6	4,82	22,3	17,4	20,7	14,5	0,78	4,5	12,34
0	20	5,2	5,43	26,9	21	23,4	17,5	1,21	4,3	16,38
0	22	5,2	5,39	24,6	19,2	23,4	16	0,79	3,6	11,28
0	24	5,3	5,75	24,6	19,2	23,85	16	0,74	7,9	9,84
0	26	5,2	5,72	21,5	16,8	23,4	14	0,44	9,0	6,08
0	28	5,4	5,87	21,5	16,8	24,3	14	0,39	8,0	5,30
0	30	5,9	6,36	25,4	19,8	26,55	16,5	0,59	7,3	7,25
0	32	6	6,31	23,8	18,6	27	15,5	0,43	5,0	5,41
0	34	6	6,28	21,5	16,8	27	14	0,29	4,4	3,64
0	36	6,4	6,72	24,6	19,2	28,8	16	0,40	4,8	4,75
0	38	6,5	6,84	23,8	18,6	29,25	15,5	0,34	4,9	3,94
0	40	6,7	6,94	23,8	18,6	30,15	15,5	0,31	3,5	3,56

Ce dernier tableau nous permet d'établir les courbes pour ce dernier cas et qui sont représentées ci-après :

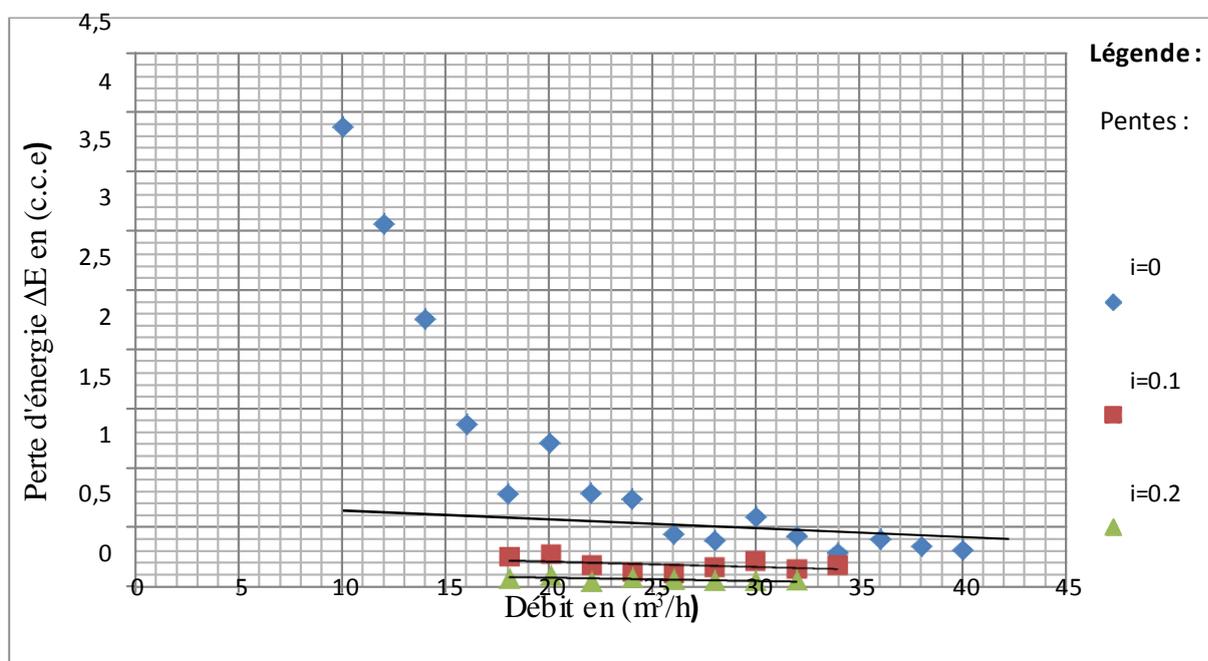
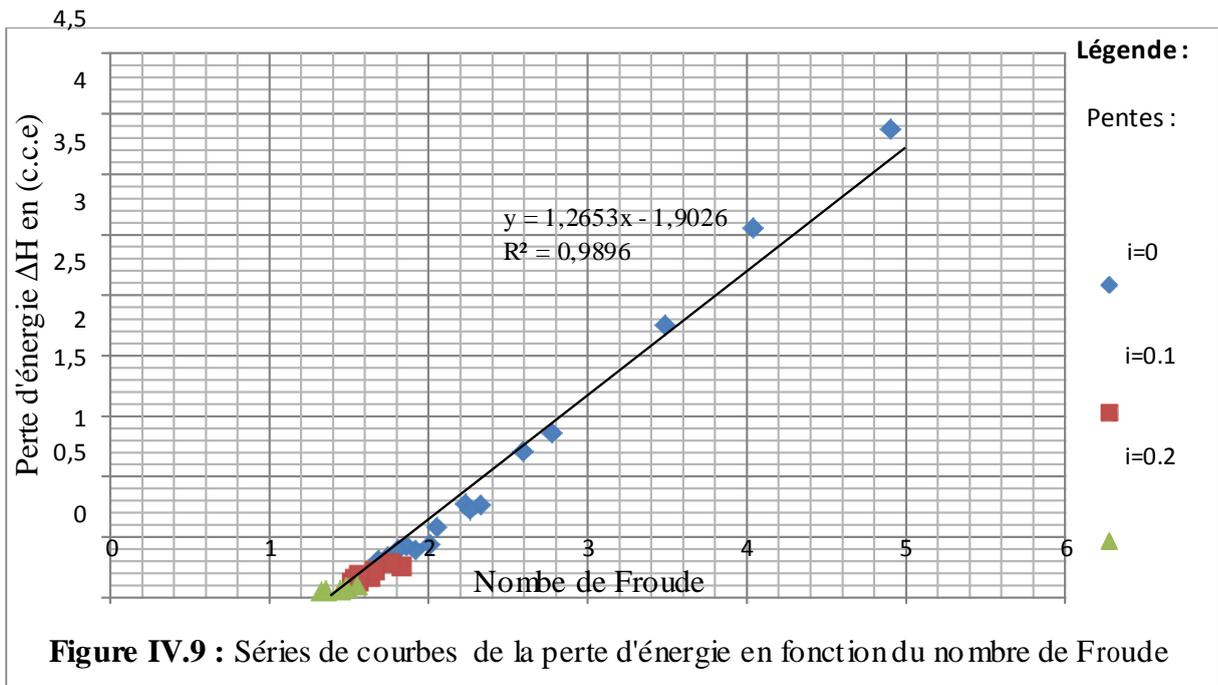
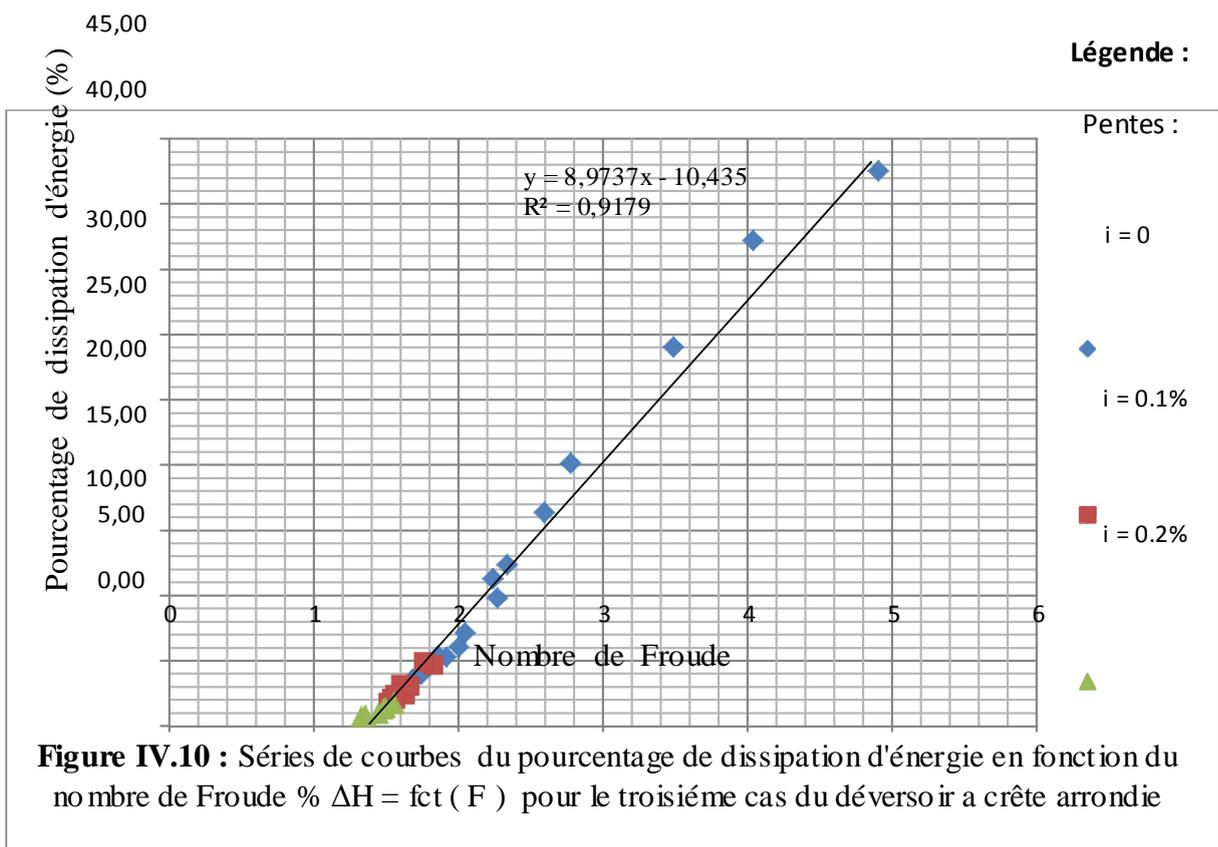


Figure IV.8 : Séries de courbes de la perte d'énergie en fonction du débit $\Delta H = fct (Q)$

pour le troisième cas du déversoir a crête arrondie



$\Delta E = \text{fct} (F)$ pour le troisième cas du déversoir à crête arrondie



IV.1.3.3. Discussion des résultats

D'après les tableaux IV.5 et IV.6 et les figures IV.8, IV.9, IV.10, il a été remarqué ce qui suit

- ❖ Comme nous l'avons cité précédemment, Pour chaque série de mesure, le nombre de Froude en amont diminue avec un débit qui augmente changeant ainsi le type du ressaut qui passe de ressaut stable vers le ressaut oscillant puis pré ressaut.
- ❖ La longueur du ressaut mesurée expérimentalement pour un fond horizontal tend vers celle calculé avec la formule de SAFRANEZ, tandis que celle sur fond tend vers celle calculé avec la formule de SMETANA.
- ❖ D'après les graphiques, les valeurs de la perte d'énergie sont très faible cette dernière est proportionnelle au nombre de Froude et inversement proportionnelle a la pente. A chaque fois que le nombre de Froude diminue le ressaut change et s'affaiblit ce qui provoque une diminution de la perte d'énergie et du pourcentage de dissipation. En introduisant le facteur pente, la projection du poids sur l'axe horizontal n'est plus nulle, c'est à dire que la quantité de mouvement y est plus importante, la vitesse d'écoulement aussi ce qui provoque une stabilisation du ressaut et une moindre dissipation d'énergie. La perte d'énergie diminue. Comparativement aux autres cas, ses valeurs sont les plus faibles.

IV.1.4. Comparaison entre les différents cas traités

De manière globale, au terme des analyses des résultats expérimentaux, nous pouvons établir deux comparaisons distinctivement. La première concernera le même cas du ressaut provoqué par une vanne de fond Avec et sans seuils terminaux tandis que la seconde réunira de façon générale le ressaut engendré par vanne de fond et par déversoir.

Concernant la première comparaison, nous pouvons dire que :

- ❖ Les hauteurs du ressaut sont plus importantes dans le cas d'un des seuils que dans le cas où il n'y a pas d'obstacle en aval, cette augmentation est dû a l'effet du seuil qui crée une intumescence, cette perturbation tend à élever la ligne d'eau ce qui provoque une surélévation augmentant ainsi les hauteurs d'eau.
- ❖ Les distances de formation du ressaut sont plus courtes en cas de seuil, expliqué toujours par les intumescences créés par l'obstacle et qui tendent à raccourcir la distance de formation du ressaut
- ❖ En présence de seuils, les ressauts sont plus stable et provoquent une forte dissipation d'énergie, nous seront a même de dire que dans un cas réel d'un barrage un seuil permettra de raccourcir la longueur de protection des berges. Ceci dit nous pouvons dire que les seuils permettent la maîtrise de l'écoulement.

La présence d'un seuil tend à créer une section de contrôle hydraulique, c'est-à-dire, une transition de régime d'écoulement rapidement varié qui va du fluvial au torrentiel puis, qui revient au fluvial. L'effet du seuil est donc d'introduire un contraste plus important dans l'écoulement en fixant le régime amont en conditions fluviales. En amont du seuil, le

courant est accéléré à la faveur d'une profondeur accrue, c'est à dire que la hauteur d'eau tend à augmenter pour former des courbes de remous de types M1, S1 ou C1 tandis que la vitesse d'écoulement augmente pour atteindre la vitesse critique quelques parts au dessus du seuil à partir de ce qu'on appelle la zone d'approche.

En ce qui concerne la deuxième comparaison, nous pouvons dire :

- ❖ Le ressaut sur vanne de fond et par déversoir, donnent pratiquement les mêmes valeurs des hauteurs conjuguées du ressaut avec une dissipation d'énergie tout aussi proche pour un débit unique.
- ❖ La perte d'énergie y est faible pour les deux cas vu qu'il n'y a aucun obstacle en aval.
- ❖ La dissipation d'énergie diminue en augmentant la pente pour le cas du déversoir.

IV.2. Traitement des résultats

IV.2.1. Evaluation des données

Le but primordial de cette présente étude est la détermination d'une relation entre la distance de formation du ressaut et la hauteur en amont de l'ouvrage de contrôle. Pour cela, il faut tracer les courbes $D_{\text{mesurée}} = f(H_{\text{amont}})$ pour les différents cas traités :

IV.2.1.1. Cas de la vanne de fond sans obstacles en aval

Nous avons pu établir les équations $D_{\text{mesurée}} = f(H_{\text{amont}})$ pour ce premier cas, les résultats sont présentés dans la figure suivante :

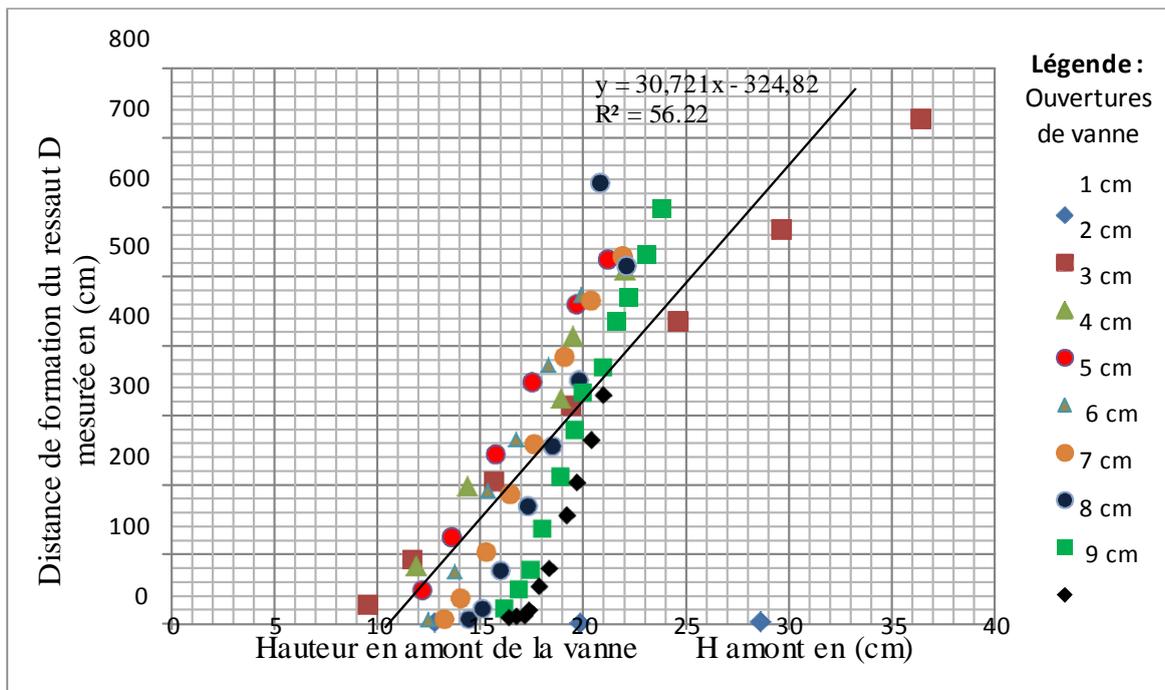


Figure IV.11 : Série de courbes de la distance du ressaut en fonction de la hauteur en amont $D_{\text{mesurée}} = fct(H_{\text{amont}})$ pour le premier cas de la vanne de fond sans obstacle en aval

D'après la figure IV.11, nous pouvons remarquer qu'il y a dépendance linéaire entre la distance de formation du ressaut et la hauteur en amont de la vanne. La disposition des points par rapport aux courbes tendances laisse à déduire qu'il y a une très bonne corrélation entre les différents points de chaque série variant de 95 à 99 %, la pente des droites augmente au fur et à mesure que l'ouverture augmente. N'étant pas en mesure d'établir une équation implicite reliant à la fois, la distance de formation du ressaut, la hauteur en amont de la vanne, l'ouverture de la vanne et le débit par cause de complexité et de nécessité d'utilisation des algorithmes génétiques, Le logiciel MATLAB nous a permis néanmoins grâce à des approximations successives d'émettre plusieurs équations du type : $D = f(h_{\text{amont}})$ pour chaque série de mesure ainsi qu'une équation globale pouvant mettre en évidence toutes les autres.

Remarque

Les équations établies à l'aide de MATLAB et de son utilitaire SFTOOL, sont de nature polynomiales pour se rapprocher encore plus de la réalité. Ces équations sont respectivement pour chaque ouverture grandissante :

$$D_{1\text{cm}} = 0.9127 - 23.6062 + 228.5907$$

$$D_{2\text{cm}} = -5.0796e^{-05} + 0.0065 - 0.3305 + 8.6372 - 121.9601 + 911.5819 H + 2803.2$$

$$D_{3\text{cm}} = -0.0031 + 0.2117 - 5.3001 + 57.9382 - 232.5095$$

$$D_{4\text{cm}} = 0.0004 - 0.0334 + 1.0829 - 17.4541 + 143.7431 - 487.6065$$

$$D_{5\text{cm}} = -0.0129 + 1.0410 - 33.4004 + 531.6632 - 4.1933e^{+03} + 1.3097e^{+04}$$

$$D_{6\text{cm}} = 0.0257 - 3.1046 + 159.7655 - 4.5436e^{+03} + 7.7122e^{+04} + 7.8130e^{+05} + 4.3741e^{+06} - 1.0440e^{+07}$$

$$D_{7\text{cm}} = -0.1214 + 14.9923 - 791.1871 + 2.3122e^{+04} - 4.0415e^{+05} + 4.2254e^{+06} - 2.4468e^{+07} + 6.0544e^{+07}$$

$$D_{8\text{cm}} = -0.0227 + 4.9447 - 489.2520 + 2.8999e^{+04} - 1.1440e^{+06} + 3.1543e^{+07} - 6.2022e^{+08} + 8.6969e^{+09} - 8.5228e^{+10} + 5.5593e^{+11} - 2.1723e^{+12} + 3.8520e^{+12}$$

$$D_{9\text{cm}} = -1.192 + 178.2453 - 1.1640e^{+04} + 4.3394e^{+05} - 1.0100e^{+07} + 1.5029e^{+08} - 1.3962e^{+09} + 7.4045e^{+09} - 1.7162e^{+10}$$

Ces équations sont représentatives de chaque série de mesure et chaque ouverture de vanne.

L'équation finale permettant de les mettre en évidence serait :

$$D_{\text{finale}} = 0.0204 H^4 - 1.8989 H^3 + 61.8441 H^2 - 797.0425 H + 3.5515e^{+03}.$$

D'autres équations ont aussi été possible grâce à une modélisation en 3D sur SFTOOL, ces équations sont :

$$D_{01} = \left(\frac{1}{1574} \times \sqrt{H_{\text{amont}}^2 + 1} \right) - \left(\frac{1}{1574} \times O \right) - \frac{6757}{1574} \dots\dots\dots (Eq. 1)$$

Cette équation a un taux de corrélation de **80 %** et un RMSE de **119 cm**

$$D_{02} = - \left(\frac{1}{1574} \times H_{\text{amont}} \right) - \left(\frac{1}{1574} \times O \right) + \left(\frac{1}{1574} \times H_{\text{amont}} \times O \right) - \left(\frac{1}{1574} \times O^2 \right) - \left(\frac{1}{1574} \times H_{\text{amont}} \times O^2 \right) + \left(\frac{1}{1574} \times O^3 \right) + \dots\dots\dots (Eq.2)$$

Cette équation possède un taux de corrélation de **98.42 %** et un RMSE de **34.29 cm**.

$$D_{03} = - \left(\frac{1}{1574} \times H_{\text{amont}} \right) - \left(\frac{1}{1574} \times O \right) + \left(\frac{1}{1574} \times H_{\text{amont}} \times O \right) - \left(\frac{1}{1574} \times O^2 \right) - \left(\frac{1}{1574} \times H_{\text{amont}} \times O^2 \right) + \left(\frac{1}{1574} \times O^3 \right) - \left(\frac{1}{1574} \times \left(\frac{O^2}{H_{\text{amont}}} \right) \right) + \dots\dots\dots (Eq.3)$$

Cette équation a un coefficient de corrélation qui atteint les **98.47 %** avec un RMSE de **33.74**.

A la vue d'une meilleure visualisation des résultats nous avons procédé à une comparaison entre les différentes relations obtenus, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.7 : Comparaison entre les différentes relations obtenus pour le cas de la vanne de fond sans obstacles en aval

Ouverture De la vanne En (cm)	Débit Q en (m ³ /h)	Distance mesurée En (cm)	Distance calculée Par D _{final} en (cm)	Distance calculée Par Eq.1 en (cm)	Distance calculée Par Eq.2 en (cm)	Distance calculée Par Eq.3 en (cm)
1	12	0,76	44,92	-98,16	6,08	6,86
1	15	1,19	410,80	148,45	35,13	34,62
1	18	3	568,67	338,32	71,14	70,59
2	21	94	32,93	137,26	71,73	71,62
2	24	204	167,17	42,55	171,82	171,12
2	27	314	389,52	326,5	266,91	265,72
2	30	435	571,89	414,94	397,03	396,46
2	33	568	557,85	507,5	522,15	522,23
2	36	727	711,52	503,58	692,31	694,38
3	33	197	16,96	37,22	187,81	187,47
3	36	325	11,86	469,32	382,77	383,87
3	30	415	13,04	368,04	408,2	407,43
3	33	510	12,57	413,72	514,15	513,26
RMSE	-	-	170.24	119	34.29	34.28
Taux de corrélation en (%)			62.62	79.44	98.42	98.47

Remarque

La suite du tableau a été portée en (**Annexe III.7**), un graphique représentatif des différentes relations et leurs comparaisons avec la procédure expérimentale est représenté ci-dessous en figure :

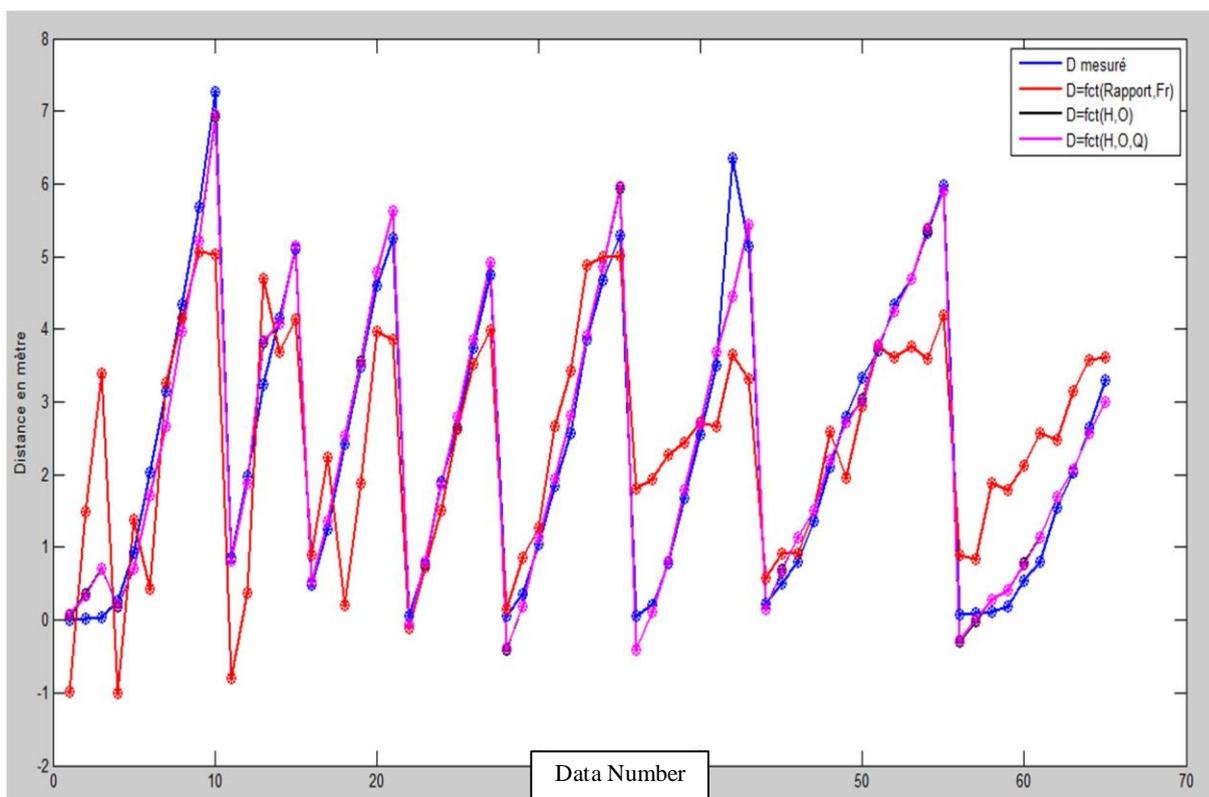


Figure IV. 12 : Comparaison entre les résultats donnés par les différentes relations pour le cas de la vanne de fond sans obstacles en aval

D'après la figure précédente, il est clair que les courbes sont pratiquement superposées pour les relations (Eq.2) et (Eq.3) avec les résultats expérimentaux, d'ailleurs les coefficients de corrélation sont élevés de l'ordre de 98 % avec une erreur quadratique moyenne très faible de l'ordre de 34 cm comparé à l'équation (Eq.1) qui a donné 79% de corrélation et 119 cm comme erreur quadratique.

Nous pouvons aussi aisément remarquer qu'au début de chaque série les valeurs dévient, ces équations donc ne peuvent pas être utilisées pour de faibles débits.

L'équation D_{final} est trop éloignée des autres bien que les équations individuelles de H_{amont} donnent de bons résultats cela veut tout simplement dire que la distance de formation du ressaut n'est pas régie uniquement par la hauteur en amont de l'ouvrage de contrôle, c'est pour cela qu'elle n'a pas été représentée sur le graphique.

IV.2.1.2. Cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

Nous avons pu établir les équations $D_{mesurée} = f(H_{amont})$ pour ce deuxième cas, les résultats sont présentés dans la figure suivante :

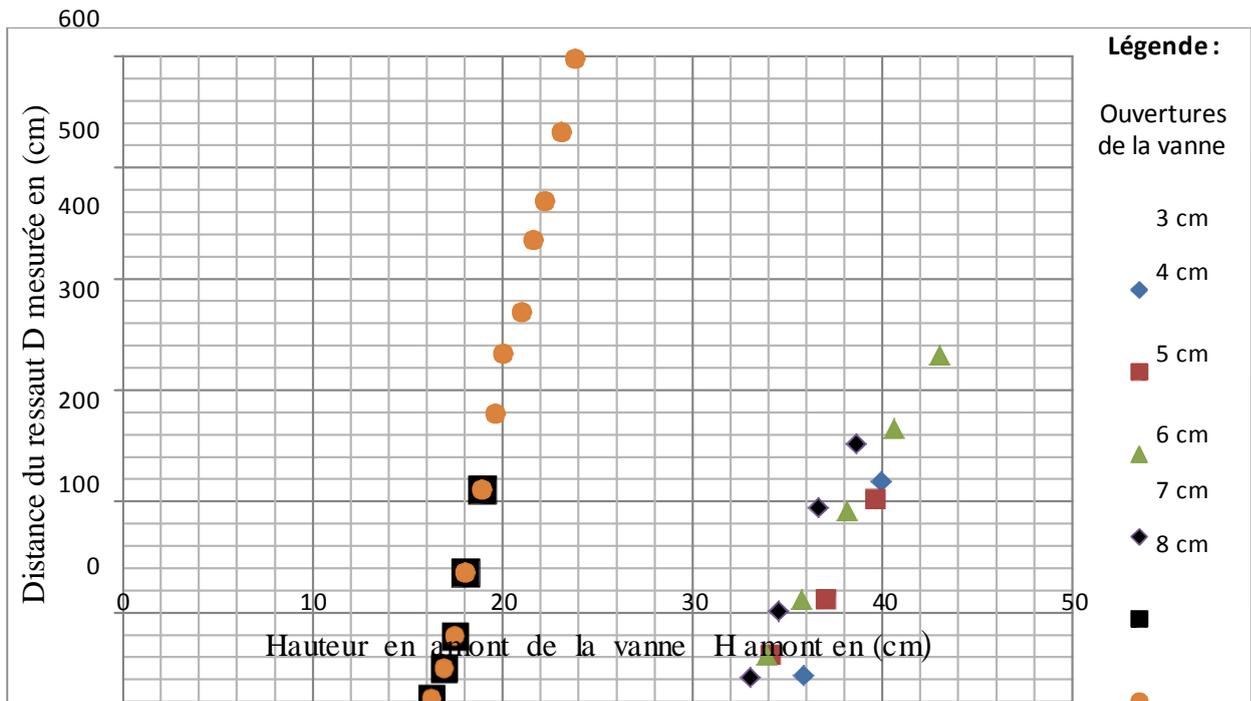


Figure IV.13 : Séries de courbes de la distance du ressaut en fonction de la hauteur en amont $D_{mesurée} = fct (H_{amont})$ pour le deuxième cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

D'après la figure IV.14, nous pouvons remarquer qu'il y a aussi une dépendance linéaire entre la distance de formation du ressaut et la hauteur en amont de la vanne pour ce cas, la disposition des points par rapport aux courbes tendances laisse à déduire qu'il y a une très bonne corrélation entre les différents points de chaque série variant de 97 à 99 %, la pente des droites augmente au fur et à mesure que l'ouverture augmente.

Comme nous l'avons mentionné pour le premier cas, les équations $D_{mesurée} = f (H_{amont})$ régissant le deuxième et réalisées par MATLAB par approximations successives sont :

$$\begin{aligned}
 D_{3cm} &= 1.028 H^2 - 35.7463 H \\
 D_{4cm} &= 0.9857 H^2 - 45.6298 H + 460.1037 \\
 D_{5cm} &= 0.7903 H^2 - 31.1217 H + 218.1925 \\
 D_{6cm} &= 29.1932 H - 887.2190 \\
 D_{7cm} &= 14 H^2 - 420 H + 315 \\
 D_{8cm} &= - 0.5023 H^3 + 29.7628 H^2 - 0.5023 H + 2.5055e^{+03}
 \end{aligned}$$

Remarque

L'ouverture de la vanne a 2cm a été écartée puisqu'elle ne présente qu'un seul point de mesure.

Des équations globales sur SFTOOL ont été réalisées et qui sont :

$$D_{01} = \left(\frac{1}{\sqrt{2 + 1}} \right) + \left(\frac{7417}{319} \times H_{amont} \right) - \left(\frac{2534}{769} \times \frac{2}{1} \right) - \dots \text{Eq.1}$$

Cette équation a un taux de corrélation de **92.63 %** et un RMSE de **59.31 cm**

$$D_{02} = (\text{---} \times H_{\text{amont}}) + (\text{---} \times O) - (\text{---} \times H_{\text{amont}} \times O) - (\text{---} \times O^2) + (104974 \times H_{\text{amont}} \times O^2) + (363009 \times O^3) - \text{---} \dots \text{Eq.2}$$

Cette équation possède un taux de corrélation de **91.19 %** et un RMSE de **64.62 cm**

$$D_{03} = (\text{---} \times H_{\text{amont}}) + (\text{---} \times O) - (\text{---} \times H_{\text{amont}} \times O) - (\text{---} \times O^2) + (\text{---} \times H_{\text{amont}} \times O^2) + (\text{---} \times O^3) + (\text{---} \times \frac{O^2}{\text{---}}) - \text{---} \dots \text{(Eq.3)}$$

Cette relation a un coefficient de corrélation de **95.08 %** et un RMSE de **48.73 cm**

La comparaison des résultats donnés par les différentes relations est donnée dans le tableau ci-après :

Tableau IV.8 : Comparaison entre les différentes relations obtenus pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

Ouverture De la vanne En (cm)	Débit Q en (m ³ /h)	Distance mesurée En (cm)	Distance calculée Par Eq.1 en (cm)	Distance calculée Par Eq.2 en (cm)	Distance calculée Par Eq.3 en (cm)
2	39	20	45	43,02	-0,76
3	54	44	85,8	-61,46	44,91
3	57	218	211,48	292,55	256,6
4	63	4	-95,5	-51,29	-81,39
4	66	11	-44,71	-23,72	9,25
4	69	62	-10,1	43,22	96,25
4	72	112	37,46	157,42	179,53
4	75	202	102,85	259,8	261,02
RMSE	-	-	59.31	64.62	48.73
Taux de corrélation en (%)			92.63	91.18	95.08

La suite du tableau a été portée en (**Annexe III.8**), un graphique représentatif des différentes relations et leurs comparaisons avec la procédure expérimentale est représenté ci-dessous en figure :

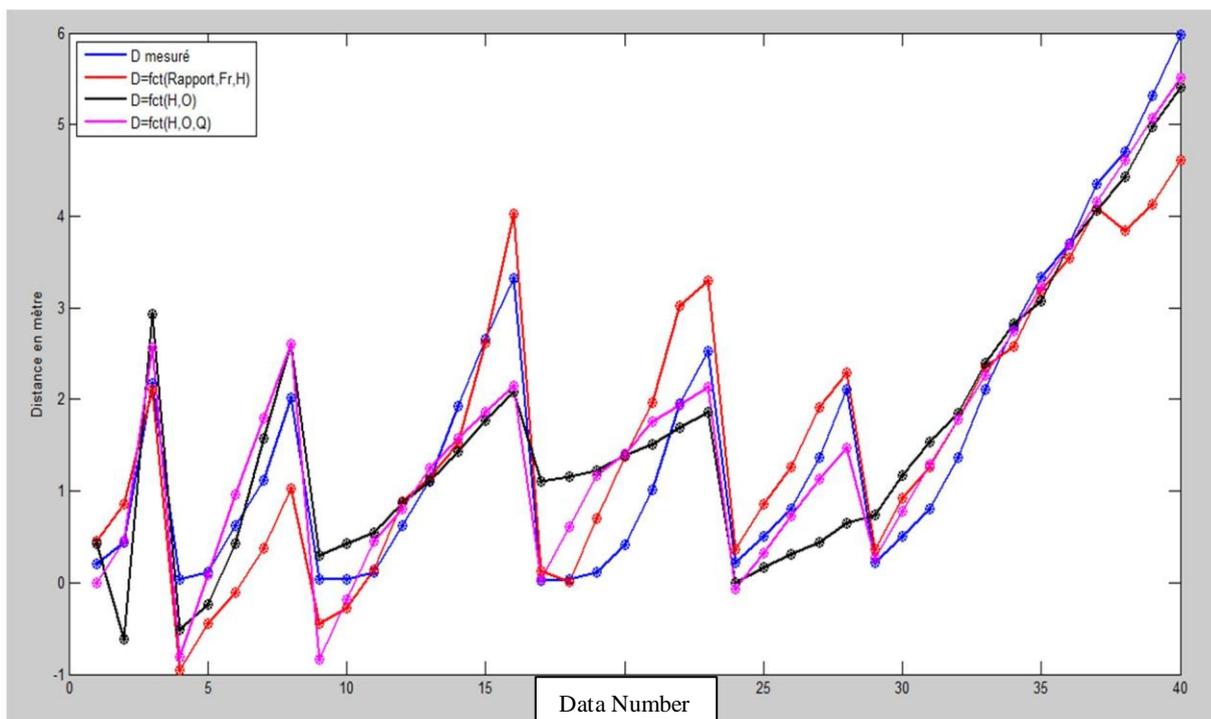


Figure IV. 14 : Comparaison entre les résultats donnés par les différentes relations pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

D'après la figure ci-dessus, les courbes issus des différentes formules ont toutes la même allure, elles se superposent en des points et divergent en d'autres mais donnent de très bon résultats en globalité. Nous pouvons aussi souligner que toutes les valeurs s'éloignent des résultats expérimentaux au début c'est à dire pour les petits valeurs les résultats sont éloignés.

IV.2.1.3. Cas du déversoir a crête arrondie

Nous avons pu établir les équations $D_{mesurée} = f(H_{amont})$ pour ce troisième cas, les résultats sont présentés dans la figure suivante :

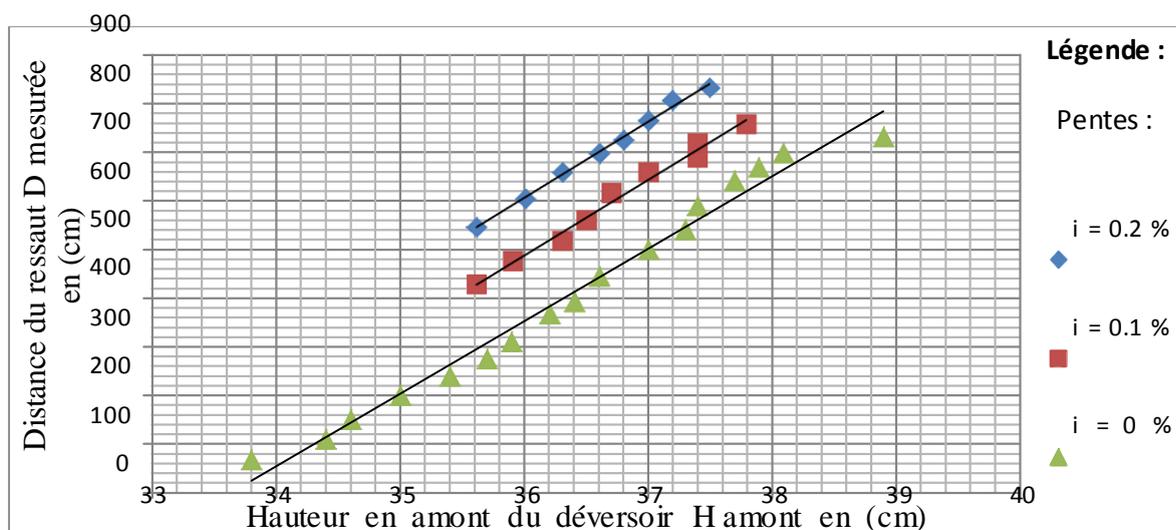


Figure IV.15: Séries de courbes de la distance du ressaut en fonction de la hauteur en amont $D_{mesurée} = fct(H_{amont})$ pour le troisième cas du déversoir a crête arrondie

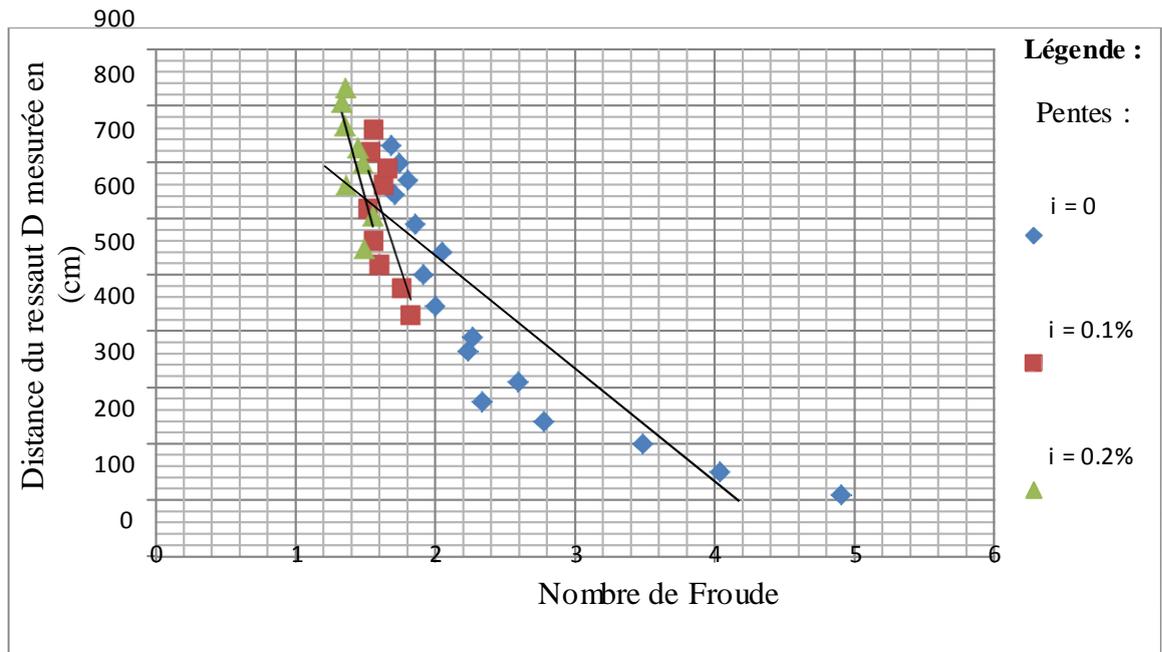


Figure IV.16: Séries de courbes de la distance du ressaut en fonction du nombre de Froude

$D_{mesurée} = fct(F)$ pour le troisième cas du déversoir à crête arrondie

D'après la figure IV.17, nous pouvons remarquer qu'il y a aussi une dépendance linéaire entre la distance de formation du ressaut et la hauteur en amont du déversoir, la disposition des points par rapport aux courbes tendances laisse à déduire qu'il y a une très bonne corrélation entre les différents points de chaque série. Le ressaut se forme d'autant plus loin que la pente augmente, c'est à dire qu'à chaque fois que la pente augmente, la distance de formation du ressaut augmente aussi.

Comme nous l'avons mentionné pour le premier cas, les équations $D_{mesurée} = f(H_{amont})$ régissant le deuxième et réalisées par MATLAB par approximations successives sont :

$$\begin{aligned}
 D_{\text{pente nulle}} &= -12.8964 H^3 + 1.4124e^{+03} H^2 - 5.1394e^{+04} H + 6.2204e^{+05} \\
 D_{i=0.1\%} &= -24.8570 H^3 + 2.7325e^{+03} H^2 - 9.9948e^{+04} H + 1.2171e^{+06} \\
 D_{i=0.2\%} &= -7.4550 H^3 + 815.6686 H^2 - 2.9568e^{+04} H + 3.5551e^{+05}
 \end{aligned}$$

Ces équations sont sous la forme $D = f(H_{amont})$ polynomiale, nous avons aussi obtenu des équations linéaires de type $D = A * H_{amont} + B(i)$ sur SFTOOL, les équations obtenues sont représentées ci-dessous :

$$D_{\text{pente nulle}} = \dots \times H_{amont} - \dots \quad \text{Avec un RMSE de 27 cm et un taux de corrélation de 99 \%}$$

$$D_{i=0.1\%} = \dots \times H_{amont} - \dots \quad \text{Avec un RMSE de 13 cm et un taux de corrélation de 99.3 \%}$$

$$D_{i=0.2\%} = \dots \times H_{amont} - \dots \quad \text{Avec un RMSE de 6 cm et un taux de corrélation de 99.76 \%}$$

Nous avons aussi obtenu une équation globale de forme $D = A * H_{amont} + B(i) + C$ et qui est représentée en figure IV.19. La relation obtenue est :

$$D_{\text{global}} = \text{---} \times H_{\text{amont}} + \text{---} \times I - \text{---} \quad \text{Avec :}$$

Un RMSE de **22 cm** et un taux de corrélation de **98.48 %**.

La comparaison entre les résultats donnés par la relation globale et les résultats expérimentaux sont dressés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV. 9 : Comparaison entre les différentes relations obtenues pour le cas du déversoir à crête arrondie

Pente (%)	Débit Q en (m ³ /h)	Distance mesurée En (cm)	Distance calculée Par la relation globale en (cm)
0	8	67	21,73
0	10	110	112,20
0	12	150	142,35
0	14	200	202,67
0	16	240	262,98
0	18	275	308,21
0	20	310	338,37
0	22	365	383,61
0	24	390	413,76
0	26	443	443,92
0	28	500	504,23
0	30	540	549,47
0	32	590	564,55
0	34	643	609,78
0	36	670	639,94
0	38	700	670,10
0	40	732	790,72
RMSE	-	-	22.02
Taux de corrélation en (%)		-	98.48

La suite du tableau a été portée en (**Annexe III.9**), un graphique représentatif des différentes relations et leurs comparaisons avec la procédure expérimentale est représenté ci-dessous en figure :

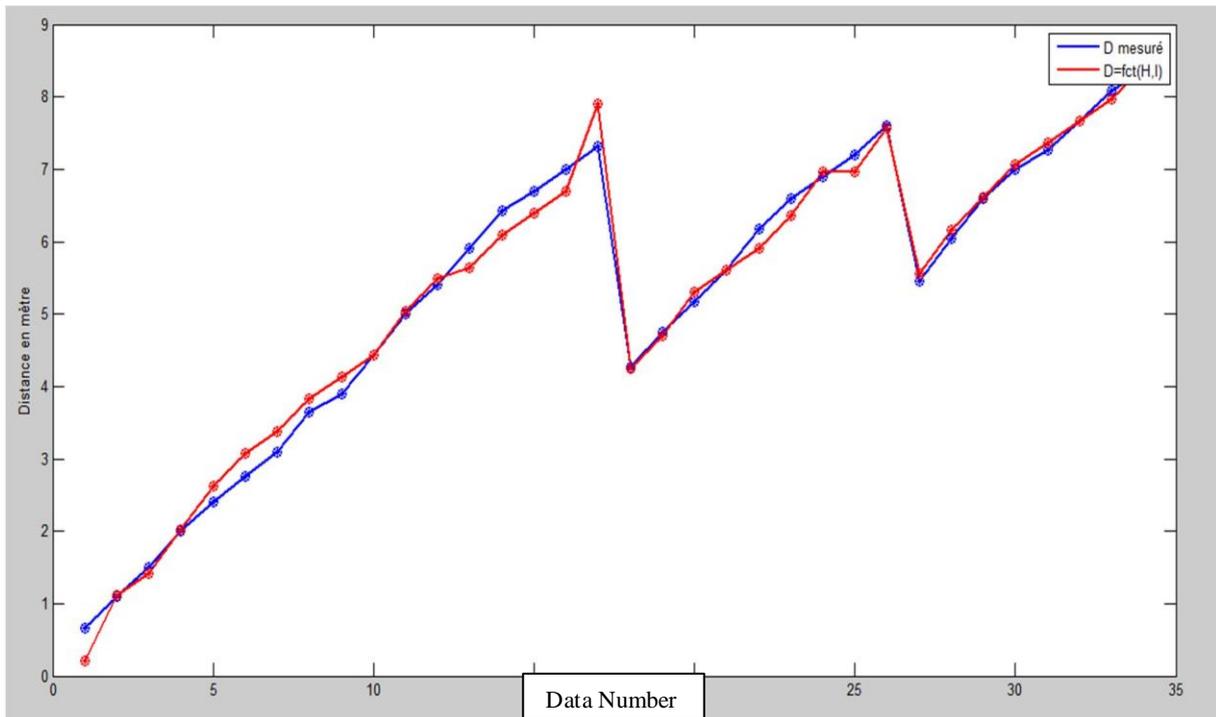


Figure IV. 17 : Comparaison entre les résultats donnés par les différentes relations pour le cas du déversoir à crête arrondie

D'après la figure ci-dessus, les résultats obtenus par l'équation globale sont très rapprochés des résultats expérimentaux et les courbes sont presque superposées.

Remarque

Pour une meilleure appréciation des résultats, il nous faudra les comparer avec une formule ou une méthode existante. La seule manière pour calculer la distance de formation d'un ressaut est de calculer la longueur de la courbe de remous H_3 qui sévit entre la sortie de l'ouvrage de contrôle et la première hauteur conjuguée du ressaut.

IV.2.2. Méthode graphique de calcul des courbes de remous

Dans un cours d'eau naturel ou dans un canal expérimental, la mise en place d'une structure ou d'un objet provoquera une modification du régime d'écoulement en amont de l'objet en question. Si l'écoulement à proximité peut être rapidement bouleversé, l'écoulement en amont y est graduellement modifié sur un certain parcours pour redevenir uniforme si toutefois la distance est suffisamment grande. La profondeur d'écoulement est variable et la courbe la représentant est communément appelée courbe de remous.

Les courbes de remous peuvent être classées en cinq catégories (M,S,C,H,A) en fonction de la pente et de la profondeur du tirant d'eau, elles se distinguent en comparant la pente du canal à la pente critique de l'écoulement.

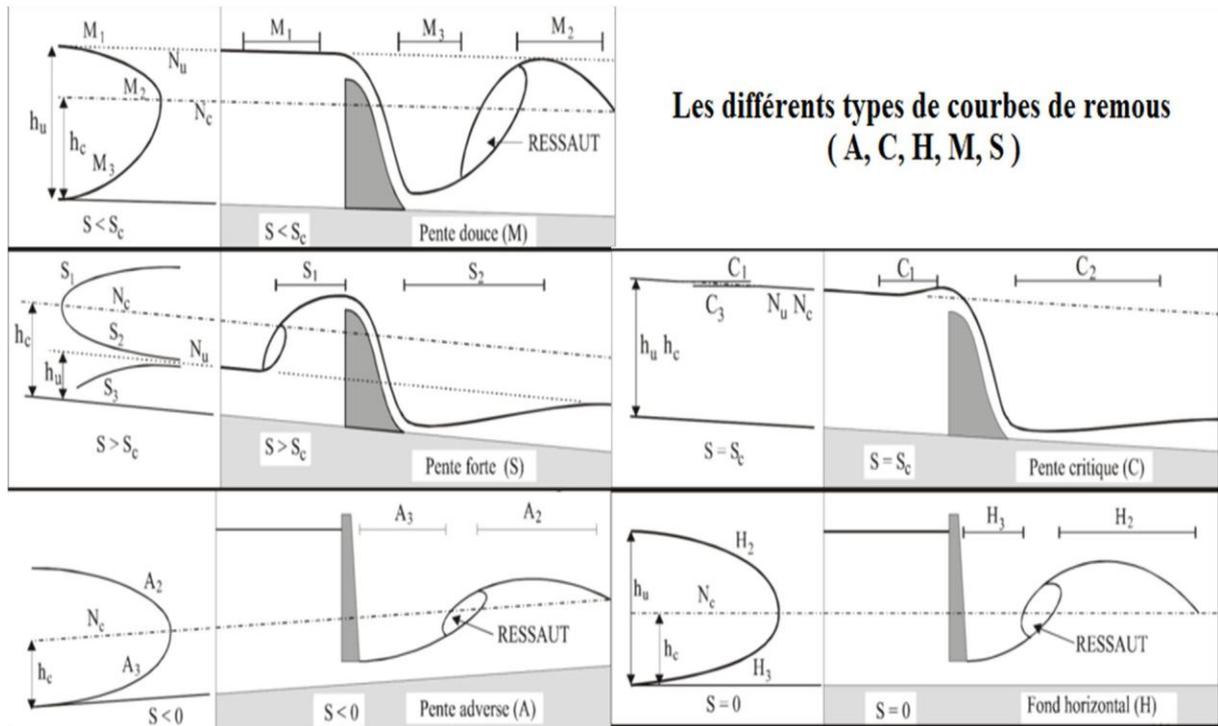


Figure IV.18 : Les différents types de courbes de remous

Le calcul d'une courbe de remous peut se faire de différentes manières par exemple :

- Par la méthode graphique
- Par des méthodes numériques notamment par approximations successives
- Par des méthodes d'intégration directe singulièrement Bakhmeteff, Bresse ou Chow.

IV.2.2.1. Méthode et programme de calcul

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la méthode graphique de calcul des courbes de remous, et ce, en utilisant l'équation fondamentale des écoulements graduellement variés

$$\frac{dy}{dx} = \frac{i - j}{1 - F^2} \dots \dots \dots \text{IV. 1}$$

Avec :

- i_0 : est la pente du fond du canal
- j_f : est la pente de la ligne d'énergie
- F_r : Nombre de Froude

Ainsi la surface comprise entre la courbe de la fonction, les axes principaux et les limites y_f , y_0 et x_f représentera la longueur de la courbe de remous.

IV.2.2.2. Détermination du coefficient de Manning

Le coefficient de Manning est un paramètre très important dans la mesure où il est caractéristique de l'état de la surface de contact avec le fluide en question. Dans cette étude, pour la détermination du coefficient de Manning a injecté pour calculer la pente de la ligne d'énergie, nous allons nous fier à l'étude réalisée par BENSIDIAHMED (2016) et ce sur le même canal que cette présente étude a été effectué.

Les résultats de l'étude du comportement du fond du canal réalisé par BENSIDIAHMED (2016) sont représentés dans le Tableau (Annexe III.10). Ces derniers démontrent clairement que le coefficient de Manning change selon certaines caractéristiques comme la pente du canal ou la hauteur d'eau.

Dans notre cas, puisque nous avons opté pour un canal à fond horizontal, nous allons tout simplement assimiler la première hauteur du ressaut à la hauteur de calcul du coefficient de Manning dans le tableau (Annexe III.10).

Donc l'équation que nous allons utiliser sera :

$$S = \frac{148.6 \cdot Q^{0.047} \cdot n^{1.49} \cdot b^{0.047}}{4.753 \cdot y^{1.49} \cdot g^{0.047}} \dots\dots\dots(IV.2)$$

Avec :

- b : Largeur du fond du canal qui est égale a 0.309m
- Q : Débit en m³/s
- y : Profondeur en m
- g : Constante gravitationnelle qui est égale a 9.81 m/s²
- n : coefficient de Manning.

Pour la résolution de cette équation, nous allons faire appel au logiciel MATLAB, que nous allons programmer pour simplifier les calculs. Ce genre d'équations peut être résolues par différentes méthodes notamment celle de Euler ou de Runge Kutta .

Dans notre cas, nous avons choisi la méthode de Runge Kutta 4, donnant plus de précision par rapport aux résultats d'intégration. Le Programme introduit dans le logiciel est exprimé en (Annexe IV), l'organigramme du programme est le suivant :

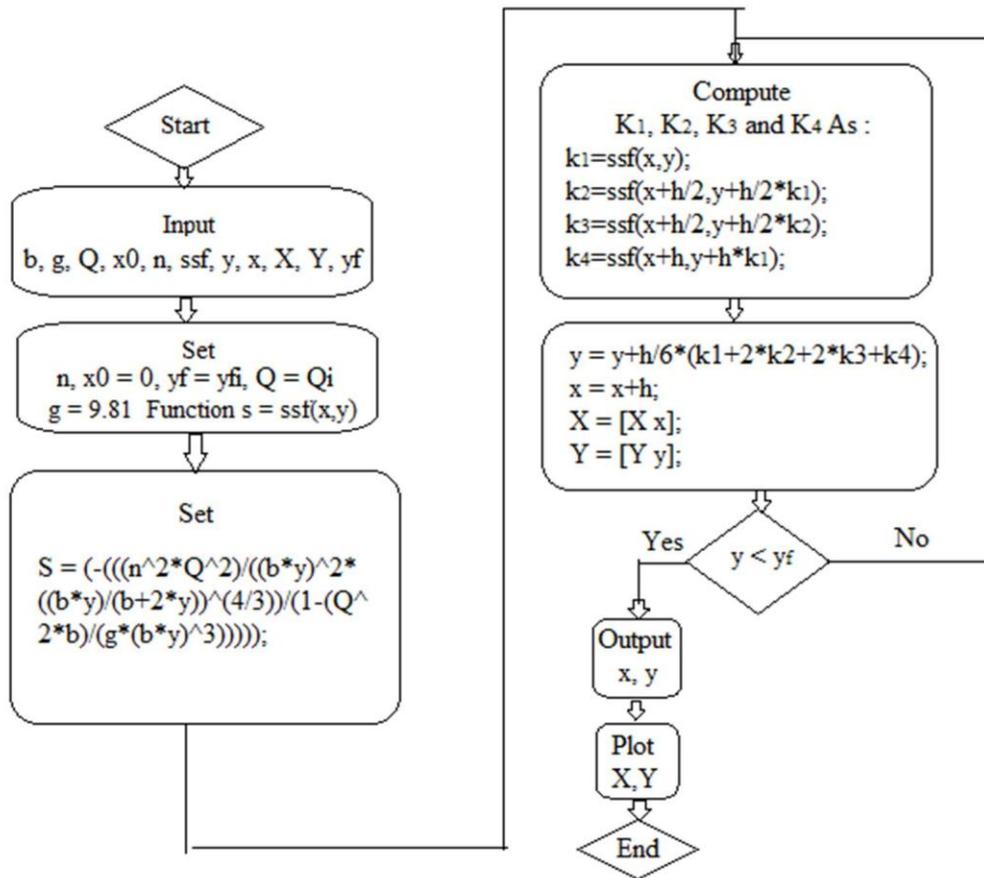


Figure IV.19 : Organigramme du programme de calcul

IV.2.2.3. Comparaison des résultats

Les résultats issus d'une comparaison entre les valeurs expérimentales et celles calculées avec MATLAB sont récapitulés dans le tableau qui suivra.

Le cas de la vanne de fond sans obstacle en amont sera nommé cas A et celui de la vanne de fond avec seuils terminaux sera nommé cas B.

Tableau IV.10 : Comparaison des résultats expérimentaux et ceux avec MATLAB

Cas	Ouverture De vanne (cm)	Essais	Débit en (m ³ /h)	Distance mesurée Expérimentalement En (cm)	Distance calculée sur MATLAB en (cm)
A	1	1	12	0,76	0.08
	1	2	15	1,19	0.16
	1	3	18	3	0.46
A	2	1	18	27	0,7
	2	2	21	94	4,29
	2	3	24	204	5,38
	2	4	27	314	13,47
	2	5	36	435	20,22
	2	6	33	568	25,9
	2	7	36	727	34,13
A	3	1	30	85	4,81
	3	2	33	197	10,78
	3	3	36	325	23,6
	3	4	39	415	25,64
	3	5	42	510	31,99
A	4	1	39	48	11,57
	4	2	42	125	13,46
	4	3	45	243	17,4
	4	4	48	348	27,98
	4	5	51	461	41,54
	4	6	54	525	43,83
A	5	1	48	5	22,24
	5	2	51	77	24,48
	5	3	54	191	31,29
	5	4	57	265	33,59
	5	5	60	374	38,17
	5	6	63	475	47,21
A	6	1	54	5	17,29
	6	2	57	36	21,85
	6	3	60	105	26,44
	6	4	63	185	26,44
	6	5	66	258	33,28
	6	6	69	385	39,96
	6	7	72	467	44,25
	6	8	75	529	46,33

Tableau IV.11 : Suite de la comparaison des résultats expérimentaux et ceux avec MATLAB

A	7	2	69	5	27,18
	7	3	72	21	31,55
	7	4	75	78	33,67
	7	5	78	168	35,75
	7	6	81	255	39,74
	7	7	84	351	43,47
	7	8	87	635	49,94
	7	9	90	515	52,57
A	8	1	84	22	13,68
	8	2	86	50	20,28
	8	3	88	80	24,48
	8	4	90	136	30,37
	8	5	92	211	35,62
	8	6	94	279	37,2
	8	7	96	333	41,3
	8	8	98	370	45,04
	8	9	100	435	45,62
	8	10	102	470	46,03
	8	11	104	532	46,28
	8	12	106	598	46,38
A	9	1	92	8	10,97
	9	2	94	10	10,97
	9	3	96	11	18,94
	9	4	98	19	18,94
	9	5	100	55	25,77
	9	6	102	81	27,24
	9	7	104	155	27,24
	9	8	106	203	32,88
	9	9	108	264	34,18
	9	10	110	330	34,96

Tableau IV.12 : Suite de la comparaison des résultats expérimentaux et ceux avec MATLAB

Cas	Ouverture De vanne (cm)	Essais	Débit en (m ³ /h)	Distance mesurée Expérimentalement En (cm)	Distance calculée sur MATLAB en (cm)
B	3	1	54	44	4.81
	3	2	57	218	4.81
B	4	1	63	4	9,73
	4	2	66	11	11,57
	4	3	69	62	13,46
	4	4	72	112	13,46
	4	5	75	202	15,4
B	5	1	75	3	9.44
	5	2	78	3	13.56
	5	3	81	11	13,56
	5	4	84	62	13,56
	5	5	87	112	13,56
	5	6	90	192	13,56
	5	7	93	266	17,84
	5	8	96	332	35,88
B	6	1	90	2	10,58
	6	2	93	4	12,79
	6	3	96	12	17,29
	6	4	99	42	17,29
	6	5	102	102	21,85
	6	6	105	195	31,01
	6	7	108	252	31,01
B	7	1	84	22	24,95
	7	2	86	50	31,55
	7	3	88	80	35,75
	7	4	90	136	41,64
	7	5	92	211	46,89
B	8	1	84	22	13,68
	8	2	86	50	20,28
	8	3	88	80	24,48
	8	4	90	136	30,37
	8	5	92	211	35,62
	8	6	94	279	37,2
	8	7	96	333	41,3
	8	8	98	370	45,04
	8	9	100	435	45,62
	8	10	102	470	46,03
	8	11	104	532	46,28
	8	12	106	598	46,38

Remarque

Le cas du déversoir n'a pas été traité, car MATLAB n'a pas été en mesure de simuler la toute petite variation des hauteurs même en réduisant le pas.

Discussion des résultats

D'après le tableau IV.7, nous pouvons remarquer une grande disparité entre les résultats obtenus expérimentalement et ceux réalisés par le logiciel MATLAB que ce soit pour le cas ou la vanne de fond ne présente aucun obstacle en aval ou en ayant des seuils terminaux. En effet, les résultats expérimentaux indiquent que la distance de formation du ressaut augmente avec le débit, ces distances peuvent atteindre les 500 cm, par ailleurs ceux calculés sur MATLAB ne dépassent pas les 50 cm. Cette disparité, peut être expliquée par le fait que l'équation des courbes de remous repose sur des hypothèses tels que le régime doit être non-uniforme et graduellement varié. Or les hypothèses de détermination des équations du régime graduellement varié affaiblissent la formulation de base du programme MATLAB ce qui fait que le non-respect de ses hypothèses donne des résultats éloignées.

Toutefois, Nous proposerons pour des études ultérieures de ce phénomène la méthode des caractéristiques qui utilise les différences finis pour la résolution de l'équation de saint venant pour venir à bout du problème de détermination de la distance de formation du ressaut.

IV.3. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons pu analyser les résultats expérimentaux obtenus par comparaison avec l'approche théorique du phénomène du ressaut hydraulique. Ces résultats ont été discutés pour les trois cas d'étude à savoir le cas de la vanne de fond sans obstacle en aval, de la vanne de fond avec seuils et du déversoir à crête arrondie puis ils ont été comparés. L'expérimentation a montré qu'en présence de seuils, les ressauts étaient plus stables, de distances plus courtes et de dissipations d'énergie plus importantes démontrant l'effet positif des seuils sur le ressaut.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à la relation liant la position du ressaut aux divers paramètres qui régissent le phénomène, suite à quoi des relations ont été proposées, ces dernières mettent en jeu des paramètres tantôt dimensionnels tantôt sans dimensions tout en ayant un bon coefficient de corrélation et une erreur quadratique minimale.

A la fin, nous avons établi une comparaison entre les distances mesurées expérimentalement et celles calculées avec un petit programme MATLAB et dont les résultats n'ont pas été fructueux.

Suite à ce travail accompli, nous pouvons suggérer quelques recommandations notamment :

- ❖ L'utilisation de la méthode des caractéristiques pour la détermination de la distance de formation du ressaut pour différents ouvrages de contrôle. En effet cette méthode dite des caractéristiques est une méthode explicite qui permet de calculer explicitement la

vitesse et la profondeur d'eau en tout point d'un plan en deux dimensions 2D (x,h), plan auquel nous allons projeter la forme de notre ressaut à partir de l'ouvrage de contrôle. L'utilisation de cette méthode nécessite d'outrepasser le problème de l'importance de la variation de la courbure des lignes d'écoulement tout en gardant comme hypothèse que la pression demeure hydrostatique.

- ❖ Exploiter la capacité naturelle ou contrôlée d'un ressaut à surélever le plan de charge aval.
- ❖ La mise en place de seuils en aval des barrages et retenue. Ces derniers permettent d'écrêter les crues et limiter ainsi les effets à l'aval. Ils ont donc un rôle important dans la protection contre les inondations car ils limitent la vitesse de montée du bief et contribuent ainsi à la protection des riverains et utilisateurs du cours d'eau. Ils raccourcissent la longueur du tablier du bassin de dissipation d'énergie et ils limitent l'érosion des berges. Quel que soit le type de seuil, il faut veiller à dissiper au maximum l'énergie. Surtout si la nature du matériau constituant le seuil est de rugosité faible (seuils en béton) ou si le fond du lit est très friable. Il est également recommandé, dans le cas de berges érodables, de prévoir des bajoyers se prolongeant suffisamment loin en aval pour éviter le sapement des berges.
- ❖ Éviter les terrains en pente pour l'établissement de retenue, le ressaut n'y sera que plus distant et la longueur de protection des berges aussi.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a été dédiée à la contribution de la détermination de la position du ressaut hydraulique dans le cas d'un canal rectangulaire, quatre chapitres répertoriés en deux grandes parties ont alors été nécessaires :

- Une partie bibliographique qui a mis en revue l'approche scientifique et théorique du phénomène ainsi que de la dissipation d'énergie.
- Une deuxième partie qui a traité du protocole expérimental qui a été adopté ainsi que de l'analyse et de la discussion des résultats.

Dans ce premier chapitre, nous avons pu définir le ressaut en tant que phénomène hydraulique à part entière. Nous avons pu décrire le phénomène en question et ses multiples apparitions dans la nature, puis nous nous sommes intéressés à ses différents types à travers une classification issue de plusieurs auteurs notamment Andersen (1978), Armando Lencastre et Bradley et Peterka (1957). Nous avons aussi pu énumérer et décrire les principales caractéristiques du ressaut qui sont ses hauteurs conjuguées, sa longueur et sa capacité de dissipation d'énergie suivant l'approche de différents auteurs comme Belanger et Hager dont les équations ont été reprises et validées récemment par plusieurs auteurs notamment Debabèche et Achour, Nous avons aussi proposé des abaques pour la détermination rapide de ces mêmes caractéristiques.

Le second chapitre de notre travail a été consacré à la dissipation d'énergie par ressaut, nous avons pu définir les multiples utilisations du ressaut hydraulique et comment que l'homme a su dompter ce phénomène naturel et l'utiliser dans sa vie quotidienne, nous avons aussi vu la capacité de dissipation d'énergie des ressauts ainsi que les différents ouvrages de dissipation qui utilisent le ressaut comme procédé d'atténuation d'énergie. Puis nous avons entamé la localisation du ressaut et expliqué la méthode graphique de la détermination de la position exacte du ressaut vu qu'il n'y a pas de formule empirique à cet effet.

Le troisième chapitre a été consacré à l'explication du dispositif utilisé dans l'étude expérimentale du ressaut hydraulique en détails ainsi que tous ces composants avec illustrations. Nous avons développé le protocole expérimental pour les trois expériences réalisées dans cette étude à savoir :

- L'étude du ressaut en aval d'une vanne plane sans obstacle en aval ;
- L'étude du ressaut en aval d'une vanne plane avec des seuils dentés en aval ;
- L'étude du ressaut en aval d'un déversoir à crête arrondie sans obstacle en aval ;

Le dernier chapitre a été consacré à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus, en effet nous avons pu analyser les résultats expérimentaux obtenus par comparaison avec l'approche théorique du phénomène, Ces résultats ont été discutés pour les trois cas d'étude et ont été intégrés pour la détermination de relations liant la position du ressaut aux divers paramètres dimensionnels et adimensionnels qui régissent le phénomène, suite auxquelles des recommandations ont été données pour une exploitation adéquate de ce phénomène.

Bibliographie

Références bibliographiques

Andersen J.V. M., 1978. Undular hydraulic jump, Proc, ASCE, j, Hydraulics Division, Vol. 104.

Achour B., Debabèche M., Khattaoui M., Bedjaoui A., 2002. Ressaut hydraulique classique et contrôlé dans quelques profils de canaux. LARHYSS Journal 3^{ème} Edition du 2 Mai 2002. vol N°1, 37-72.

Achour B., Khattaoui M., 2007. Hystérésis du ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire, Courrier du savoir, 22-31.

Achour B., 2007. Effect of sill in a triangular channel, J. Hydr. Research, 45(1), 135-139.

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

Bradley J.N., 1957. The hydraulic design of stilling basins: Hydraulic jumps on a horizontal apron, paper 1401, Proc. ASCE, J. Hyd. Div., Vol. 83.

Bensidiahmed H., 2016. Modélisation de l'écoulement dans un canal rectangulaire. Mémoire de Master. ENSH/Blida.

Chow V.T., 1959. Open-channel Hydraulics. McGraw Hill, New York.

Carlier M., 1972. Livre d'Hydraulique générale et appliquée, édition Eyrolles. Paris.

Chanson H., 2009. Experimental investigation of bubbly flow and turbulence in hydraulic jumps.

Chanson H., 2009. Development of the Bélanger Equation and Backwater Equation by Jean-Baptiste Bélanger (1828). J. Hydraulic. Eng., ASCE.

Debabèche M., 2003. Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, Université de Biskra.

Debabèche M., Kateb S., Ghomri A., 2006. Etude du Ressaut Hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses. Journal of hydraulic research., 05,187-196.

Forester J.W., Skrinde R.A., 1950. Control of the hydraulic jump by sills. ASCE Transactions, 115(2415) : 973--987.

Goubaa A., 2014. Modélisation Numérique Des Courbes de Remous dans les Canaux Découverts de Profil Non Prismatique. Mémoire de Magistère. Université de Hadj Lakhder Batna.

Hager W. H., 1988. Hydraulic jump in U-shaped channel, Proc.ASCE, J. Hydraulic Engineering.

Hager W.H., 1990. Classical hydraulic jump: length of roller. J. Hydraulic. Res., Vol. 28, n°5.

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

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

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

Murzyn F., 2007. Free-surface fluctuations in hydraulic jumps: experimental observations. Exp. Therm. Fluid Sci, Vol 33.

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

Peterka A.J, 1964. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. US Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No.25.

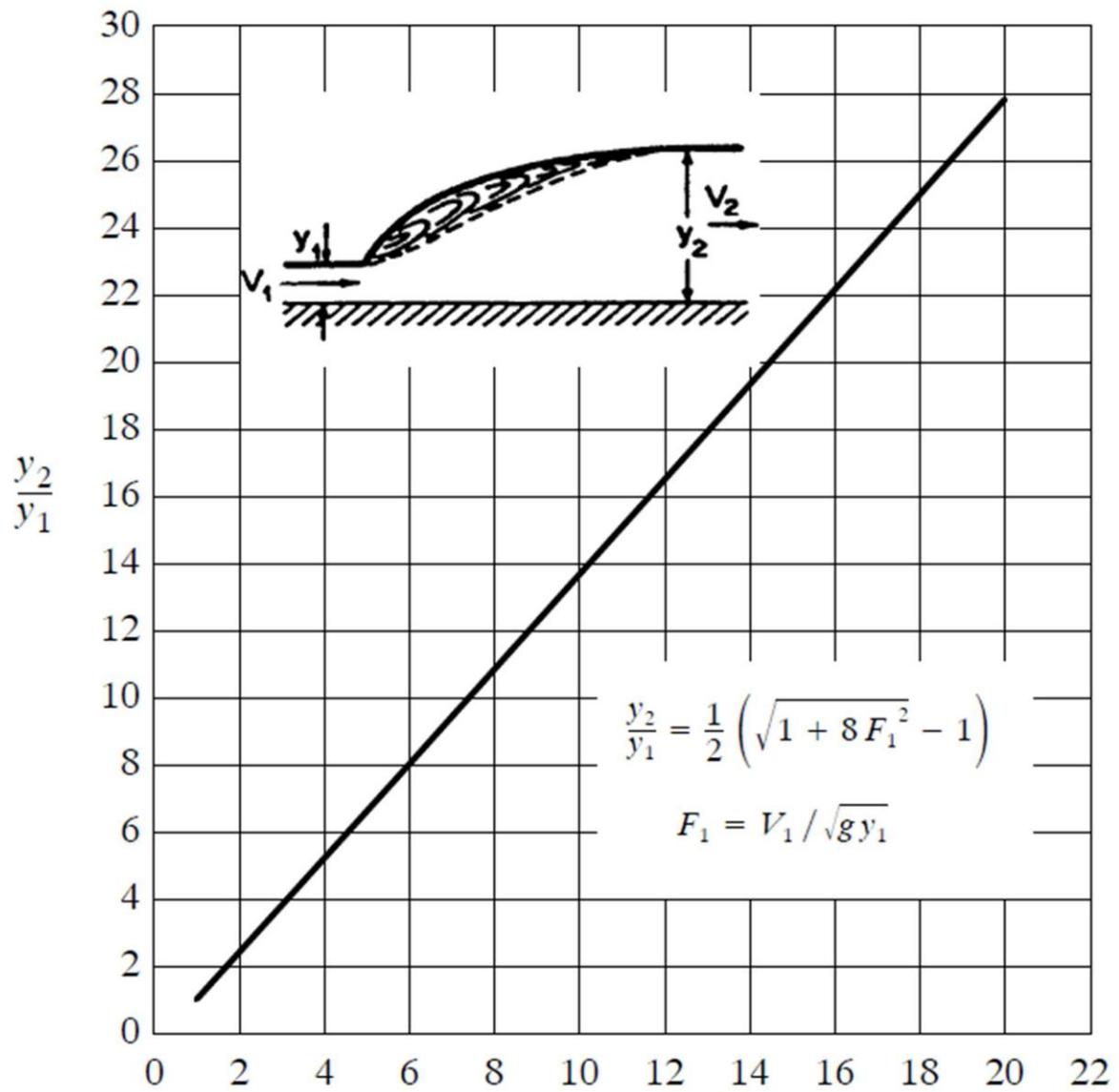
Resch , Leutheusser, 1971. Le Ressaut hydraulique : Mesures de turbulence dans la région diphasique. La Houille blanche., n°4.

Resch et al., 1976. Étude de la structure cinématique et dynamique du ressaut hydraulique. J. Hydraulic. Res., Vol. 14, n°4..

Zimmerman W.B., 2000. Characterization of hydraulic jumps/falls with surface tension variations in thin film flows 349–364

Annexes

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



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

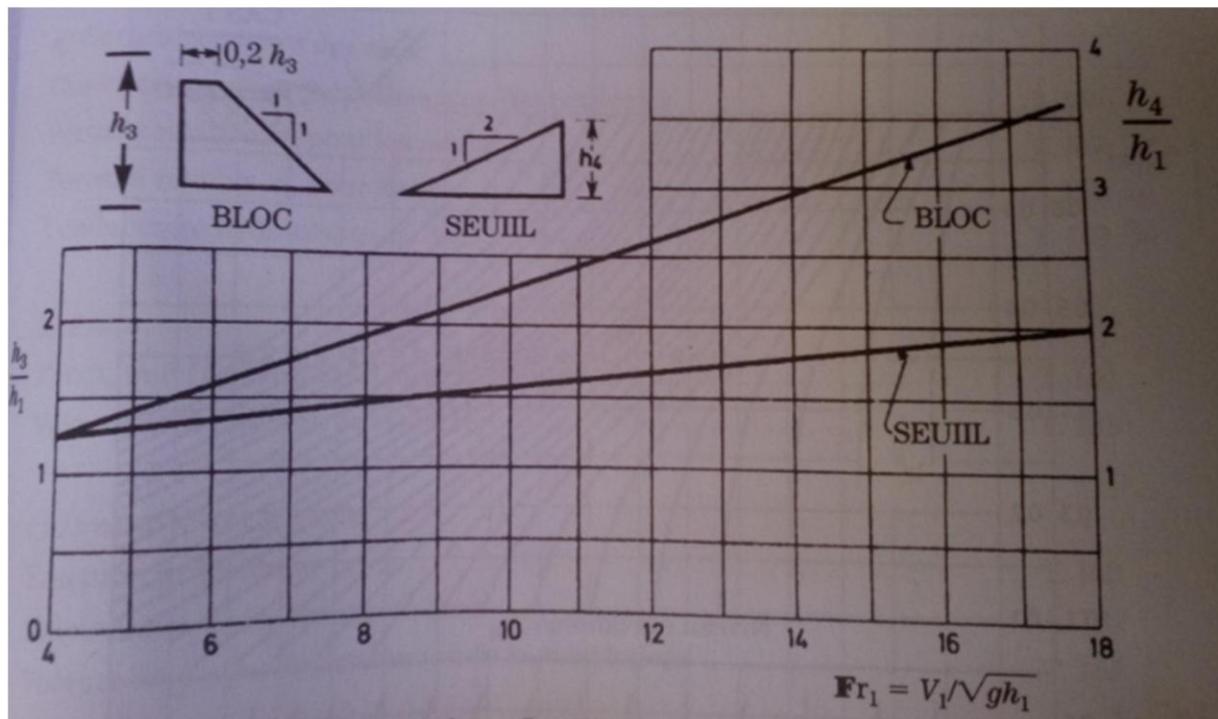


Tableau Annexe III.1 : Suite des résultats des essais pour le cas de la vanne de fond sans obstacle en aval

Ouverture De vanne (cm)	Essais	Débit (m ³ /h)	H ₁ (Cm)	H ₂ (Cm)	H _{amont} (Cm)	L (Cm)	D (Cm)	FR ₁	Type De Ressaut
3	1	30	1,9	7,5	11,8	68,3	85	3,29	R. Oscillatoire
3	2	33	2,3	7,4	14,3	64,0	197	2,72	R. Oscillatoire
3	3	36	3	6,4	18,9	49,3	325	1,99	Ressaut faible
3	4	39	3,1	7	19,5	53,6	415	2,05	Ressaut faible
3	5	42	3,4	7,1	22	51,9	510	1,92	Ressaut faible
4	1	39	2,7	8	12,1	63,7	48	2,52	R. Oscillatoire
4	2	42	2,8	8,2	13,6	64,5	125	2,57	R. Oscillatoire
4	3	45	3	8,9	15,7	68,5	243	2,49	Ressaut faible
4	4	48	3,5	8,5	17,5	61,2	348	2,10	Ressaut faible
4	5	51	4,1	7,9	19,7	51,3	461	1,76	Ressaut faible
4	6	54	4,2	8,3	21,2	53,7	525	1,80	Ressaut faible
5	1	48	3,6	8,9	12,4	62,4	5	2,02	Ressaut faible
5	2	51	3,7	9,1	13,7	63,2	77	2,06	Ressaut faible
5	3	54	4	9,1	15,3	60,8	191	1,94	Ressaut faible
5	4	57	4,1	9,2	16,7	60,8	265	1,97	Ressaut faible
5	5	60	4,3	9,2	18,3	59,2	374	1,93	Ressaut faible
5	6	63	4,7	9,1	19,9	55,2	475	1,77	Ressaut faible
6	1	54	3,8	9,6	13,2	63	5	2,09	Ressaut faible
6	2	57	4	9,7	14	62	36	2,04	Ressaut faible
6	3	60	4,2	9,9	15,3	62	105	2,00	Ressaut faible
6	4	63	4,2	10	16,4	63,2	185	2,10	Ressaut faible
6	5	66	4,5	9,9	17,6	59	258	1,98	Ressaut faible
6	6	69	4,8	9,6	19,1	55,1	385	1,88	Ressaut faible
6	7	72	5	9,2	20,4	50,1	467	1,85	Ressaut faible
6	8	75	5,1	10	21,9	55,9	529	1,87	Ressaut faible
7	2	69	4,7	10,6	14,4	62,7	5	1,94	Ressaut faible
7	3	72	4,9	10,9	15,1	63,3	21	1,91	Ressaut faible
7	4	75	5	11,1	16	64,1	78	1,93	Ressaut faible
7	5	78	5,1	11,3	17,3	64,8	168	1,94	Ressaut faible

7	6	81	5,3	11,5	18,5	64,8	255	1,91	Ressaut faible
7	7	84	5,5	11,7	19,8	64	351	1,87	Ressaut faible
7	8	87	5,9	11,4	20,8	60	635	1,74	Ressaut faible
7	9	90	6,1	11,7	22,1	60,1	515	1,71	Ressaut faible
8	1	84	4,6	13,3	16,2	81,8	22	2,44	Ressaut faible
8	2	86	4,9	13,2	16,9	78,9	50	2,28	Ressaut faible
8	3	88	5,1	13,2	17,5	77,5	80	2,19	Ressaut faible
8	4	90	5,4	13	18	74	136	2,06	Ressaut faible
8	5	92	5,7	12,6	18,9	69	211	1,94	Ressaut faible
8	6	94	5,8	13	19,6	71,1	279	1,93	Ressaut faible
8	7	96	6,1	12,6	20	66,2	333	1,83	Ressaut faible
8	8	98	6,5	12,2	21	60,4	370	1,70	Ressaut faible
8	9	100	6,6	12,4	21,6	61,1	435	1,71	Ressaut faible
8	10	102	6,7	12,5	22,2	60	470	1,71	Ressaut faible
8	11	104	6,8	12,7	23,1	61,9	532	1,70	Ressaut faible
8	12	106	7,1	12,5	23,8	58,9	598	1,69	Ressaut faible
9	1	92	5	13,9	16,4	83,2	8	2,36	Ressaut faible
9	2	94	5	14,2	16,8	85,3	10	2,41	Ressaut faible
9	3	96	5,4	13,7	17,2	78,9	11	2,20	Ressaut faible
9	4	98	5,4	14	17,4	81,1	19	2,24	Ressaut faible
9	5	100	5,8	13,7	17,9	76,1	55	2,05	Ressaut faible
9	6	102	5,9	13,7	18,4	75,4	81	2,04	Ressaut faible
9	7	104	5,9	14	19,2	77,5	155	2,08	Ressaut faible
9	8	106	6,4	13,5	19,7	70,4	203	1,88	Ressaut faible
9	9	108	6,6	13,4	20,4	68,3	264	1,83	Ressaut faible
9	10	110	7	13,2	21	64,0	330	1,70	Ressaut faible

Tableau Annexe III.2 : Suite de l'analyse des résultats des essais de la vanne de fond sans obstacle en aval

Ouverture De vanne (cm)	Débit (m ³ /h)	H ₂ Experi (Cm)	H ₂ théori (Cm)	L Experi (Cm)	L Smetana (Cm)	L Safranez (Cm)	L District (Cm)	ΔH (C.C.E)	ΔH ₂ %	ΔH %
3	30	7,5	7,94	68,3	7,94	33,6	33,75	3,08	5,48	25,32
3	33	7,4	7,76	64,0	7,76	30,6	33,3	1,95	4,60	18,08
3	36	6,4	7,07	49,3	7,07	20,4	28,8	0,51	9,46	5,73
3	39	7	7,57	53,6	7,57	23,4	31,5	0,68	7,57	7,10
3	42	7,1	7,70	51,9	7,70	22,2	31,95	0,52	7,80	5,42
4	39	8	8,38	63,7	31,8	36	26,5	1,72	4,51	15,26
4	42	8,2	8,88	64,5	32,4	36,9	27	1,71	7,70	14,21
4	45	8,9	9,15	68,5	35,4	40,05	29,5	1,92	2,75	15,68
4	48	8,5	8,81	61,2	30	38,25	25	1,05	3,52	9,34
4	51	7,9	8,38	51,3	22,8	35,55	19	0,42	5,69	4,04
4	54	8,3	8,80	53,7	24,6	37,35	20,5	0,49	5,68	4,49
5	48	8,9	8,63	62,4	31,8	40,05	26,5	1,16	-3,19	15,78
5	51	9,1	9,07	63,2	32,4	40,95	27	1,17	-0,33	14,88
5	54	9,1	9,14	60,8	30,6	40,95	25,5	0,91	0,44	16,71
5	57	9,2	9,56	60,8	30,6	41,4	25,5	0,88	3,75	8,71
5	60	9,2	9,79	59,2	29,4	41,4	24,5	0,74	6,02	3,44
5	63	9,1	9,68	55,2	26,4	40,95	22	0,50	5,96	4,08
6	54	9,6	9,50	63	34,8	43,2	29	1,34	-1,02	11,03
6	57	9,7	9,74	62	34,2	43,65	28,5	1,19	0,41	9,65
6	60	9,9	9,97	62	34,2	44,55	28,5	1,11	0,68	8,83
6	63	10	10,55	63,2	34,8	45	29	1,16	5,24	8,62
6	66	9,9	10,58	59	32,4	44,55	27	0,88	6,41	6,61
6	69	9,6	10,61	55,1	28,8	43,2	24	0,60	9,49	4,51
6	72	9,2	10,81	50,1	25,2	41,4	21	0,40	9,32	4,17
6	75	10	11,17	55,9	29,4	45	24,5	0,58	9,57	4,33
7	66	10,4	10,40	61,9	34,8	46,8	29	1,02	0,01	7,87
7	69	10,6	10,78	62,7	35,4	47,7	29,5	1,03	1,68	7,59
7	72	10,9	10,98	63,3	36	49,05	30	1,01	0,71	7,33
7	75	11,1	11,34	64,1	36,6	49,95	30,5	1,02	2,13	7,17

7	78	11,3	11,70	64,8	37,2	50,85	31	1,03	3,41	7,02
7	81	11,5	11,88	64,8	37,2	51,75	31	0,98	3,16	6,55
7	84	11,7	12,05	64	37,2	52,65	31	0,93	2,87	6,13
7	87	11,4	11,88	60	33	51,3	27,5	0,62	4,08	4,16
7	90	11,7	12,05	60,1	33,6	52,65	28	0,62	2,92	4,08
8	84	13,3	13,76	81,8	52,2	59,85	43,5	2,69	3,36	14,68
8	86	13,2	13,51	78,9	49,8	59,4	41,5	2,21	2,29	12,57
8	88	13,2	13,47	77,5	48,6	59,4	40,5	1,97	2,01	11,37
8	90	13	13,25	74	45,6	58,5	38	1,56	1,89	9,28
8	92	12,6	13,05	69	41,4	56,7	34,5	1,14	3,44	6,96
8	94	13	13,21	71,1	43,2	58,5	36	1,24	1,56	7,45
8	96	12,6	13,02	66,2	39	56,7	32,5	0,89	3,22	5,48
8	98	12,2	12,69	60,4	34,2	54,9	28,5	0,58	3,84	3,68
8	100	12,4	12,84	61,1	34,8	55,8	29	0,60	3,43	3,71
8	102	12,5	12,99	60	34,8	56,25	29	0,58	3,79	3,58
8	104	12,7	13,14	61,9	35,4	57,15	29,5	0,59	3,36	3,62
8	106	12,5	12,98	58,9	32,4	56,25	27	0,44	3,72	2,72
9	92	13,9	14,39	83,2	53,4	62,55	44,5	2,54	3,38	13,39
9	94	14,2	14,75	85,3	55,2	63,9	46	2,74	3,70	14,02
9	96	13,7	14,28	78,9	49,8	61,65	41,5	1,93	4,09	10,49
9	98	14	14,63	81,1	51,6	63	43	2,10	4,30	11,09
9	100	13,7	14,20	76,1	47,4	61,65	39,5	1,55	3,53	8,60
9	102	13,7	14,35	75,4	46,8	61,65	39	1,47	4,52	8,06
9	104	14	14,68	77,5	48,6	63	40,5	1,61	4,62	8,60
9	106	13,5	14,11	70,4	42,6	60,75	35,5	1,04	4,29	5,85
9	108	13,4	14,08	68,3	40,8	60,3	34	0,89	4,83	5,04
9	110	13,2	13,73	64,0	37,2	59,4	31	0,64	3,89	3,76

Tableau Annexe III.3 : Suite des résultats des essais pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

Ouverture De vanne (cm)	Essais	Débit (m ³ /h)	H ₁ (Cm)	H ₂ (Cm)	H _{amont} (Cm)	L (Cm)	D (Cm)	FR ₁	Type De Ressaut
5	1	75	3	15,5	29,6	99,8	3	4,14	R. Oscillatoire
5	2	78	3,2	16	30,6	102,2	3	3,91	R. Oscillatoire
5	3	81	3,2	16,2	31,5	103,8	11	4,06	R. Oscillatoire
5	4	84	3,2	16,4	33,9	105,4	62	4,21	R. Oscillatoire
5	5	87	3,2	17	35,7	110,2	112	4,36	R. Oscillatoire
5	6	90	3,2	17,6	38,1	115,0	192	4,51	R. Oscillatoire
5	7	93	3,4	17,4	40,6	111,8	266	4,26	R. Oscillatoire
5	8	96	4,2	17	43	102,2	332	3,20	R. Oscillatoire
6	1	90	3,5	16,9	29,6	99,9	2	3,94	R. Oscillatoire
6	2	93	3,6	17,6	30,3	104,3	4	3,91	R. Oscillatoire
6	3	96	3,8	17,4	31	101,4	12	3,72	R. Oscillatoire
6	4	99	3,8	17,5	33	102,1	42	3,84	R. Oscillatoire
6	5	102	4	17,6	34,5	101,4	102	3,66	R. Oscillatoire
6	6	105	4,4	17,4	36,6	96,9	195	3,27	R. Oscillatoire
6	7	108	4,4	17,9	38,6	100,6	252	3,36	R. Oscillatoire
7	1	84	4,6	13	16,2	64,6	22	2,44	R. Oscillatoire
7	2	86	4,9	13	16,9	62,3	50	2,28	R. Oscillatoire
7	3	88	5,1	12,9	17,5	60,0	80	2,19	R. Oscillatoire
7	4	90	5,4	12,5	18	54,6	136	2,06	R. Oscillatoire
7	5	92	5,7	12,6	18,9	53,0	211	1,94	R. Oscillatoire
8	1	84	4,6	13	16,2	64,6	22	2,44	Ressaut faible
8	2	86	4,9	12,9	16,9	61,5	50	2,28	Ressaut faible
8	3	88	5,1	12,9	17,5	60,0	80	2,19	Ressaut faible
8	4	90	5,4	12,7	18	56,1	136	2,06	Ressaut faible
8	5	92	5,7	12,5	18,9	52,3	211	1,94	Ressaut faible
8	6	94	5,8	12,6	19,6	52,3	279	1,93	Ressaut faible
8	7	96	6,1	12	20	45,4	333	1,83	Ressaut faible
8	8	98	6,5	12,3	21	44,6	370	1,72	Ressaut faible
8	9	100	6,6	11,6	21,6	38,4	435	1,71	Ressaut faible

8	10	102	6,7	12,6	22,2	45,4	470	1,71	Ressaut faible
8	11	104	6,8	12,6	23,1	44,6	532	1,7	Ressaut faible
8	12	106	7,1	12,3	23,8	40,0	598	1,7	Ressaut faible

Tableau Annexe III.4 : Suite de l'analyse des résultats des essais pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

Ouverture De vanne (cm)	Débit (m ³ /h)	H ₂ Experi (Cm)	H ₂ théori (Cm)	L Experi (Cm)	L Smetana (Cm)	L Safranez (Cm)	L District (Cm)	ΔH (C.C.E)	Δh ₂ %	Δh %
5	75	15,5	16,14	99,8	75	69,75	62,5	10,50	4,0	36,53
5	78	16	16,17	102,2	76,8	72	64	10,24	1,1	37,01
5	81	16,2	16,85	103,8	78	72,9	65	10,60	3,9	35,81
5	84	16,4	17,53	105,4	79,2	73,8	66	10,96	6,4	34,69
5	87	17	18,21	110,2	82,8	76,5	69	12,08	6,6	35,90
5	90	17,6	18,88	115,0	86,4	79,2	72	13,25	6,8	37,04
5	93	17,4	18,84	111,8	84	78,3	70	11,60	7,7	33,89
5	96	17	17,03	102,2	76,8	76,5	64	7,34	0,2	28,55
6	90	16,9	17,85	99,9	80,4	76,05	67	10,17	5,3	33,09
6	93	17,6	18,18	104,3	84	79,2	70	10,83	3,2	34,83
6	96	17,4	18,18	101,4	81,6	78,3	68	9,51	4,3	31,61
6	99	17,5	18,80	102,1	82,2	78,75	68,5	9,67	6,9	30,44
6	102	17,6	18,80	101,4	81,6	79,2	68	8,93	6,4	29,02
6	105	17,4	18,24	96,9	78	78,3	65	7,17	4,6	25,75
6	108	17,9	18,81	100,6	81	80,55	67,5	7,81	4,9	26,73
7	84	13	13,76	64,6	50,4	58,5	42	2,48	5,5	13,51
7	86	13	13,51	62,3	48,6	58,5	40,5	2,09	3,8	11,86
7	88	12,9	13,47	60,0	46,8	58,05	39	1,80	4,2	10,39
7	90	12,5	13,25	54,6	42,6	56,25	35,5	1,33	5,7	7,87
7	92	12,6	13,05	53,0	41,4	56,7	34,5	1,14	3,4	6,96
8	84	13	13,76	64,6	50,4	58,5	42	2,48	5,5	13,51
8	86	12,9	13,51	61,5	48	58,05	40	2,02	4,5	11,51
8	88	12,9	13,47	60,0	46,8	58,05	39	1,80	4,2	10,39
8	90	12,7	13,25	56,1	43,8	57,15	36,5	1,42	4,2	8,42
8	92	12,5	13,05	52,3	40,8	56,25	34	1,10	4,2	6,71
8	94	12,6	13,21	52,3	40,8	56,7	34	1,08	4,6	6,47
8	96	12	13,02	45,4	35,4	54	29,5	0,70	7,8	4,30
8	98	12,3	12,69	44,6	34,8	55,35	29	0,61	3,1	3,85
8	100	11,6	12,84	38,4	30	52,2	25	0,41	9,7	2,54

8	102	12,6	12,99	45,4	35,4	56,7	29,5	0,61	3,0	3,74
8	104	12,6	13,14	44,6	34,8	56,7	29	0,57	4,1	3,46
8	106	12,3	12,98	40,0	31,2	55,35	26	0,40	5,3	2,47

Tableau Annexe III.5 : Suite des résultats des essais pour le cas du déversoir à crête arrondie

Pente (%)	Essais	Débit (m ³ /h)	H ₁ (Cm)	H ₂ (Cm)	H _{amont} (Cm)	L (Cm)	D (Cm)	FR ₁	Type De Ressaut
0.1	1	18	2	4	35,6	15,4	426	1,83	Ressaut faible
0.1	2	20	2,2	4,4	35,9	16,9	475	1,76	Ressaut faible
0.1	3	22	2,5	4,5	36,3	15,4	517	1,60	R. Ondulé
0.1	4	24	2,7	4,5	36,5	13,8	560	1,55	R. Ondulé
0.1	5	26	2,9	4,7	36,7	13,8	617	1,51	R. Ondulé
0.1	6	28	2,9	5	37	16,1	660	1,63	R. Ondulé
0.1	7	30	3	5,4	37,4	18,4	690	1,66	R. Ondulé
0.1	8	32	3,3	5,5	37,4	16,9	720	1,53	R. Ondulé
0.1	9	34	3,4	5,8	37,8	18,4	760	1,56	R. Ondulé
0.2	1	18	2,3	3,6	35,6	10,0	546	1,48	R. Ondulé
0.2	2	20	2,4	3,9	36	11,5	605	1,54	R. Ondulé
0.2	3	22	2,8	4	36,3	9,2	660	1,35	R. Ondulé
0.2	4	24	2,8	4,3	36,6	11,5	699	1,47	R. Ondulé
0.2	5	26	3	4,4	36,8	10,8	727	1,44	R. Ondulé
0.2	6	28	3,3	4,7	37	10,8	767	1,34	R. Ondulé
0.2	7	30	3,5	4,9	37,2	10,8	809	1,31	R. Ondulé
0.2	8	32	3,6	5,1	37,5	11,5	835	1,34	R. Ondulé

Tableau Annexe III.6 : Suite de l'analyse des résultats des essais pour le cas du déversoir à crête arrondie

Pente (%)	Débit (m³/h)	H₂ Experi (Cm)	H₂ théori (Cm)	L Experi (Cm)	L Smetana (Cm)	L Safranez (Cm)	L District (Cm)	ΔH (C.C.E)	Δh₂ %	Δh %
0.1	18	4	4,26	15,4	12	18	10	0,25	6,2	4,68
0.1	20	4,4	4,48	16,9	13,2	19,8	11	0,28	1,8	4,91
0.1	22	4,5	4,53	15,4	12	20,25	10	0,18	0,8	3,12
0.1	24	4,5	4,73	13,8	10,8	20,25	9	0,12	4,9	2,02
0.1	26	4,7	4,91	13,8	10,8	21,15	9	0,11	4,4	1,72
0.1	28	5	5,38	16,1	12,6	22,5	10,5	0,16	7,1	2,37
0.1	30	5,4	5,69	18,4	14,4	24,3	12	0,21	5,1	3,00
0.1	32	5,5	5,69	16,9	13,2	24,75	11	0,15	3,3	2,04
0.1	34	5,8	5,98	18,4	14,4	26,1	12	0,18	2,9	2,33
0.2	18	3,6	3,80	10,0	7,8	16,2	6,5	0,07	5,3	1,38
0.2	20	3,9	4,18	11,5	9	17,55	7,5	0,09	6,6	1,71
0.2	22	4	4,12	9,2	7,2	18	6	0,04	2,8	0,72
0.2	24	4,3	4,59	11,5	9	19,35	7,5	0,07	6,3	1,20
0.2	26	4,4	4,77	10,8	8,4	19,8	7	0,05	7,9	0,85
0.2	28	4,7	4,82	10,8	8,4	21,15	7	0,04	2,5	0,71
0.2	30	4,9	4,99	10,8	8,4	22,05	7	0,04	1,8	0,61
0.2	32	5,1	5,28	11,5	9	22,95	7,5	0,05	3,4	0,67

Tableau Annexe III.7 : Suite de la comparaison entre les différentes relations obtenus pour le cas de la vanne de fond sans obstacles en aval

Ouverture De la vanne En (cm)	Débit Q en (m ³ /h)	Distance mesurée En (cm)	Distance calculée Par D _{final} en (cm)	Distance calculée Par Eq.1 en (cm)	Distance calculée Par Eq.2 en (cm)	Distance calculée Par Eq.3 en (cm)
4	36	48	35,16	89,46	52,14	52,43
4	39	125	71,70	224,57	136,4	135,95
4	42	243	172,79	21,02	254,35	253,89
4	39	348	279,39	187,69	355,46	354,76
4	42	461	405,56	397,38	479,03	478,58
4	45	525	477,17	385,33	563,28	562,44
5	48	5	39,13	-11,25	-5,57	-5,48
5	51	77	75,44	72,47	80,73	80,34
5	54	191	150,66	150,39	186,94	186,49
5	48	265	231,24	263,54	279,88	279,2
5	51	374	327,10	352,38	386,09	385,47
5	54	475	415,97	398,24	492,31	491,8
6	57	5	58,18	14,28	-40,45	-38,19
6	60	36	87,45	85,29	17,97	19,39
6	63	105	150,66	126,75	112,9	114,2
6	54	185	213,38	265,85	193,23	194,19
6	57	258	285,41	342,97	280,86	281,67
6	60	385	373,01	487,3	390,4	391,49
6	63	467	440,91	499,71	485,33	486,49
6	66	529	504,83	501,84	594,87	596,39
7	69	5	105,16	181,65	-41,18	-41,41
7	72	21	139,98	193,71	12,09	11,21
7	75	78	189,95	227,33	80,57	79,37
7	69	168	267,34	244,17	179,49	178,56
7	72	255	338,79	271,86	270,81	270,05
7	75	351	410,80	267,37	369,73	369,31
7	78	635	459,63	364,46	445,82	445,36
7	81	515	511,98	330,9	544,75	544,69
8	84	22	201,60	58,24	15,72	15,11
8	87	50	243,24	91,63	68,64	68,09
8	90	80	279,39	92,22	113,99	113,37
8	84	136	309,35	150,62	151,79	150,96
8	86	211	361,76	259,8	219,82	219,4
8	88	279	400,27	196,07	272,73	272,43
8	90	333	421,09	294,46	302,97	302,35
8	92	370	468,56	377,07	378,56	378,52
8	94	435	493,46	360,74	423,91	423,88

8	96	470	515,43	376,37	469,27	469,25
8	98	532	542,55	360,07	537,3	537,75
8	100	598	558,70	418,64	590,21	590,84
9	92	8	213,38	90,2	-29,73	-28,66
9	94	10	237,23	83,82	-1,13	-0,36
9	96	11	261,31	187,62	27,48	27,95
9	98	19	273,37	178,6	41,78	41,66
9	100	55	303,39	211,73	77,54	77,3
9	102	81	332,96	257,23	113,3	112,95
9	104	155	378,56	247,28	170,51	170,53
9	106	203	405,56	315,36	206,27	206,2
9	108	264	440,91	356,98	256,33	256,48
9	110	330	468,56	361,44	299,23	299,48
RMSE		-	170.24	119	34.29	34.28
Taux de corrélation en (%)			62.62	79.44	98.42	98.47

Tableau Annexe III.8 : Suite de la comparaison entre les différentes relations obtenus pour le cas de la vanne de fond avec seuils terminaux

Ouverture De la vanne En (cm)	Débit Q en (m ³ /h)	Distance mesurée En (cm)	Distance calculée Par Eq.1 en (cm)	Distance calculée Par Eq.2 en (cm)	Distance calculée Par Eq.3 en (cm)
5	75	3	-44,67	29,06	-83,16
5	78	3	-28,07	42,46	-18,81
5	81	11	13,55	54,53	45,47
5	84	62	88,28	86,71	80,64
5	87	112	114,32	110,84	125,08
5	90	192	152,54	143,02	156,99
5	93	266	261,68	176,54	185,59
5	96	332	402,39	208,72	214,59
6	90	2	12,67	110,13	4,04
6	93	4	1,21	116,04	61,46
6	96	12	70,56	121,94	117,47
6	99	42	137,88	138,8	141,04
6	102	102	196,26	151,45	175,29
6	105	195	301,87	169,15	193,96
6	108	252	329,03	186,02	213,85
7	84	22	36,14	-0,58	-6,46
7	86	50	86,15	16,53	32,46
7	88	80	126,02	31,2	72,48
7	90	136	191,43	43,43	113,63
7	92	211	229,05	65,43	146,83
8	84	22	36,14	74	27,35
8	86	50	92,74	117,03	78,19
8	88	80	126,02	153,91	128,43
8	90	136	178,25	184,64	178,11
8	92	211	235,64	239,96	226,64
8	94	279	257,19	282,98	274,77
8	96	333	319,66	307,57	322,63
8	98	370	353,73	369,03	369,19
8	100	435	409,37	405,91	415,63
8	102	470	383,78	442,79	461,51
8	104	532	413,45	498,11	506,49
8	106	598	461,47	541,13	551,18
RMSE	-	-	59.31	64.62	48.73
Taux de corrélation en (%)			92.63	91.18	95.08

Tableau Annexe III.9 : Suite de la comparaison entre les différentes relations obtenus pour le cas du déversoir à crête arrondie

Pente (%)	Débit Q en (m³/h)	Distance mesurée En (cm)	Distance calculée Par la relation globale en (cm)
0.1	18	426	424,39
0.1	20	475	469,63
0.1	22	517	529,94
0.1	24	560	560,10
0.1	26	617	590,26
0.1	28	660	635,49
0.1	30	690	695,81
0.1	32	720	695,81
0.1	34	760	756,12
0.2	18	546	555,65
0.2	20	605	615,97
0.2	22	660	661,20
0.2	24	699	706,44
0.2	26	727	736,59
0.2	28	767	766,75
0.2	30	809	796,91
0.2	32	835	842,14

Tableau Annexe III.10 : Détails de calcul du coefficient de Manning

Pente en (m/m)	Débit Q En (m ³ /h)	Pour L= 2m H en (m)	Cft de Manning global	Cft de Manning Par Hec Ras	Pour L = 8m H en (m)	Cft de Manning global	Cft de Manning Par Hec Ras
-0.005	10	0.087	0,0244	0,0244	0.056	0,0212	0,0193
	20	0.11	0,0261	0,0288	0.072	0,0230	0,0221
	30	0.124	0,0273	0,0291	0.086	0,0244	0,0236
	40	0.137	0,0283	0,0294	0.099	0,0255	0,0255
	50	0.149	0,0291	0,0302	0.11	0,0264	0,0264
	60	0.159	0,0299	0,0304	0.12	0,0271	0,0277
	70	0.171	0,0305	0,0320	0.129	0,0278	0,0284
	80	0.18	0,0312	0,0316	0.138	0,0285	0,0290
	90	0.189	0,0317	0,0321	0.147	0,0291	0,0296
	100	0.198	0,0322	0,0326	0.155	0,0297	0,0297
0	10	0.042	0,0188	0,0200	0.035	0,0178	0,0178
	20	0.059	0,0212	0,0222	0.05	0,0202	0,0202
	30	0.073	0,0229	0,0237	0.062	0,0217	0,0217
	40	0.085	0,0241	0,0249	0.073	0,0230	0,0230
	50	0.095	0,0251	0,0251	0.083	0,0240	0,0240
	60	0.104	0,0261	0,0248	0.092	0,0249	0,0249
	70	0.114	0,0268	0,0262	0.10	0,0257	0,0244
	80	0.122	0,0275	0,0263	0.108	0,0263	0,0257
	90	0.13	0,0282	0,0265	0.116	0,0269	0,0269
	100	0.143	0,0288	0,0293	0.124	0,0276	0,0270
0.005	10	0,018	0,0096	0,0100	0,016	0,0079	0,0273
	20	0,027	0,0094	0,0096	0,02	0,0057	0,0584
	30	0,037	0,0105	0,0122	0,034	0,0091	0,0347
	40	0,045	0,0109	0,0134	0,042	0,0097	0,0350
	50	0,051	0,0107	0,0130	0,048	0,0097	0,0390
	60	0,057	0,0107	0,0132	0,056	0,0104	0,0378
	70	0,067	0,0119	0,0162	0,063	0,0108	0,0371
	80	0,07	0,0112	0,0149	0,07	0,0112	0,0367
	90	0,077	0,0116	0,0159	0,074	0,0109	0,0399
	100	0,079	0,0109	0,0140	0,086	0,0125	0,0353
0.01	10	0,014	0,0090	0,0074	0,013	0,0079	0,0291
	20	0,022	0,0095	0,0081	0,022	0,0095	0,0403
	30	0,03	0,0105	0,0083	0,027	0,0089	0,0426
	40	0,037	0,0112	0,0080	0,034	0,0097	0,0567
	50	0,044	0,0119	0,0088	0,038	0,0093	0,0509
	60	0,049	0,0118	0,0112	0,044	0,0099	0,0585
	70	0,056	0,0126	0,0126	0,049	0,0101	0,0595
	80	0,064	0,0137	0,0148	0,053	0,0100	0,0591
	90	0,068	0,0134	0,0117	0,059	0,0106	0,0652
	100	0,072	0,0132	0,0115	0,065	0,0112	0,0637
	10	0,012	0,0085	0,0050	0,012	0,0085	0,0347
	20	0,02	0,0099	0,0074	0,018	0,0083	0,0298

0.015	30	0,026	0,0102	0,0082	0,023	0,0083	0,0395
	40	0,035	0,0125	0,0124	0,03	0,0097	0,0383
	50	0,039	0,0119	0,0165	0,034	0,0095	0,0288
	60	0,047	0,0135	0,0150	0,04	0,0103	0,0354
	70	0,053	0,0141	0,0167	0,046	0,0112	0,0361
	80	0,056	0,0135	0,0179	0,049	0,0108	0,0372
	90	0,062	0,0141	0,0202	0,052	0,0106	0,0431
	100	0,067	0,0144	0,0215	0,059	0,0117	0,0375
0.02	10	0,012	0,0098	0,0075	0,011	0,0085	0,0262
	20	0,019	0,0105	0,0094	0,017	0,0087	0,0303
	30	0,026	0,0118	0,0125	0,022	0,0089	0,0311
	40	0,031	0,0118	0,0148	0,026	0,0088	0,0299
	50	0,039	0,0138	0,0165	0,031	0,0094	0,0356
	60	0,043	0,0135	0,0164	0,036	0,0101	0,0343
	70	0,048	0,0138	0,0173	0,039	0,0098	0,0356
	80	0,054	0,0146	0,0198	0,044	0,0105	0,0347
	90	0,059	0,0150	0,0222	0,048	0,0107	0,0358
	100	0,065	0,0159	0,0246	0,053	0,0114	0,0353
0.025	10	0,011	0,0095	0,0070	0,01	0,0081	0,0271
	20	0,018	0,0107	0,0100	0,017	0,0098	0,0239
	30	0,024	0,0115	0,0120	0,02	0,0085	0,0320
	40	0,03	0,0125	0,0146	0,026	0,0099	0,0276
	50	0,035	0,0129	0,0157	0,03	0,0100	0,0292
	60	0,04	0,0134	0,0187	0,033	0,0097	0,0308
	70	0,047	0,0149	0,0242	0,037	0,0101	0,0270
	80	0,052	0,0154	0,0224	0,041	0,0104	0,0317
	90	0,057	0,0159	0,0239	0,046	0,0112	0,0299
	100	0,06	0,0156	0,0241	0,05	0,0116	0,0285

Annexe IV : Programme MATLAB pour la détermination de la longueur d'une courbe de remous de type H_3

```
clear all
g=9.81;b=0.309;Q=variable ;
x0=0;
h=0.0000001;
y=variable ;
Y=y;yf=0.variable ;
X=x0;x=x0;
function s=ssf(x,y)
g=9.81;b=0.309;Q=variable ;
s=-(((n^2*Q^2)/((b*y)^2*((b*y)/(b+2*y))^(4/3)))/(1-(Q^2*b)/(g*(b*y)^3)))));
while y<yf
k1=ssf(x,y);
k2=ssf(x+h/2,y+h/2*k1);
k3=ssf(x+h/2,y+h/2*k2);
k4=ssf(x+h,y+h*k1);
y=y+h/6*(k1+2*k2+2*k3+k4);
x=x+h;
X=[X x];
Y=[Y y];
end
figure(1)
plot(X,Y)
s=0;
for i=1:length(Y)
s=s+Y(i)*h;
end
s
```