



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued
Faculté Technologie et génie civil
Département d'hydraulique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER EN HYDRAULIQUE

**Option: Conception et Diagnostic des systèmes d'AEP et
d'assainissement**

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

▲ **Devant le jury composé de :**

- * OUAKOUAK ABDELKADER **Président**
- * KHATER IBTISAM **Examineur**
- * RIGUET FERHAT **Encadreur**
- * CHELBI ABDERRAHMANE **Co- Encadreur**

Présenté par :

- ~ DEBBAR SAAD
- ~ GUIA SLIMANE
- ~ DEBBAR ABDELKERIM

Promotion : Juin 2022

Dédicaces

Je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont

Soutenu de près et de loin

A ma famille
mes proches, A tous mes Amis

REMERCIEMENT

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

*En premier lieu nous tenons à remercier monsieur **RIGUET Ferhat** mon notre encadreur pour l'intérêt qu'elle a porté à notre recherche et de l'enrichir par leurs propositions.*

Nos vifs remerciements vont également au membre du jury monsieur d'avoir accepté de présider le jury.

Et monsieur en acceptant d'examiner notre travail

RESUME

Notre travail concerne à la Contribution à l'étude de l'effet de la marche positive sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée notre travail se subdivise en deux parties essentielles, la première concernant une étude bibliographique et la seconde traite une expérimentation de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée.

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

ABSTRACT

Our work concerns the experimental study of the second relative height of the hydraulic jump in a rectangular channel of composite section, our work is subdivided into two essential parts, the first concerning a bibliographic study and the second deals with an experimentation of some characteristics of the hydraulic jump evolving in a rectangular channel of composed section.

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

الملخص

يتضمن عملنا هذا المساهمة في دراسة تأثير العتبة الايجابية علي خصائص القفزة الهيدروليكية في القناة المستطيلة ذات القسم المركب. و ينقسم عملنا إلي قسمين أساسيين الأول يتعلق بالدراسة النظرية و الثاني الدراسة التجريبية لبعض الخصائص للقفزة المائية المتواجدة داخل القناة المستطيلة ذات القسم المركب

الكلمات المفتاحية : القفزة الهيدروليكية - قناة مستطيلة من قسم مركب - تدفق قوي و مفاجئ

SOMMAIRE

Dédicaces	
REMERCIEMENT	
RESUME	
SOMMAIRE	
LISTE DE FIGURE	
INTRODUCTION GENERALE	1

Première Partie: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I: Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

1-1- Introduction :	5
1-2- Ressaut hydraulique classique :	6
1-2-1- Forme du ressaut classique :	6
1-2-2- Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :	7
1-2-3- Longueurs caractéristiques du ressaut :	9
1-2-3-1- longueur du rouleau :	9
1-2-3-2- Longueur du ressaut :	10
1-2-4- Rendement du ressaut :	10
1-3- Conclusion :	13

Chapitre II: Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal rectangulaire

2-1-Introduction :	15
2-2- Ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince :	16
2-2-1- Approche de forster et skrinde :	16
2-3 Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive :	17
2-3-1 Approche de Debabeche et al (2008) :	17
2-3-2 Position du problème :	17
2-3-3 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :	18
2-3-4 HAUTEUR RELATIVE DE LA MARCHE EN FONCTION DU NOMBRE DE FROUDE	19
2-3-5 Position relative de la marche positive :	21

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

3-1 Introduction :	23
3-2 Etude de KHATTAOUI et ACHOUR (2012) :	23
3-2-1 Rapport des hauteurs conjuguées :	23
3-3 Rendement du ressaut :	26
3-4 Approche de Riguet et al (2020) :	27
3-4-1 Rapport des hauteurs conjuguées :	27
3-4-2 Longueurs caractéristiques du ressaut :	28
3-4-2-1 Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1	28
3-4-2-2 Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau :	29
3.4.3 Rendement du ressaut hydraulique	30
3.5 Conclusion	30

Chapitre IV: Description du modelé

4-1- Introduction :	33
4-2- Description du canal :	33
4-3- Le seuil à paroi mince :	37
4-4- Les ouvertures:	38

Chapitre V: Etude expérimentale

5-1 Introduction	40
5-2 Description des essais :	40
5-3 Longueurs caractéristiques du ressaut :	41
5-3-1 Cas seuil mince.....	41
1-1-Variation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction de froude F_1	41
1-3-Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de froude F_1 :	42
1-4 -Comparaison entre L_j/h_1 pour les deux sections du canal.....	43
5-3-2 Cas contrôlé par marche positive.....	44
2-1-Variation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction de froude F_1	44
2-2- Comparaison entre L_r/h_1 pour les deux sections du canal.....	44
2-3-Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de froude F_1	45
2-4 Comparaison entre L_j/h_1 pour les deux sections du canal	46
5-4 Comparaison de l'étude :	46
5-4-1Longueur relative du bassin:.....	46

Conclusion :.....	47
5-6 Rendement du ressaut :	47
Conclusion :.....	49
CONCLUSION GENERALE.....	51
Annexé	54
REFERENCE ET BIBLIOGRAPHIE	61

LISTE DE FIGURE

Chapitre I : Ressaut hydraulique en canal rectangulaire

Figure 1.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). pré-ressaut, b) ressaut de transition, c) ressaut stable et d) ressaut agité.....	7
Figure 1.2 : Ressaut hydraulique classique.	7
Figure 1.3 : Aspect du ressaut classique. a) Rouleau développé. b) rouleau non développé.	9
Figure 1.4 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique En se référant au plan 0-0, la charge totale dans la section initiale du ressaut s'écrit :	11
Figure 1.5 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 . (-) Courbe tracée selon la relation (1.21). (---) Courbe tracée selon la relation (1.22).	12

Chapitre II : Ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal rectangulaire

Figure 2.1 : Ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince.....	16
Figure 2.2 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative X/h_2 du seuil (<i>Forster et Skinde, 1950</i>).	16
Figure 2.3 : Schéma du ressaut hydraulique provoqué par marche positive : a) forcé de type A et b) contrôlé.....	18
Figure 2.4: Variation expérimentale de $(Y_A - 1)$ en fonction du nombre de Froude F_1 , pour le ressaut de type A. (o) points expérimentaux. (—) courbe selon l'équation (2.3).	19
Figure 2.6 : Variation de $(Y_A - 1)$ en fonction de la hauteur relative S_A de la marche positive. (o) points expérimentaux. (—) droite d'équation : $Y_A - 1 = 1.16S_A$	20
Figure 2.7 : Variation de $(S_A + F_1^{-0.4})$ en fonction de la position relative $\lambda r = Lr/h$ de la marche positive. (o) points expérimentaux. (—) courbe tracée selon la relation (2.6) (- - -) courbe tracée selon la relation (2.6)	21

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

Figure 3.1 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit	23
Figure 3.2 : Variation de Y , calculé par (3.4), en fonction de $F_1 : \beta = 1$	25
Figure 3.3 : Variation de Y en fonction de F_1 . (o) : équation (3.6), (+) : équation (3.4).	26
Figure 3.4 : Variation de ε en fonction de $F_1 \beta = 1$. Y est calculé par l'équation (3.3).	27
Figure 3.5 : Variation de η en fonction de F_1 . (0) : équation (3.2), (+) : équation (3.1)	27
Figure 3.6 : Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour les	

deux lits du canal composée. (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; (Δ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustements.....	28
Figure 3.7 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; (Δ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.	29
figure 3.8 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; (Δ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	29
Figure 3.9 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; (Δ) points de mesures expérimentales en lit mineur. ..	30

Chapitre IV : Description du model expérimentale

Figure 4.1 : Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composée	33
Figure 4.2 : Photographie du modele expérimentale du canal	34
Figure 4.3 : Pompe centrifuge axial	34
Figure 4.4 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit	35
Figure 4.5 : Section de contrôle	35
Figure 4.6 : Photographie de convergent.....	35
Figure 4.7 : Photographie d'une boîte en charge.....	36
Figure 4.8 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.....	36
Figure 4.9 : Photographie des seuils minces testés.....	37
Figure 4.9 : Photographie des marche positives.....	37
Figure 4.10 : La vanne.....	38
Figure 4.11 : Les ouvertures.....	38

Chapitre V : Etude expérimentale

Figure 5-1 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	41
Figure 5-2 : Variation de la longueur relative l_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	42
Figure 5-3 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1	43
Figure 5-4 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 expérimental en fonction de la relation global (L_j/h_1) pour les deux lits du canal	43
Figure 5-5 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	44
Figure 5-7 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude incident	

Deux nuages de points pour les deux lits du canal composé, tel que:.....	45
Figure 5-8 : Variation de la longueur relative du ressaut L_j/h_1 en fonction de la relation global (L_j/h_1) pour les deux lits du canal composé.....	46
Figure 5-9 : variation de la longueur relative L_j/h_1 , du ressaut en fonction du nombre de Froude F_r pour les deux configurations: seuil mince et marche positive.....	47
Figure 5-10 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique.....	48
Figure 5-11 : Variation du rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F , pour les deux configurations. (×) seuil mince, (+) marche positive.....	48

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le ressaut hydraulique est obtenu, suite à la transition de l'écoulement d'un régime torrentiel à un régime fluvial. Ce phénomène peut se produire dans un bassin de dissipation à l'aval d'un ouvrage hydraulique. C'est le moyen le moins onéreux et le plus pratique pour dissiper l'énergie emmagasinée dans cet ouvrage, afin d'éviter d'importantes modifications du lit de la rivière situé à l'aval. Ces dernières années, le ressaut hydraulique a fait l'objet de nombreuses recherches fondamentales et appliquées. Les recherches expérimentales ont d'abord confirmé que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale.

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

Le but de notre travail est l'étude de la Contribution à l'étude de l'effet de la marche positive sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée.

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

Ce travail est subdivisé en deux parties principales qui se résument comme suit:

- ***Première partie : étude bibliographique.***
- ***Deuxième partie : étude expérimentale. au sien de Laboratoire d'Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS) BISKRA***

Il est composé de cinq chapitres:

Chapitre I : Ressaut hydraulique classique en canal rectangulaire

Chapitre II: Ressaut hydraulique contrôle par seuil mince dans un canal rectangulaire

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

Chapitre IV : Description du model expérimental

Chapitre V : Etude expérimentale

Première Partie

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1- INTRODUCTION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

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

- ***Le premier chapitre*** a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire.
- ***Le deuxième chapitre*** traite le ressaut contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince dans un canal rectangulaire a été expérimentalement testé. Lorsque le seuil est placé à une distance X environ égale à la longueur L_r du ressaut.
- ***Le troisième chapitre*** traite le ressaut contrôlé par Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive
- ***Le dernier chapitre*** traite le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de Forme composée.

Chapitre I

*Ressaut hydraulique en canal
rectangulaire*

1-1- Introduction :

Le ressaut hydraulique est défini comme le passage de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial. Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur L_r appelée longueur du rouleau. Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible. C'est le profil de référence qui a servi de base à l'étude du phénomène tant du point de vue théorique qu'expérimental.

Les caractéristiques du ressaut sont essentiellement :

- les longueurs L_r^* et L_j^* qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut.
- les hauteurs initiale h_1 et finale h_2^* , appelées également hauteurs conjuguées.

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ses sections initiale et finale à la charge totale dans sa section initiale.

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un nombre de Froude F_1 étroitement lié au débit volume, à la hauteur initiale h_1 ainsi qu'à la forme géométrique du canal.

On s'accorde à dire que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation liant le rapport $Y^* = h_2^*/h_1$ des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 .

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

Dans ce chapitre nous examinerons le ressaut hydraulique classique, où nous citerons essentiellement les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

1-2- Ressaut hydraulique classique :

Les travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique sont nombreux et le présent chapitre se propose de passer en revue les principaux d'entre eux.

1-2-1- Forme du ressaut classique :

Selon la classification proposée par Bradley et Peterka (1957), le ressaut classique peut se présenter sous quatre formes distinctes. Cette classification se base essentiellement sur la valeur du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, en excluant les formes obtenues pour $F_1 < 1,7$.

Ces dernières sont décrites par plusieurs auteurs dont Anderson (1978) et ne répondent pas aux exigences d'un bassin de dissipation d'énergie ; les ressauts correspondants sont dits ondulés présentant tantôt une surface libre régulièrement perturbée et lisse ($1 < F_1 < 1,4$), tantôt une surface libre irrégulièrement ondulée ($1,4 < F_1 < 1,7$).

Selon la classification de Bradley et Peterka (1957) on distingue :

LE PRE-RESSAUT obtenu pour la gamme $1,7 < F_1 < 2,5$ figure (1.1).

La surface du ressaut est composée d'une série de petits rouleaux pour $F_1=1,7$; ces rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible.

Le ressaut de transition obtenu pour la gamme $2,5 < F_1 < 4,5$ figure (1.2). 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.

Le ressaut stable obtenu pour la gamme $4,5 < F_1 < 9$ figure (1.3). C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans les bassins de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

Le ressaut agité ou clapoteux obtenu pour $F_1 > 9$ figure (1.4). Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très élevée. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.

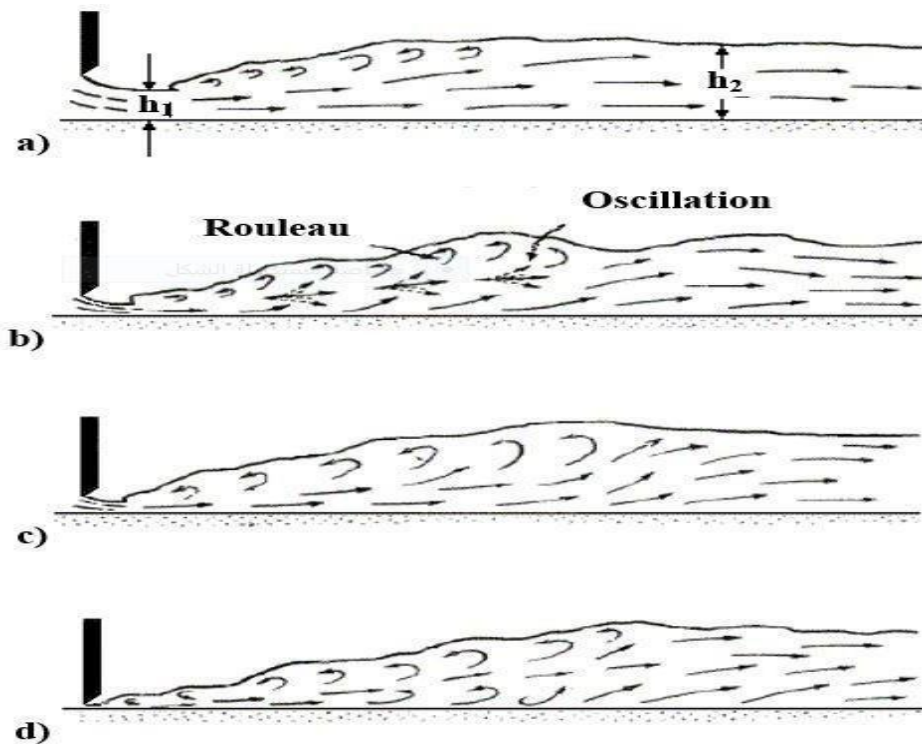


Figure 1.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). a) pré-ressaut, b) ressaut de transition, c) ressaut stable et d) ressaut agité.

1-2-2- Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :

La figure (1.2) montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiale et finale 1 et 2.

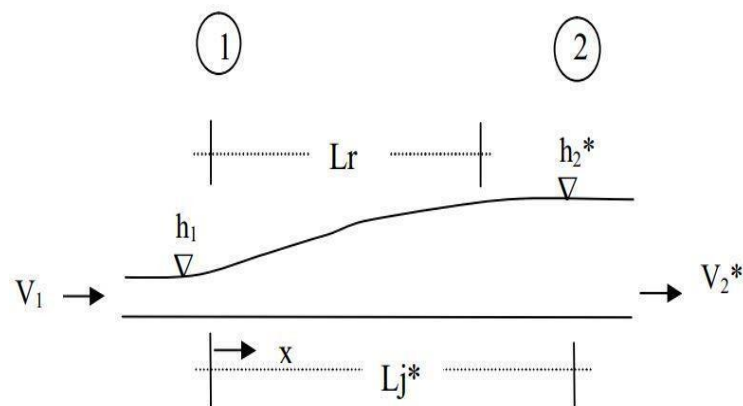


Figure 1.2 : Ressaut hydraulique classique.

L'écoulement à l'amont du ressaut (à l'origine) est caractérisé par une profondeur h_1 et une vitesse moyenne V_1 . L'équation de continuité permet d'écrire :

$$V_1 = Q/A_1 \quad (1.1)$$

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

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

b: est la largeur du canal rectangulaire.

Comme nous l'avons déjà dit le ressaut est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale ; c'est en fait la seconde loi de Newton qui est appliquée énonçant que la variation de la quantité de mouvement s'opérant entre les sections 1 et 2 est égale à la somme des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement. L'application de cette loi a nécessité quatre hypothèses simplificatrices :

1. La répartition des pressions dans la section finale et initiale est hydrostatique ;
2. La distribution des vitesses V est uniforme ;
3. La perte de charge par frottement est négligeable ;
4. La résistance de l'air est négligeable.

Sachant que $(\rho \cdot Q \cdot V)$ représente la quantité de mouvement, l'application de la loi de Newton mène à écrire :

$$\varpi \cdot b \cdot h^2 / 2 + \rho \cdot Q \cdot V = \varpi \cdot b \cdot h^{*2} / 2 + \rho \cdot Q \cdot V^* \quad (1.3)$$

où $\varpi = \rho \cdot g$, ρ est la masse volumique du liquide et g l'accélération de la pesanteur.

En tenant compte des relations (1.1) et (1.2) et sachant que le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut est tel que :

$$F_1^2 = Q^2 / (g \cdot b \cdot h^3) \quad (1.4)$$

La relation (1.3) conduit à écrire :

$$Y^* = h_2^* / h_1 = \frac{1}{2} [\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1] \quad (1.5)$$

La relation (1.5) est connue sous le nom d'équation de Bélanger et permet d'évaluer le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 . Hager et Sinniger (1985) proposent une relation approchée applicable pour les nombres de Froude $F_1 > 2$:

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

1-2-3- Longueurs caractéristiques du ressaut :

Le ressaut hydraulique est caractérisé par la longueur L_r^* de son rouleau ainsi que par la longueur L_j^* sur laquelle il s'étend. Ces caractéristiques n'ont pu être évaluées que par la voie de l'expérimentation.

1-2-3-1- longueur du rouleau :

En 1990 Hager et al (1990) définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et introduisant ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé. La figure (1.3) montre ces deux types de ressaut et les longueurs L_r qui leur correspondent.

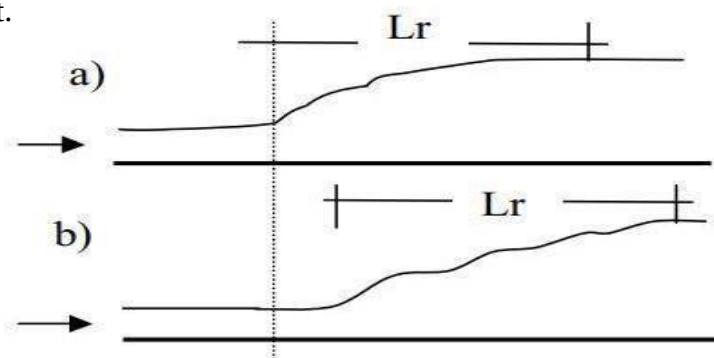


Figure 1.3 : Aspect du ressaut classique. a) Rouleau développé. b) rouleau non développé.

Le rouleau non développé est caractérisé par une longueur plus courte que celle du rouleau développé et sa surface à l'aval se présente sous l'aspect de vagues. Au fond de la masse liquide en mouvement, on peut distinguer une zone de rouleau dite de séparation formant un tourbillon de fond. En raison de la présence de cette zone, le jet entrant dans la section initiale du ressaut est dévié vers la surface libre.

Le rouleau développé présente une surface relativement lisse et est caractérisé par une quasi- stabilité. Le jet entrant dans la section initiale du ressaut adhère sur une certaine distance au fond du canal puis diverge en s'orientant vers l'aval.

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

$$\lambda_r^* = -12 + 160 \operatorname{Tgh} (F_1/20) \text{ pour } w = h_1 / b < 0,1 \quad (1.7)$$

$$\lambda_r^* = -12 + 100 \operatorname{Tgh} (F_1/12,5) \text{ pour } 0,1 < w < 0,7 \quad (1.8)$$

« Tgh » désigne la tangente hyperbolique.

Les auteurs notent que pour $F_1 < 8$, les relations (1.7) et (1.8) peuvent être remplacées par une droite de pente 8, d'équation :

$$\lambda_r^* = L_r^* / h_1 = 8.(F_1 - 1,5) \quad , 2,5 < F_1 < 8 \quad (1.9)$$

1-2-3-2- Longueur du ressaut :

La seconde caractéristique du ressaut est la longueur L_j^* sur laquelle il s'étend. Comme la longueur du rouleau, la longueur L_j^* n'a pas pu être quantifiée que par voie expérimentale et sa définition varie d'un auteur à un autre. En effet, on estime que la longueur L_j^* doit être mesurée toujours par la section à l'aval du ressaut où :

1. La surface libre est pratiquement horizontale
2. La surface de turbulence du rouleau est faible
3. Les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.
4. L'écoulement graduellement varié apparaît à l'extrémité aval du rouleau.

Toutes les définitions ont pour but d'indiquer la limite aval du ressaut au-delà de laquelle la protection du bassin amortisseur n'est pas nécessaire.

Les essais de Bradley et Peterka (1957) ont permis à Hager et al. (1990) de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur L_j^* du ressaut. Celle-ci, rapportée à la hauteur initiale h_1 du ressaut, peut s'écrire :

$$L_j^* / h_1 = 220.Tgh [(F_1-1)/22] \quad (1.10)$$

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

$$L_j^* / h_2^* = 6 \quad (1.11)$$

1-2-4- Rendement du ressaut :

La figure (1.4) montre la ligne de charge totale le long de la longueur L_j sur laquelle s'étend le ressaut classique.

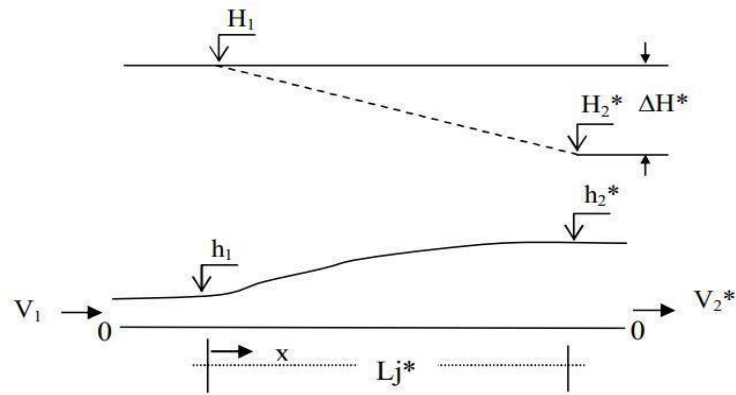


Figure 1.4 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique En se référant au plan 0-0, la charge totale dans la section initiale du ressaut s'écrit :

$$H_1 = h_1 + \alpha_1 \cdot V_1^2 / (2 \cdot g) \quad (1.12)$$

Tandis que la charge totale dans la section finale est :

$$H_2^* = h_2^* + \alpha_2 \cdot V_2^{*2} / (2 \cdot g) \quad (1.13)$$

α désigne le facteur de correction de l'énergie cinétique dont on admet que sa valeur est égale à l'unité.

La perte de charge ΔH^* due au ressaut est la différence des charges totales initiale et finale :

$$\Delta H^* = H_1 - H_2^* \quad (1.14)$$

En raison du caractère permanent de l'écoulement, l'équation de continuité reste en vigueur et l'on peut écrire :

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2^* \cdot A_2^* \quad (1.15)$$

Où $A_1 = b \cdot h_1$ et $A_2^* = b \cdot h_2^*$. En tenant compte des relations (1.12), (1.13) et (1.14), (1.15) s'écrit :

$$\Delta H^* = (h_1 - h_2^*) + (h_1^{-2} - h_2^{*-2}) \cdot (q^2 / (2 \cdot g)) \quad (1.16)$$

$q = Q/b$ est le débit unitaire dont l'expression peut être déduite de l'équation de la quantité de mouvement définie par (1.3) :

$$q^2 / (2 \cdot g) = (h_1 \cdot h_2^{*2} + h_1^2 \cdot h_2^*) / 4 \quad (1.17) \quad \text{Ainsi,}$$

l'équation (1.16) s'écrit sous sa forme définitive :

$$\Delta H^* = (h_2^* - h_1)^3 / (4 \cdot h_2^* \cdot h_1) \quad (1.18)$$

La relation (1.18) exprime la perte de charge due au ressaut classique en fonction des hauteurs conjuguées de celui-ci.

On exprime souvent la capacité de dissipation du ressaut par le rapport $\eta^* = \Delta H^* / H_1$, qui

représente en fait son rendement. En tenant compte de la relation (1.4), les charges totales initiale et finale du ressaut peuvent s'écrire respectivement :

$$H_1 = h_1[1+F_1^2/2] \quad (1.19)$$

$$H_2^* = h_1[Y^*+F_1^2/(2Y^{*2})] \quad (1.20)$$

Où Y^* est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par l'équation (1.5) de Bélanger. Ainsi, le rendement η^* s'écrit :

$$\eta^* = \Delta H^* / H_1 = (H_1 - H_2^*) / H_1$$

$$\eta^* = 1 - [Y^* + F_1^2/(2.Y^{*2})]/(1+F_1^2/2) \quad (1.21)$$

Bien que la relation (1.21) permette le calcul explicite du rendement η^* , Hager et Sinniger (1986) proposent une expression approchée, applicable pour $F_1 > 2$:

$$\eta^* = [1 - \sqrt{2} / F_1]^2 \quad (1.22)$$

Les relations (1.21) et (1.22) sont représentées graphiquement dans le système d'axes de coordonnées cartésiennes de la figure (1.5).

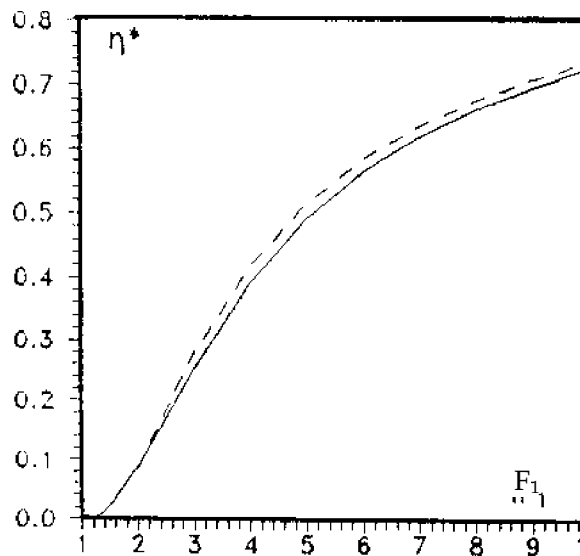


Figure 1.5 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 . (-) Courbe tracée selon la relation (1.21). (---) Courbe tracée selon la relation (1.22).

La figure (1.5) montre d'une part que le rendement η^* du ressaut classique est supérieur à 50% pour $F_1 \geq 5,1$ et que les rendements calculés en application de la relation approchée (1.21) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.22) d'autre part ; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

1-3- Conclusion :

Ce chapitre a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire. Nous avons examiné les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.

Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport Y^* des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut.

Chapitre II

*Ressaut hydraulique contrôle par seuil
mince dans un canal rectangulaire*

2-1- Introduction :

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

- Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident
- La hauteur géométrique s du seuil
- La hauteur initiale h_1 du ressaut
- La hauteur h_2 à l'amont immédiat du seuil
- La position X du seuil comptée à partir du pied du ressaut
- La profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval du seuil

Peut s'écrire sous la forme $s / h_1 = f(F_1, X / h_2, h_3 / h_1)$. La position X du seuil ne peut-être analytiquement déterminée et la fonction f doit être définie par la voie expérimentale.

Pour le cas d'un seuil continu à paroi mince de hauteur géométrique s supérieure à la hauteur minimale d'apparition du ressaut, *Forster et Skrinde* (1950) ont établi des courbes expérimentales montrant la variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 . Le seuil testé est dénoyé et la profondeur h_3 n'a aucune influence sur l'écoulement amont. La relation fonctionnelle ci-dessus indiquée se réduit alors à $s / h_1 = f(F_1, X / h_2)$.

Le ressaut est tel que son rouleau de surface, de longueur L_r , coïncide avec la position X du seuil. Trois valeurs seulement de la position relative X/h_2 ont été considérées (3, 5 et 10).

Notre étude s'intéresse au ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal de section droite rectangulaire. Deux configurations du ressaut sont considérées. La première configuration répond aux conditions expérimentales de *Forster et Skrinde* (1950) ($X \approx L_r$). Nos essais ont eu pour but de définir la fonction f pour un grand nombre de valeurs de X/h_2 et ont permis ainsi d'aboutir à des résultats significatifs.

La deuxième configuration correspond à un ressaut contrôlé dont la longueur L_j coïncide avec la position X du seuil. L'analyse des mesures expérimentales a également permis de corréler les divers paramètres intervenant au phénomène. Une approche théorique est enfin proposée à l'étude du ressaut contrôlé dont l'écoulement incident est généré par la mise en place d'un déversoir.

2-2- Ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince :

2-2-1- Approche de forster et skrinde :

La figure (2.1) montre un ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince dans un canal rectangulaire. Le seuil de hauteur s est dénoyé et fonctionne alors comme un déversoir. La profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval du seuil n'a aucune influence sur le comportement du ressaut et répond à

l'inégalité :

$$h_3 < h_2 - 3s \quad (2.1)$$

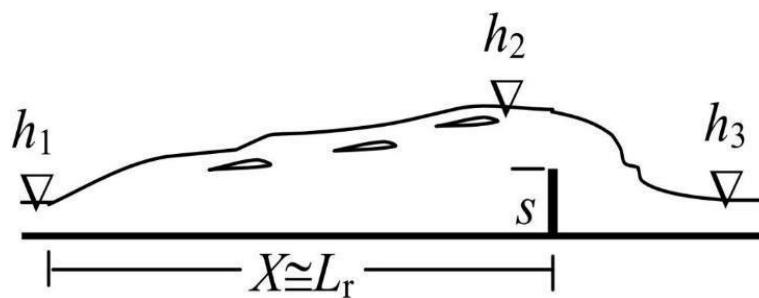


Figure 2.1 : Ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince

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

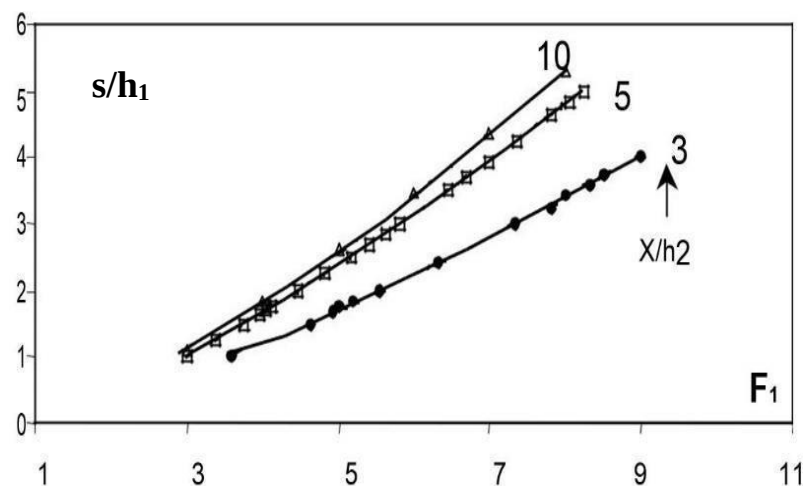


Figure 2.2 : Variation expérimentale de la hauteur relative s/h_1 du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident pour quelques valeurs de la position relative X/h_2 du seuil (Forster et Skinde, 1950).

La figure (2.2) montre que tout point du diagramme est représenté par la paire de coordonnées $(F_1, s/h_1)$. Lorsque les valeurs de ces coordonnées sont définies, le diagramme permet de déterminer le paramètre X indiquant l'emplacement du seuil. Si le point défini par $(F_1, s/h_1)$ se situe :

- Entre deux courbes du diagramme, la valeur de la position relative X/h_2 doit être déterminée par interpolation.
- Au-dessus de l'une des courbes du diagramme, le seuil de hauteur s est trop haut et le ressaut peut se déplacer vers l'amont sous l'influence du seuil.
- Au-dessous de l'une des courbes du diagramme, le seuil est trop bas et le ressaut peut se déplacer vers l'aval en laissant place à un écoulement torrentiel sur le radier du bassin amortisseur.

Ainsi, le diagramme représenté sur la figure (2.2) est à la base du dimensionnement du bassin amortisseur à ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince. La méthode est cependant graphique, nécessitant en règle générale des interpolations, et seules trois courbes sont proposées.

Nos essais, que nous exposerons dans ce qui suit, ont eu pour principal objectif de compléter les résultats de *Forster* et *Skrinde* (1950) et de définir de manière explicite la relation:

$$(F_1, S, X/h_2) = 0 \quad (2.2)$$

2-3 Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive :

2-3-1 Approche de Debabeche et al (2008) :

La présente publication se propose d'analyser expérimentalement, les caractéristiques du ressaut hydraulique forcé par marche positive, évoluant dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° . L'objectif principal de cette étude est de trouver les relations fonctionnelles, exprimées en termes adimensionnels, liant ces caractéristiques.

2-3-2 Position du problème :

Les caractéristiques principales étudiées dans un ressaut hydraulique provoqué par marche positive sont : le débit volume Q , la profondeur initiale h_1 , la profondeur finale h_2 , la hauteur s de la marche, la longueur L_r du rouleau, la position L_s de la marche. Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le nombre de Froude de l'écoulement

Les caractéristiques principales étudiées dans un ressaut hydraulique provoqué par marche positive sont : le débit volume Q , la profondeur initiale h_1 , la profondeur finale h_2 , la hauteur s de la marche, la longueur L_r du rouleau, la position L_s de la marche. Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le nombre de Froude de l'écoulement

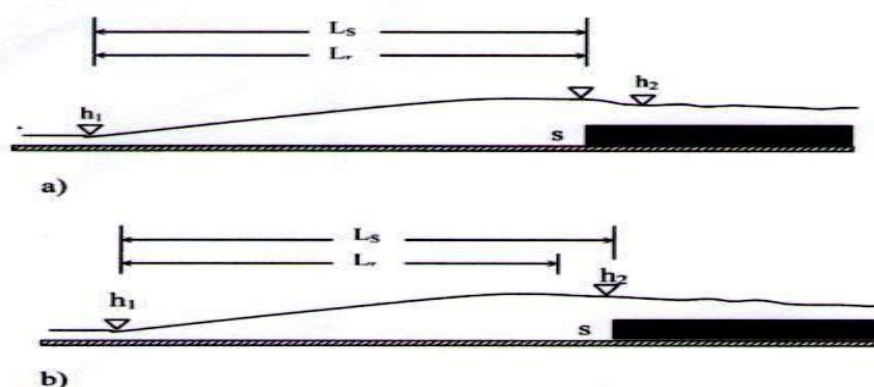


Figure 2.3 : Schéma du ressaut hydraulique provoqué par marche positive : a) forcé de type A et b) contrôlé

Les mesures expérimentales du ressaut hydraulique forcé par marche positive ont été effectuées, dans un canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° , de 3m de longueur. L'expérimentation a été menée sous sept hauteurs initiales : h_1 (mm) = 18, 25, 30, 34, 40, 44 et

51. Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue : $2 < F_1 < 20$. La formation du ressaut est conditionnée par la mise en place d'une marche positive en travers de l'écoulement ; pour cela 12 marches ont été confectionnées et testées, de hauteur géométrique allant de 38 à 140 mm et d'une longueur $L_0 = 1$ m.

2-3-3 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :

La figure (2.4) représente la variation de $(Y_A - 1)$ en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, tel que $Y_A = (h_2 + s)/h_1$ est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut de type A. la courbe en trait contenu représente la relation $Y_A - 1 = f(F_1)$, qui est exprimée par la relation.

La représentation graphique des points expérimentaux des rapports Y_A en fonction du nombre de Froude F_1 a abouti à une courbe unique :

$$Y_A - 1 = 3,41 \ln \left(\frac{F_1 + 4}{5} \right) \quad (2.3)$$

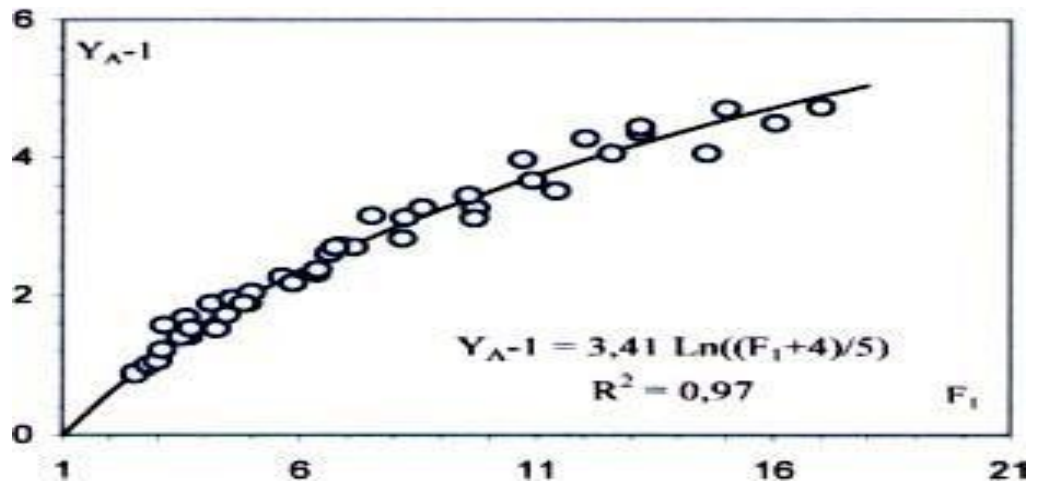


Figure 2.4: Variation expérimentale de $(Y_A - 1)$ en fonction du nombre de Froude F_1 , pour le ressaut de type A. (o) points expérimentaux. (—) courbe selon l'équation (2.3).

2-3-4 HAUTEUR RELATIVE DE LA MARCHE EN FONCTION DU NOMBRE DE FROUDE

L'analyse des mesures expérimentales a également montré, que la fonction $s/h_1 = f(F_1)$ est de type logarithmique :

$$S_A = s / h_1 = 2,94 \ln \left(\frac{F_1 + 4}{5} \right) \quad (2.4)$$

« Ln » désigne le logarithme népérien et la fonction a été ajustée de telle sorte que : $F_1 = 1$ donne $S_A = 0$.

Sur la figure (2.5) sont représentées à la fois les mesures expérimentales de la hauteur relative S_A de la marche positive en fonction de F_1 et la courbe expérimentale en trait continu traduisant la hauteur relative S_A de la marche positive du ressaut

nécessaire pour avoir un ressaut de type A

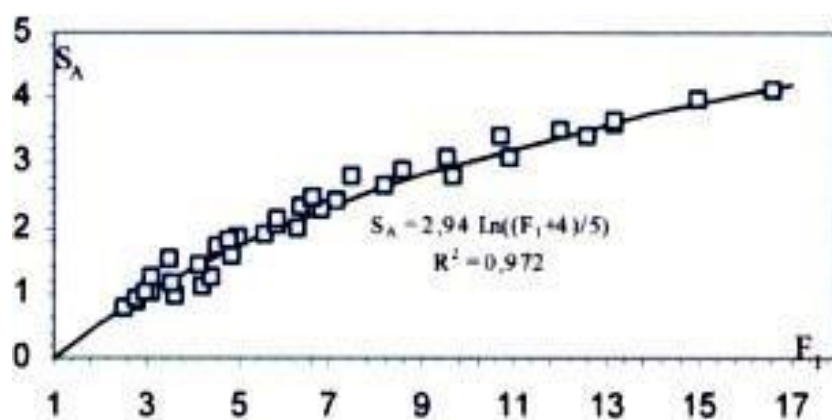


Figure 2.5 : Variation de hauteur relative S_A de la marche en fonction du nombre de Froude F_1 . (o) points expérimentaux. (—) courbe tracée selon l'équation (2.4)

L'auteur a établi une autre relation unique reliant la hauteur relative S_A de la marche positive et le rapport des hauteurs conjuguées Y_A du ressaut de type A.

La représentation graphique de la relation $Y_A - 1 = f(S_A)$ a abouti à une courbe unique, comme l'indique la figure (2.6), un ajustement linéaire a permis d'écrire que :

$$Y_A = 1 + 1,16 S_A \quad (2.5)$$

Pour l'ajustement de cette droite l'auteur a pris en considération la condition : $S_A = 0 \Rightarrow Y_A = 1$.

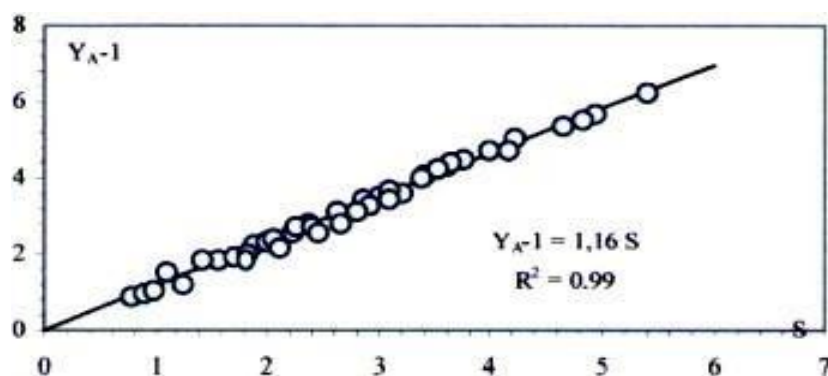


Figure 2.6 : Variation de $(Y_A - 1)$ en fonction de la hauteur relative S_A de la marche positive. (o) points expérimentaux. (—) droite d'équation : $Y_A - 1 = 1.16 S_A$

2-3-5 Position relative de la marche positive :

D'autres relations font l'objet de cette étude, l'auteur et à la bases des données expérimentales obtenues a montré que la meilleure représentation graphique adimensionnelle de la fonction $\Phi(S_A, F_1, \lambda_r) = 0$, tels que $S_A = s/h_1$ et $\lambda_r = L_r/h_1$, est celle indiquée par la figure (2.6). Les points expérimentaux se situent sur une droite d'équation : $S_A + F_1^{0.4} = c \cdot \lambda_r + d$. Les valeurs des constantes $c - d$ ont été obtenues par un ajustement linéaire.

L'analyse des mesures expérimentales a montré que les trois variables adimensionnelles F_1 , S_A et λ_r intervenant au phénomène sont liées par la relation (2.6) :

$$S_A + F_1^{0.4} = 0,14 \lambda_r + 0,82 \quad (2.6)$$

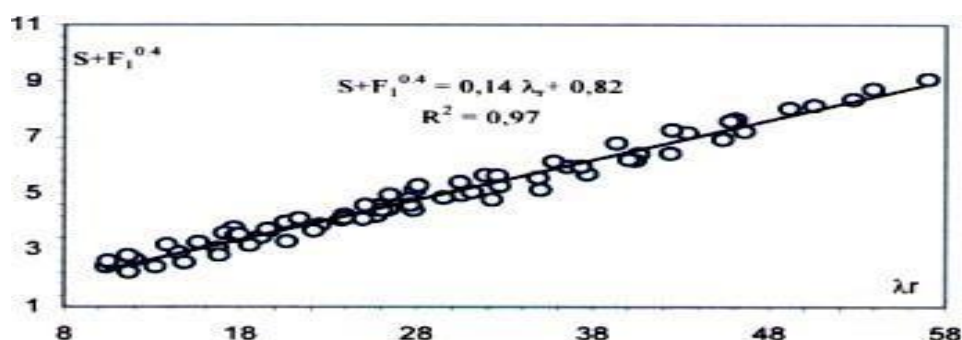


Figure 2.7 : Variation de $(S_A + F_1^{0.4})$ en fonction de la position relative, $\lambda_r = L_r/h$ de la marche positive. (o) points expérimentaux. (—) courbe tracée selon la relation (2.6)

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

2-4- Conclusion :

Le ressaut contrôlé par un seuil dénuyé à paroi mince dans un canal rectangulaire a été expérimentalement testé. Lorsque le seuil est placé à une distance X environ égale à la longueur L_r du ressaut, l'analyse des mesures expérimentales a montré que la hauteur relative S du seuil est telle que $S = C_0 \cdot (F_1 - 1)^{5/4}$. Le paramètre C_0 est linéairement dépendant de la position relative X/h_2 du seuil.

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

Chapitre III

*Ressaut hydraulique dans un canal
rectangulaire de forme composée*

3-1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu les travaux de *Khattaoui et Achour (2012)*. En s'inspirant du développement théorique mené par *Achour (2000)* sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, une approche théorique a été proposée par les auteurs pour déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en lit composé. Le rendement du ressaut est lui aussi quantifié.

En deuxième lieu nous examinerons en particulier les travaux de *Riguet et Al (2020)*, consacrée à l'étude expérimentale des relations expérimentales on été obtenue.

3-2 Etude de KHATTAOUI et ACHOUR (2012) :

3-2-1 Rapport des hauteurs conjuguées :

Sur la figure (III.1) est représentée les différentes caractéristiques géométriques et hydrauliques du ressaut hydraulique en lit composé droit.

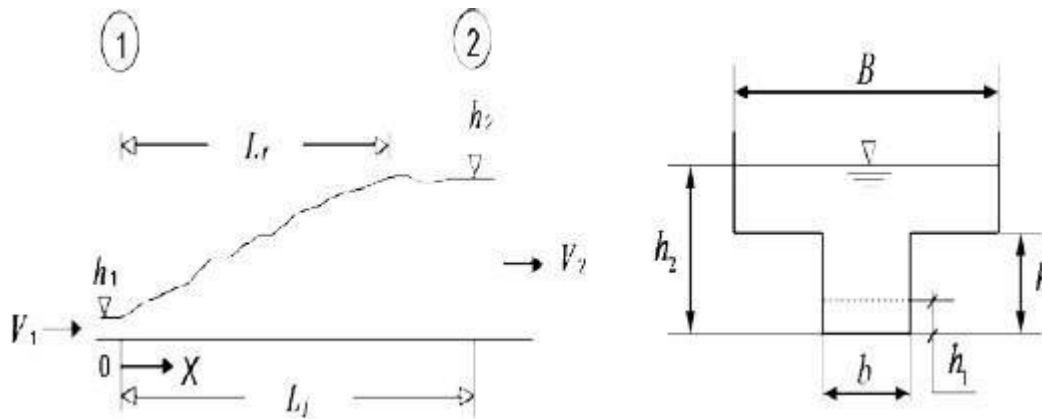


Figure 3.1 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit

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

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

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

En s'inspirant de l'article de *Achour (2000)*, par analogie à la relation de Borda-Carnot et au vu de la forme de la relation (3.1), *Khattaoui et Achour (2012)* ont conclu qu'il paraît admissible de rajouter une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement aurait comme expression:

$$f_x = -k \frac{\omega}{2} (h_2 - h_1)^2 h_1 (B - b)^2 \quad (3.2)$$

C'est une source de perte de charge liée nécessairement au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur.

Les exposants x , y et z sont liés par la relation: $x + y + z = 3$, le coefficient k est tel que

$$K = \varphi (L_j \text{ ou } L_r, h_2, h_1, h) \quad (3-3)$$

En tenant compte de f_x l'équation d'Euler devient :

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = f_1 - f_2 + f_x \quad (3-4)$$

Analysons l'équation pour la fonction $f_x = \frac{1}{2} \varpi (h_2 - h) h_1 (B - b)$: L'hypothèse d'une distribution uniforme pour les vitesses dans les sections transversales correspondant au pied et à la fin du ressaut implique que $\beta_1 = \beta_2 = 1$.

Les sections A_1 et A_2 sont données respectivement par : $A_1 = b h_1$ et $A_2 = B(h_2 - h) + b h$. Prenons comme hypothèse aussi que la distribution des pressions est hydrostatique dans les sections 1 et 2 du ressaut, ce qui donne les expressions des forces :

$$f_1 = \varpi (h_1/2) b h_1 \text{ et } f_2 = \varpi (h_2 - h/2) b h + \varpi [(h_2 - h)/2] B (h_2 - h) \quad (3-5)$$

En tenant compte de toutes ces hypothèses et informations ainsi que de l'équation de continuité, $V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q$, l'équation (3.5) s'écrit en définitive, après réarrangement, comme suit :

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

$$2F_1^2 \left(\frac{\beta}{Y - (1 - \beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} - \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (3.6)$$

$$\text{Où : } F_1 = Q / \sqrt{b^2 h_1^3 g} \quad (3.7)$$

Les relations (3.5) et (3.6) sont des équations fonctionnelles de forme $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$. Notons que les équations (3.6) et (3.7) peuvent s'écrire sous la forme $Y^3 + aY^2 + bY + C = 0$

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

La figure (3.2) illustre la variation de Y , calculé par l'équation 6, en fonction de F_1 . L'une des variables, β ou τ , est fixée, l'autre varie avec un pas de 0,2. Pour que le ressaut se produise effectivement dans le canal composé ($h_2 > h$), les valeurs de F_1 à considérer doivent

être strictement supérieur à la valeur minimale

$$Y^3 + aY^2 + bY + c = 0. \quad (3.8)$$

En faisant le changement de variable $Y = x - a/3$, l'équation de troisième degré se qui peut être facilement résolue à l'aide de la méthode trigonométrique

La figure (3.2) illustre la variation de Y , calculé par l'équation (3.6), en fonction de F_1 . L'une des variables, β ou τ , est fixée, l'autre varie avec un pas de 0,2. Pour que le ressaut se produise effectivement dans le canal composé ($h_2 > h$), les valeurs de F_1 à considérer doivent être strictement supérieures à la

valeur minimale $F_{1\min} = \left[1 / (2 \sqrt{2}) \right] \sqrt{(2/\tau + 1)^2 - 1}$ correspondant à ($h_2 = h$).

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

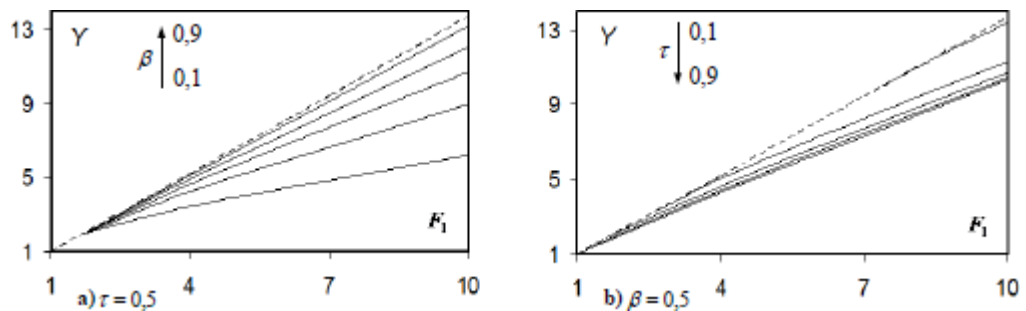


Figure 3.2 : Variation de Y , calculé par (3.4), en fonction de F_1 : $\beta = 1$.

Sur la figure (3.2) est représentée la variation de Y en fonction de F_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. Les valeurs de Y calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont inférieures à celles calculées en la négligeant. La différence est plus claire au fur et à mesure que le nombre de Froude F_1 augmente. La force f_x traduit les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

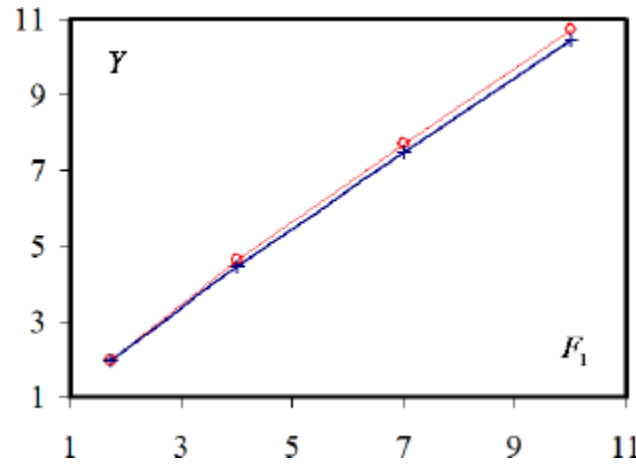


Figure 3.3 : Variation de Y en fonction de F₁. (o) : équation (3.6), (+) : équation (3.4).

3-3 Rendement du ressaut :

En tenant compte des mêmes hypothèses précédentes, le rendement, $\eta = \Delta H/H_1$, peut être exprimé par :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (3.9)$$

Le rendement du ressaut hydraulique en lit composé peut être calculé explicitement à partir de l'équation (III.7), connaissant le nombre de Froude F_1 , le rapport des hauteurs conjuguées Y ainsi que le rapport de l'élargissement β et le rapport des hauteurs τ . En considérant les valeurs de Y calculées avec la relation (III.6), la variation de η en fonction de F_1 est représentée sur la figure (III.4). Pour un τ et un β fixés, il est clairement illustré sur cette figure que le rendement η d'un ressaut hydraulique dans un lit composé, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de F_1 .

Pour un τ connu, et un F_1 fixé, η diminue avec l'augmentation de β . Pour un β et un F_1 fixés, le η augmente avec l'accroissement de τ .

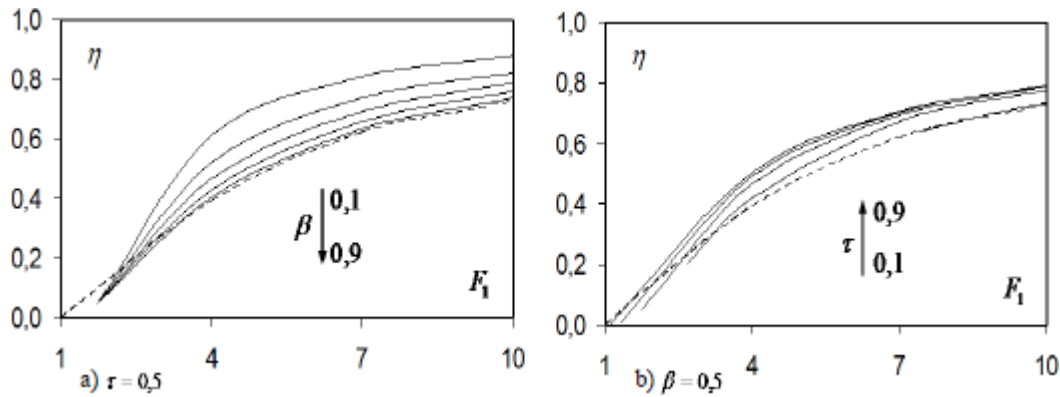


Figure 3.4 : Variation de ε en fonction de F_1 $\beta = 1$. γ est calculé par l'équation (3.3).

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

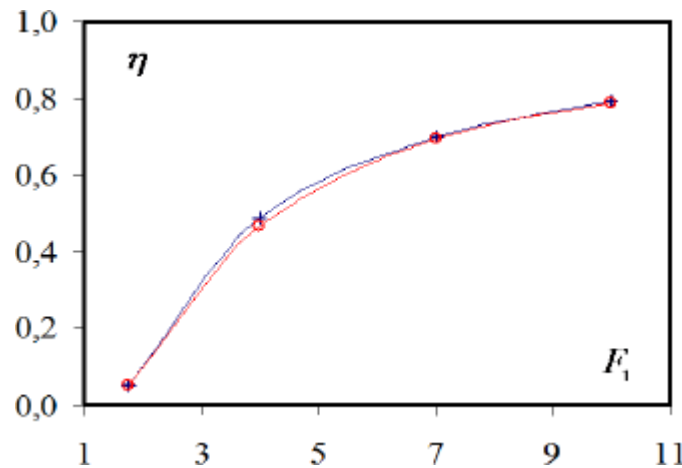


Figure 3.5 : Variation de η en fonction de F_1 . (0) : équation (3.2), (+) : équation (3.1)

3-4 Approche de Riguet et al (2020) :

3-4-1 Rapport des hauteurs conjuguées :

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

Les représentations graphiques des points expérimentaux ci-dessous illustrent clairement la variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les cinq ouvertures h_1 : 2 ; 2,5 ; 3 ; 3,5 et 4cm pour les deux lits du canal composée.

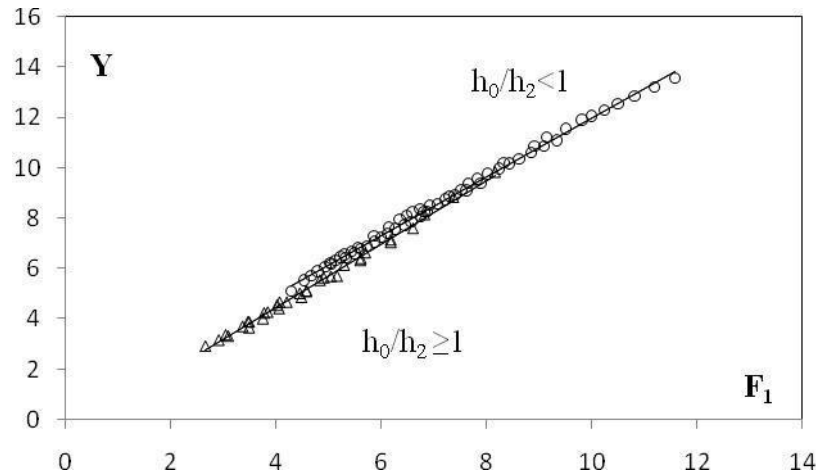


Figure 3.6 : Variation du rapport des hauteurs Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour les deux lits du canal composée. (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; (Δ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustements.

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

L'analyse des points de mesures expérimentales, montre clairement que pour chaque valeur de h_0/h_2 , un ajustement linéaire est possible, de la forme $Y = a F_1 + b$. L'équation liant le rapport des hauteurs conjuguées au nombre de Froude incident s'écrit alors :

$$\text{Pour } h_0/h_2 \geq 1 : 2,64 < F_1 < 8,14 \quad Y = 1,258 F_1 - 0,573$$

$$\text{Pour } h_0/h_2 < 1 : 4,27 < F_1 < 11,58 \quad Y = 1,165 F_1 + 0,328$$

3-4-2 Longueurs caractéristiques du ressaut :

3-4-2-1 Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

La longueur L_j a été considérée comme étant la distance séparant la section initiale du ressaut et la section finale (où s'effectue la mesure de h_2). L'objectif principal de cette partie de l'étude est de quantifier la longueur relative L_j/h_1 dans la gamme de valeurs testées.

La figure 4 montre la variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

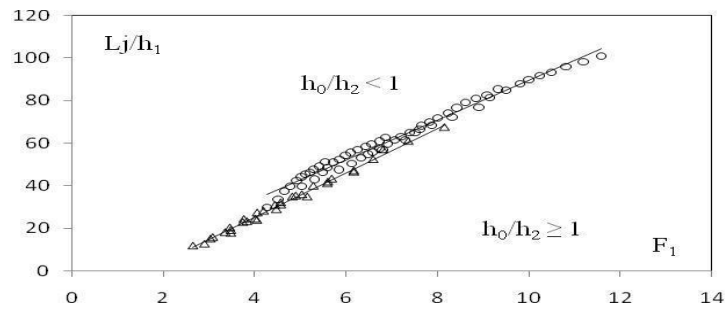


Figure 3.7 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 ,

(o) points de mesures expérimentales en lit majeur; (Δ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.

$$\text{Pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad L_j/h_1 = 10,41F_1 - 16,23, \quad R^2 = 0,993$$

$$\text{Pour } h_0/h_2 < 1 : \quad L_j/h_1 = 9,378F_1 - 4,211, \quad R^2 = 0,985$$

Cette figure montre que pour le même nombre de Froude la longueur relative L_j/h_1 du ressaut dans le lit majeur est plus grande que son homologue dans le lit mineur.

3-4-2-2 Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau :

De surface en fonction du nombre de Froude F_1 . La longueur L_r est considérée comme étant la distance séparant la section initiale et la section finale du rouleau de surface.

La figure 3.8 montre la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 d'écoulement incident.

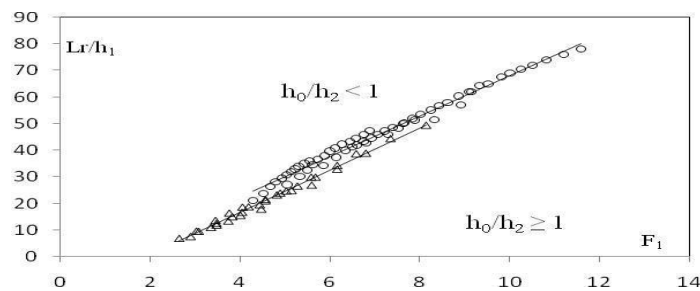


figure 3.8 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 ,

(o) points de mesures expérimentales en lit majeur; (Δ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.

$$\text{Pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad L_r/h_1 = 7,907 F_1 - 14,85 \quad R^2 = 0,991$$

$$\text{Pour } h_0/h_2 < 1 : \quad L_r/h_1 = 7,599 F_1 - 7,788 \quad R^2 = 0,987$$

Cette figure montre que le lit mineur présente une longueur du rouleau plus compacte.

3.4.3 Rendement du ressaut hydraulique

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

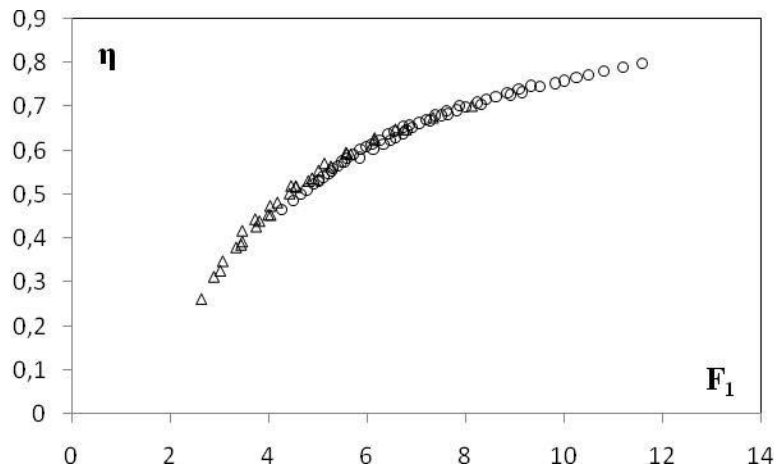


Figure 3.9 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 . (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; (Δ) points de mesures expérimentales en lit mineur.

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

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

3.5 Conclusion

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

$$\phi(F_{1,,,})=0$$

Une nouvelle approche a été proposée par Khattaoui et Achour (2012) en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est

inspirée du développement théorique mené par *Achour (2000)* sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans leurs développements, les valeurs de Y et η se sont révélées interdépendantes en augmentant ou en diminuant et se sont certainement rapprochées de la réalité.

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

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

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

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

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

Chapitre IV

Description du modèle

4-1- Introduction :

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

4-2- Description du canal :

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

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

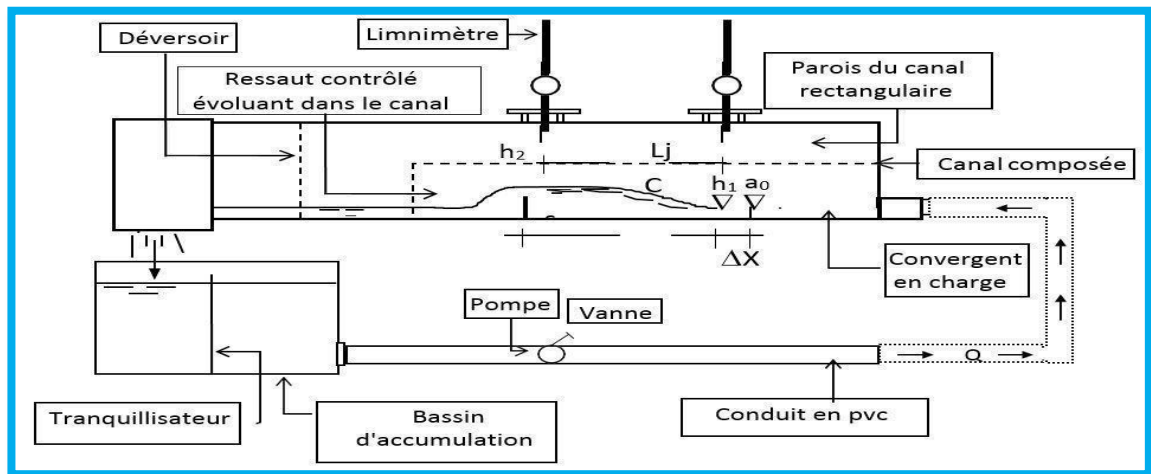


Figure 4.1 : Schéma simplifié du canal de mesure en forme rectangulaire composé



Figure 4.2 : Photographie du modele expérimentale du canal



Figure 4.3 : Pompe centrifuge axiale



Figure 4.4 : Photographie du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale ayant servi à la mesure du débit

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



Figure 4.5 : Section de contrôle



Figure 4.6 : Photographie de convergent



Figure 4.7 : Photographie d'une boîte en charge

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à l'ouverture due à la section de sortie du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été évaluées par un limnimétrie. L'instrument est formé d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnimétrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau figure (4.8).

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

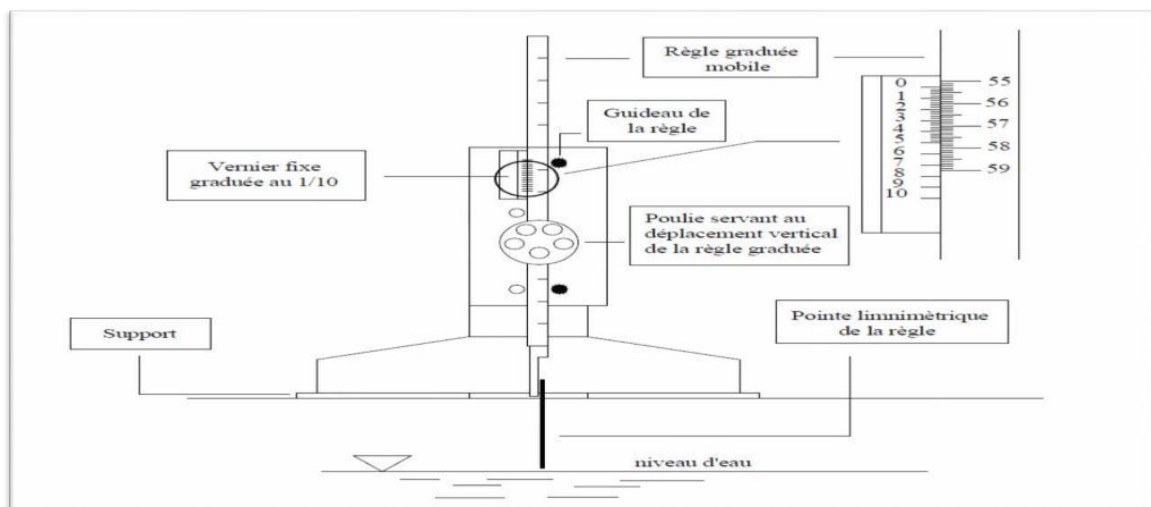


Figure 4.8 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique

4-3- Le seuil à paroi mince :

Les seuils utilisés dans notre dispositif expérimental, sont façonnées en fer de forme rectangulaire.

Dans le but d'obtenir un nombre important de points de mesures, nous avons préparé 18 seuils minces de différentes hauteurs photo (4.9) :

s = 2 cm ; 3 cm ; 4 cm ; 5 cm ; 6 cm ; 7 cm ; 8 cm ; 9 cm ; 10 cm ; 11 cm ; 12 cm ; 13 cm ; 14 cm ; 15 cm ; 16 cm ; 17 cm ; 18 cm ; 19 cm ; 20 cm



Figure 4.9 : Photographie des seuils minces testés



Figure 4.9 : Photographie des marche positives



Figure 4.10 : La vanne

4-4- Les ouvertures:

Les ouvertures utilisées dans notre dispositif expérimental, sont façonnées de fer en forme rectangulaire.

L'objectif de l'utilisation des ouvertures est de contrôler le débit d'entrer nous avons préparé 05 ouvertures de différentes hauteurs photo (4.11) : $s = 2 \text{ cm}$; 2.5 cm ; 3 cm ; 3.5 cm ; 4 cm .



Figure 4.11 : Les ouvertures

Chapitre V

Etude expérimentale

5-1 Introduction

L'étude expérimentale s'est intéressée à la Contribution à l'étude de l'effet de la marche positive sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée.

Détermination expérimentale de quelques caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en lit composée

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

- le nombre de Froude F_1 ou le débit relatif Q^* ;
- le rapport $\lambda_r = I_r/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut.

5-2 Description des essais :

Un échantillon constitué de plusieurs de points de mesures expérimentales, pour chacun des paramètres intervenant au phénomène, a permis également pour ce type de ressaut, d'aboutir à des résultats significatifs. Ces paramètres sont : le débit Q , la hauteur initiale h_1 , la hauteur finale h_2 , la hauteur du seuil s . Ceux-ci permettent de composer les produits adimensionnels suivants : le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, le rapport $Y = h_2 / h_1$ du seuil

Le nombre de Froude F_1 est tel que :

$$F_r^2 = \frac{Q^2}{b^2 h_1^3 g} \quad (5-1)$$

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

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

$$Q = 0.3794 B \sqrt{2g} \beta (1 + 0.16496^{2.0716})^{3/2} h_q^{3/2} \quad (5-2)$$

Avec :

Q : le débit en (m^3/s).

$\beta = b / B$: Rapport de l'élargissement le lit majeur (m).

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

$r = h_1 / h$: Rapport des hauteurs.

h_q : La hauteur de la lame déversant en (m).

3. Calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par application de la relation.

5-3 Longueurs caractéristiques du ressaut :

5-3-1 Cas seuil mince

1-1-Variation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction de Froude F_r

La longueur L_r considérée comme la distance qui sépare la section initiale du rouleau et la section finale(ou se trouve h_2).le but essentielle de cette partie et de quantifier la longueur relative L_r/h_1 en fonction de F (nombre de fraude) de l'écoulements incident .

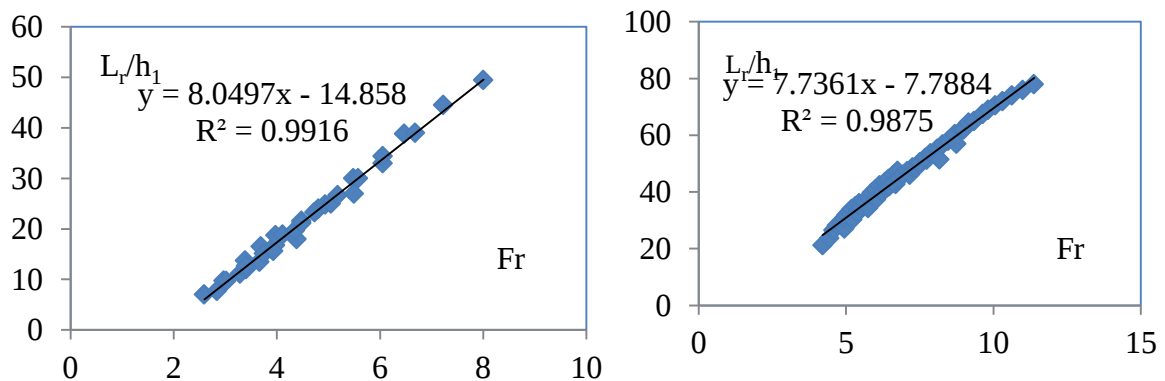


Figure 5-1 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

Deux nuages de points pour les deux lits du canal composé, tel que:

- Pour $h_0/h_2 > 1$ $L_j/h_1 = 8,049F_1 - 14,85$: $R^2 = 0,991$

- pour $h_0/h_2 < 1$ $L_j/h_1 = 7,736F_1 - 7,788$; $R^2 = 0,987$

1-2- Comparaison entre L_r/h_1 pour les deux sections du canal

La figure 5.2 montre la variation de la longueur relative L_j/h_1 du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

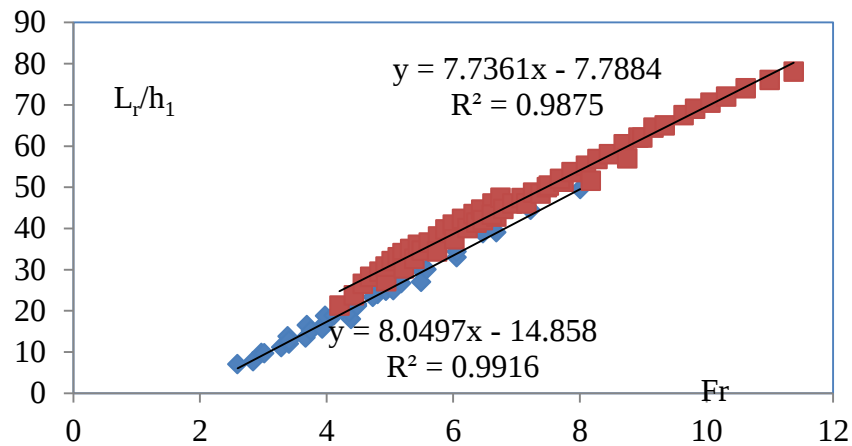


Figure 5-2 : Variation de la longueur relative l_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

Cette figure montre que pour le même nombre de Froude F_1 la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface dans le lit majeur est plus importante que son homologue dans le lit mineur. On déduit que la section composée a un effet positif au lit mineur que son homologue au lit majeur.

1-3-Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de froude F_1 :

La longueur L_j considérée la distance qui sépare la section initiale du ressaut et la section finale.

le but essentiel de cette partie est de quantifier la longueur relative L_j/h_1 en fonction de l'écoulements incident .

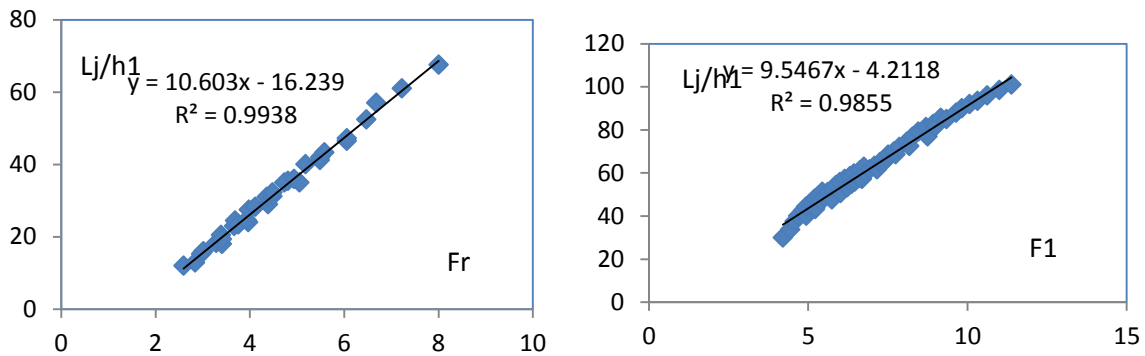


Figure 5-3 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

Deux nuages de points pour les deux lit du canal composé, tel que:

- Pour $h_0/h_2 > 1$ $L_j/h_1 = 10.60F_1 - 16.23$: $R^2 = 0,993$ le lit mineur
- pour $h_0/h_2 < 1$ $L_j/h_1 = 9.546F_1 - 4.211$; $R^2 = 0,985$ le lit majeur

1-4 -Comparaison entre L_j/h_1 pour les deux sections du canal

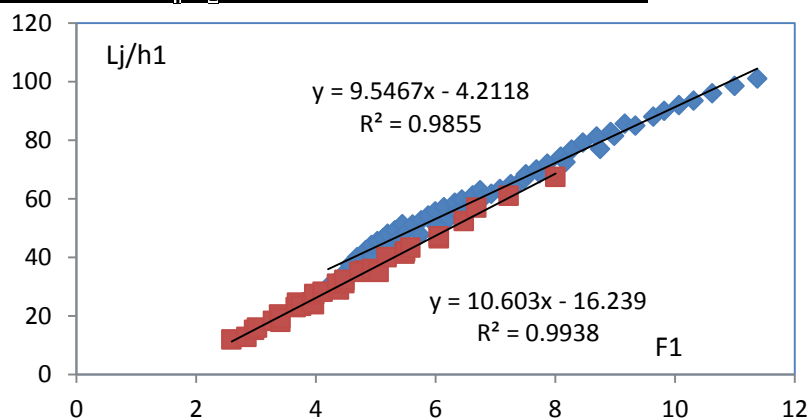


Figure 5-4 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 expérimental en fonction de la relation globale (L_j/h_1) pour les deux lits du canal

Cette figure montre que pour un même nombre de Froude fixé F_r , la longueur relative L_j/h_1 du ressaut dans le lit majeur est plus grand que son homologue dans le lit mineur.

on déduit que la section composée a un effet positif au lit mineur que son homologue au li majeur.

5-3-2 Cas contrôlé par marche positive

2-1-Variation de la longueur relative L_r/h_1 du ressaut en fonction de froude F_1

La longueur L_r considérée la distance qui sépare la section initiale du rouleau et la section finale.

le but essentiel de cette partie est de quantifier la longueur relative L_r/h_1 en fonction de Froude F_1 de l'écoulements incident.

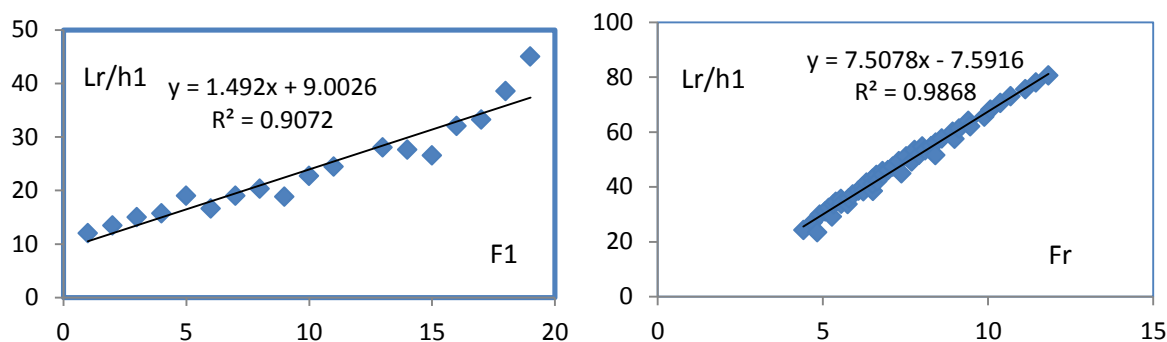


Figure 5-5 : Variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

Deux nuages de points pour les deux lits du canal composé, tel que:

- Pour $h_0/h_2 > 1$ $L_j/h_1 = 7.355F_1 - 12.59$: $R^2 = 0,984$
- pour $h_0/h_2 < 1$ $L_j/h_1 = 7.507F - 7.591$; $R^2 = 0,986$

2-2- Comparaison entre L_r/h_1 pour les deux sections du canal

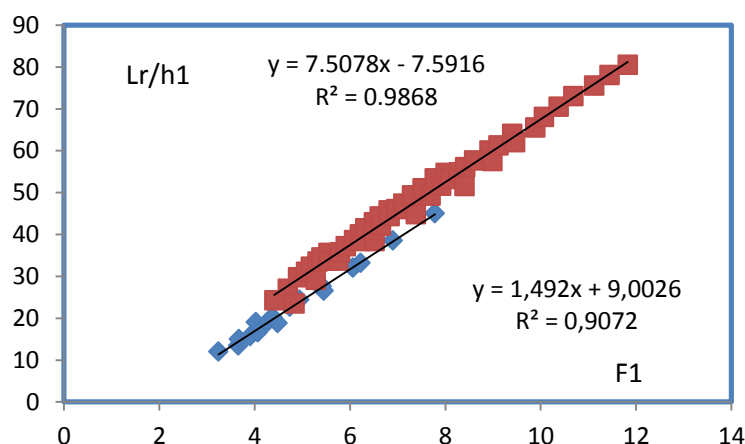


Figure 5-6 Variation de la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 expérimental en fonction de la relation global (L_r/h_1) pour les deux lits du canal composée

Cette figure montre que pour un même nombre de Froude fixé Fr , la longueur relative L_r/h_1 du ressaut est moindre pour le lit mineur que son homologue dans le lit majeur.

2-3-Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de froude Fr

La longueur L_j est considérée la distance qui sépare la section initiale du ressaut et la section finale. le but essentiel de cette partie est de quantifier la longueur relative L_j/h_1 en fonction de nombre Fr de l'écoulements incident .

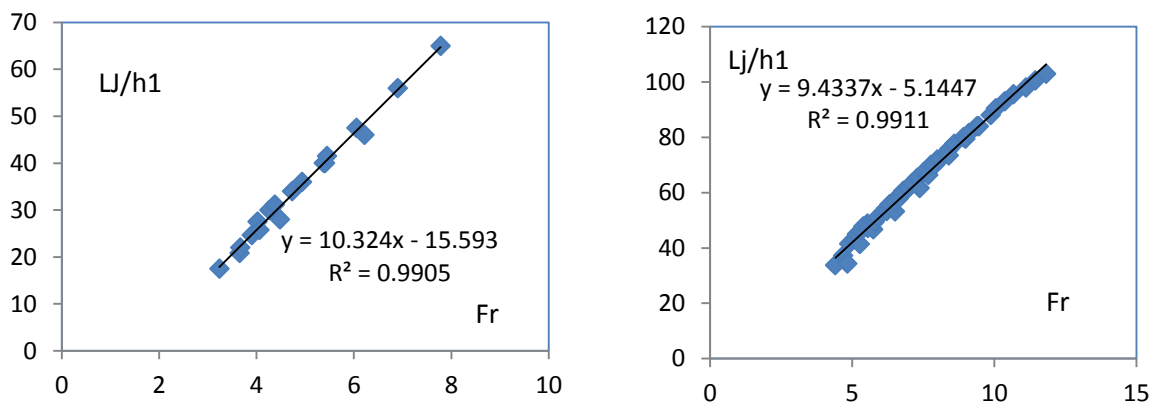


Figure 5-7 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude Fr incident Deux nuages de points pour les deux lits du canal composé, tel que:

- Pour $h_0/h_2 > 1$ $L_j/h_1 = 10.32Fr - 15.59$ $R^2 = 0,99$ le lit mineur
- pour $h_0/h_2 < 1$ $L_j/h_1 = 9.433Fr - 5.144$ $R^2 = 0,991$ le lit majeur

2-4 Comparaison entre L_j/h_1 pour les deux sections du canal

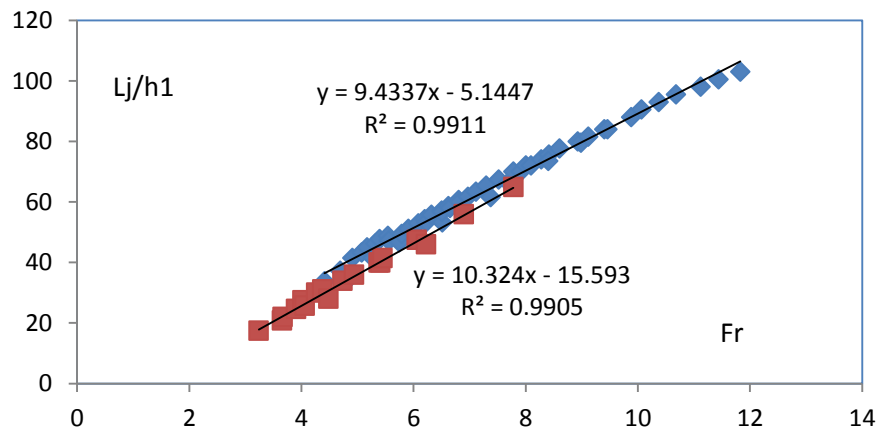


Figure 5-8 : Variation de la longueur relative du ressaut L_j/h_1 en fonction de la relation global (L_j/h_1) pour les deux lits du canal composé

Cette figure montre que pour un même nombre de Froude fixé Fr , la longueur relative L_j/h_1 du ressaut est plus élevée pour le lit majeur que son homologue dans le lit mineur

5-4 Comparaison de l'étude :

Cette partie de l'étude expérimentale, comporte une étude comparative entre les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince et par marche positive

5-4-1 Longueur relative du bassin:

Les figures ci dessous montrent la variation de la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 pour les deux configurations du ressaut dans les deux lits du canal composé

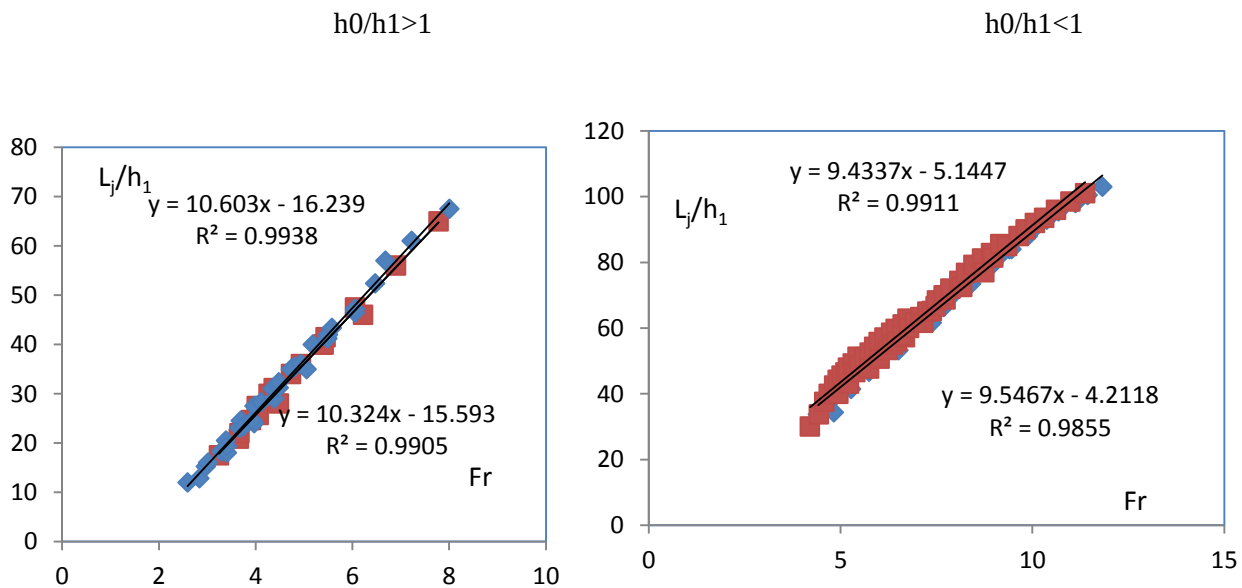


Figure 5-9 : variation de la longueur relative L_j/h_1 , du ressaut en fonction du nombre de Froude Fr pour les deux configurations: seuil mince et marche positive.

Conclusion :

Les figures ci dessus, ont montré avec les résultats obtenus que les points de mesure du ressaut contrôlé par marche positive sont légèrement inférieur, par rapport à leurs homologues contrôle par seuil mince. par conséquent les seuils de contrôle du ressaut n'ont pas un effet vis avis à la formation du ressaut

5-6 Rendement du ressaut :

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

$$\eta = \Delta h / h_1$$

$$\text{avec : } \Delta h = h_1 - h_2$$

$$\eta = \Delta h^* / h_1 = (h_2 - h_1^*) / h_1$$

la relation ci-dessous permette le calcul explicite du rendement η , Hager et Sinniger (1986) proposent une expression approchée, applicable pour $F_1 > 2$:

$$\eta = (1 - \sqrt{2/F_1})^2 \quad (5-3)$$

h_1 et h_2 désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut. Les représentations graphiques des points expérimentaux ci-dessous illustrent clairement la variation de rendement du ressaut η en fonction du nombre de Froude F .

La figure (5.11) montre la ligne de charge totale le long de la longueur L_j sur laquelle s'étend le ressaut classique.

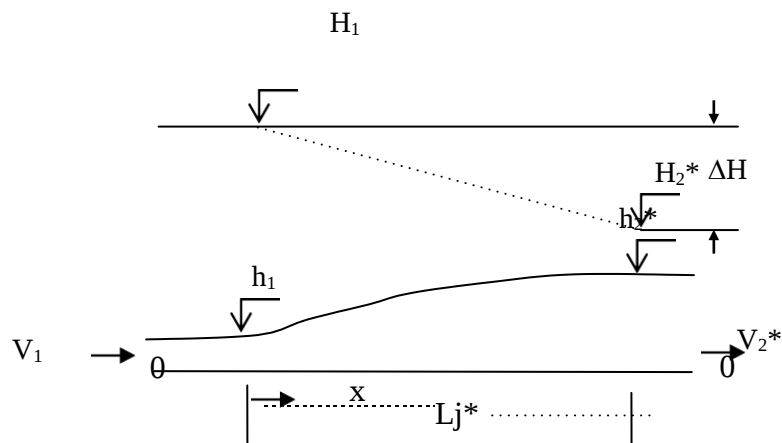


Figure 5-10 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

❖ Etude comparative :

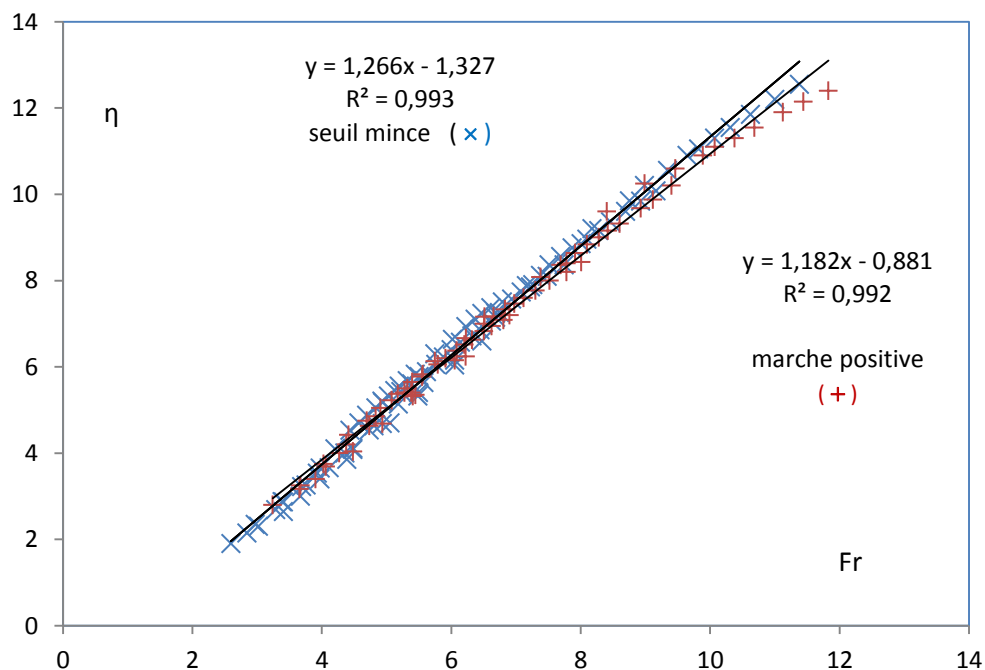


Figure 5-11 : Variation du rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F , pour les deux configurations. (x) seuil mince, (+) marche positive.

On constate clairement que les mesures expérimentales soit pour le lit mineur ou le lit majeur sont presque quasiment confondues pour la majorité des nombres de Froude testés.

ainsi la rentabilité des deux aspects des ressauts contrôlés par marche positives ou par seuils minces sont presque égales.

Conclusion :

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

L'étude expérimentale s'est intéressée, **dans un premier temps**, à la variation du rapport des longueurs conjuguées λ en fonction du nombre de Froude F_1 du ressaut contrôlé par seuil mince. L'analyse des résultats expérimentaux nous a permis de trouver des approches expérimentales globales très acceptables.

nous avons constaté qu'il est linéaire de la forme $\lambda = A (F) + B$

En second temps aussi on a essayé de trouver une relation globale de rendement η variée en fonction du nombre de Froude F_1 .

L'étude comparative du ressaut formé en canal composé, contrôlé par marche positif et par seuil mince sont quasiment identiques ainsi, les seuils de contrôle n'ont pas un effet vis-à-vis la formation du ressaut.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

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

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

A travers le premier chapitre nous avons abordé les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique évoluant **dans un canal de section droite rectangulaire**. Nous avons examiné les travaux de Bradley et Peterka (1957) concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de Bélanger qui exprime le rapport λ des longueurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut.

➤ **Dans le deuxième chapitre :** nous avons traité le ressaut contrôlé par marche positive dans un canal rectangulaire. Lorsque le seuil est placé à une distance X environ égale à la longueur L_r du ressaut, l'analyse des mesures expérimentales a montré que la hauteur relative S du seuil est telle que $S = C_o.(F_1 - 1)^{5/4}$. Le paramètre C_o est linéairement dépendant de la position relative X/h_2 du seuil.

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

➤ **Le dernier chapitre :** on a mis l'accent sur l'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal composé droit à aboutit à une équation fonctionnelle de forme

$$\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0.$$

Une nouvelle approche est proposée en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire

brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans nos développements, les valeurs du rapport des longueurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapprochées de la réalité.

➤ **La deuxième partie de notre travail :**

a concerné notre propre travail concernant la Contribution à l'étude de l'effet de la marche positive sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire de section composée

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

➤ **Le cinquième chapitre de notre mémoire de master :** a concerné l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire en lit composé à pente nulle (canal prismatique). L'analyse des résultats expérimentaux nous a permis de trouver des approches expérimentales globales très acceptables.

Dans un premier temps, nous avons expliqué la procédure expérimentale suivie par les essais. Passant **en second temps** aux résultats expérimentaux, qui ont été obtenus pour des longueurs du ressaut. Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue.

En dernier temps Concernant la relation du rapport des caractéristiques (L_j/h_1) et (L_r/h_2) en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident F_1 , nous avons constaté qu'elle est linéaire de la forme $\lambda = A (F_1) + B$ et on a tenté de trouver une approche expérimentale globale de la deuxième hauteur conjuguée variant en fonction de nombre de Froude F_1 et que cette relation a été justifiée par la première bissectrice.

Aussi on a essayé de trouver une relation globale du rendement η variant en fonction du nombre de Froude F_1 .

Ainsi, deux relations adimensionnelles du rendement sont obtenues pour les deux aspects du ressaut hydrauliques soient contrôlé par marche positive ou par seuil mince.

on en déduit que la dissipation d'énergie est presque la même dans ce type du ressaut évolué dans le canal composé.

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

Annexe

Tableau : Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes: $L_i/h_1=f(F)$ pour $h_0/h_2>1$ et $h_0/h_2<1$

$h/h_2 > 1$		$h/h_2 < 1$			
F_1	L_i/h_1	L_i/h_1	F_1	L_i/h_1	F_1
2,59343	12,00000	30,00000	4,20430	33,75000	4,41161
2,84176	12,85714	33,75000	4,43485	37,25000	4,69315
2,97164	15,25000	37,50000	4,57514	34,28571	4,83266
3,01926	16,00000	40,00000	4,69315	41,50000	4,90808
3,28813	18,28571	42,50000	4,83608	43,25000	5,07746
3,38787	20,50000	40,00000	4,94249	45,00000	5,17510
3,40915	18,00000	44,25000	4,93216	41,42857	5,27688
3,40915	19,33333	45,50000	5,02887	46,25000	5,32272
3,66801	23,00000	46,50000	5,12620	47,75000	5,39705
3,68987	24,50000	48,00000	5,19961	48,75000	5,54673
3,75569	23,42857	43,14286	5,22064	47,14286	5,56106
3,96892	24,00000	49,25000	5,32272	46,66667	5,74842
3,93311	24,66667	46,57143	5,38995	49,42857	5,79195
3,97789	27,50000	51,25000	5,44679	51,14286	5,90856
4,11323	28,28571	48,57143	5,50382	52,85714	6,08493
4,38841	29,00000	51,14286	5,61848	54,28571	6,20346
4,35754	31,00000	52,57143	5,76291	53,33333	6,22825
4,48145	31,20000	47,66667	5,74842	55,71429	6,32276
4,48145	32,28571	54,28571	5,87933	53,20000	6,51520
4,80533	35,42857	55,71429	5,99653	57,14286	6,50312
4,73271	35,00000	50,66667	6,02104	56,66667	6,50815
4,93698	36,00000	57,14286	6,14410	58,57143	6,62429
5,05314	35,00000	53,33333	6,22825	58,00000	6,64963
5,18326	40,00000	58,57143	6,32276	60,57143	6,80744
5,48669	41,20000	55,00000	6,36769	60,00000	6,82790
5,49668	42,00000	59,71429	6,44281	61,66667	6,97164
5,58018	43,33333	56,00000	6,47294	63,33333	7,11638
6,05541	46,50000	61,14286	6,62429	65,33333	7,29869
6,05541	47,20000	57,20000	6,68516	61,60000	7,37939
6,47294	52,40000	57,66667	6,61416	67,33333	7,51948
6,68516	57,00000	62,85714	6,74621	66,40000	7,69023
7,22558	61,00000	60,00000	6,79212	70,00000	7,77983
8,00532	67,50000	61,66667	6,93561	70,00000	7,91486
		63,33333	7,08010	72,00000	8,00532
		61,60000	7,15999	72,00000	8,09612
		65,00000	7,26210	74,00000	8,27873
		65,20000	7,37939	75,60000	8,41658
		66,66667	7,48253	73,50000	8,40506
		68,40000	7,51208	77,60000	8,60156
		68,66667	7,74245	80,00000	8,92847
		70,00000	7,69023	79,50000	8,98728
		72,00000	7,86976	81,60000	9,11710
		74,40000	8,09612	84,00000	9,40249
		72,50000	8,17584	84,00000	9,46231
		76,80000	8,27873	88,00000	9,88461
		79,20000	8,46270	90,50000	10,06747
		81,20000	8,69455	93,00000	10,37470

Tableau : Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes: $L_r/h_1=f(F)$ pour $h_0/h_2>1$ et $h_0/h_2<1$

$h/h_2 > 1$		$h/h_2 < 1$			
F_1	L_r/h_1	L_r/h_1	F_1	L_r/h_1	F_1
2,59343	7,00000	21,25000	4,20 430	24,25000	4,41161
2,84176	7,71429	23,75000	4,43 485	27,00000	4,69315
2,97164	9,75000	26,50000	4,57 514	23,42857	4,83266
3,01926	9,66667	28,25000	4,69 315	29,75000	4,90808
3,28813	11,14286	29,50000	4,83 608	31,00000	5,07746
3,38787	13,75000	27,14286	4,94 249	32,25000	5,17510
3,40915	12,00000	30,75000	4,93 216	29,14286	5,27688
3,40915	12,66667	32,00000	5,02 887	33,50000	5,32272
3,66801	13,50000	33,00000	5,12 620	34,50000	5,39705
3,68987	16,50000	34,00000	5,19 961	35,50000	5,54673
3,75569	15,14286	30,28571	5,22 064	33,71429	5,56106
3,96892	16,80000	35,00000	5,32 272	33,66667	5,74842
3,93311	15,66667	32,57143	5,38 995	35,71429	5,79195
3,97789	18,75000	36,00000	5,44 679	37,14286	5,90856
4,11323	18,85714	34,57143	5,50 382	38,57143	6,08493
4,38841	18,00000	36,57143	5,61 848	40,00000	6,20346
4,35754	19,66667	38,00000	5,76 291	38,33333	6,22825
4,48145	21,60000	34,33333	5,74 842	41,42857	6,32276
4,48145	21,14286	39,71429	5,87 933	38,40000	6,51520
4,80533	24,00000	40,85714	5,99 653	42,85714	6,50312
4,73271	23,33333	37,33333	6,02 104	41,00000	6,50815
4,93698	24,80000	42,28571	6,14 410	44,28571	6,62429
5,05314	25,00000	40,00000	6,22 825	42,00000	6,64963
5,18326	26,66667	43,42857	6,32 276	45,71429	6,80744
5,48669	30,00000	41,33333	6,36 769	44,33333	6,82790
5,49668	27,00000	44,57143	6,44 281	46,00000	6,97164
5,58018	30,00000	42,00000	6,47 294	47,33333	7,11638
6,05541	33,00000	46,00000	6,62 429	49,33333	7,29869
6,05541	34,40000	42,80000	6,68 516	44,80000	7,37939
6,47294	38,80000	43,33333	6,61 416	51,00000	7,51948

6,68516	39,00000	47,42857	6,74 621	49,20000	7,69023
7,22558	44,50000	44,66667	6,79 212	53,33333	7,77983
8,00532	49,50000	46,00000	6,93 561	51,60000	7,91486
		47,33333	7,08 010	54,66667	8,00532
		46,00000	7,15 999	53,20000	8,09612
		48,66667	7,26 210	54,80000	8,27873
		48,40000	7,37 939	56,00000	8,41658
		50,00000	7,48 253	51,50000	8,40506
		50,40000	7,51 208	57,60000	8,60156
		51,33333	7,74 245	60,00000	8,92847
		52,00000	7,69 023	57,50000	8,98728
		53,60000	7,86 976	61,20000	9,11710
		55,20000	8,09 612	64,00000	9,40249
		51,50000	8,17 584	62,00000	9,46231
		56,80000	8,27 873	65,50000	9,88461
		58,00000	8,46 270	68,00000	10,06747

Tableau : Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes de rendement pour $h_0/h_2 > 1$ et $h_0/h_2 < 1$

h_1	h_{2cor}	Fr	$\eta = \Delta H / h_1$	h_1	h_{2cor}	Fr	$\eta = \Delta H / h_1$
0,04	0,116	2,593431841	1,9	0,04	0,204	4,204	4,100
0,035	0,11	2,841758593	2,142857143	0,04	0,221	4,435	4,525
0,04	0,134	2,97163878	2,35	0,04	0,228	4,575	4,700
0,03	0,099	3,019257001	2,3	0,04	0,235	4,693	4,875
0,035	0,129	3,288126802	2,685714286	0,04	0,242	4,836	5,050
0,04	0,155	3,387869683	2,875	0,035	0,216	4,942	5,171
0,025	0,091	3,409154689	2,64	0,04	0,248	4,932	5,200
0,03	0,116	3,409154689	2,866666667	0,04	0,253	5,029	5,325
0,02	0,08	3,668011227	3	0,04	0,258	5,126	5,450
0,04	0,169	3,689866273	3,225	0,04	0,262	5,200	5,550
0,035	0,149	3,755690478	3,257142857	0,035	0,225	5,221	5,429
0,025	0,11	3,9689164	3,4	0,04	0,267	5,323	5,675
0,03	0,136	3,933106763	3,533333333	0,035	0,231	5,390	5,600
0,04	0,186	3,9778857	3,65	0,04	0,273	5,447	5,825
0,035	0,163	4,113231955	3,657142857	0,035	0,237	5,504	5,771
0,02	0,097	4,388411608	3,85	0,035	0,241	5,618	5,886
0,03	0,15	4,357543602	4	0,035	0,247	5,763	6,057
0,025	0,127	4,481450221	4,08	0,03	0,219	5,748	6,300
0,035	0,179	4,481450221	4,114285714	0,035	0,253	5,879	6,229
0,035	0,197	4,805334849	4,628571429	0,035	0,259	5,997	6,400
0,03	0,166	4,732710914	4,533333333	0,03	0,229	6,021	6,633
0,025	0,142	4,936983345	4,68	0,035	0,265	6,144	6,571
0,02	0,114	5,053144716	4,7	0,03	0,238	6,228	6,933
0,03	0,184	5,183264671	5,133333333	0,035	0,27	6,323	6,714
0,025	0,158	5,486692862	5,32	0,03	0,243	6,368	7,100
0,02	0,128	5,496683803	5,4	0,035	0,275	6,443	6,857
0,03	0,199	5,580176849	5,633333333	0,03	0,247	6,473	7,233
0,02	0,143	6,055413996	6,15	0,035	0,282	6,624	7,057
0,025	0,176	6,055413996	6,04	0,025	0,206	6,685	7,240
0,025	0,19	6,472939876	6,6	0,03	0,251	6,614	7,367
0,02	0,163	6,685157022	7,15	0,035	0,289	6,746	7,257
0,02	0,177	7,225578505	7,85	0,03	0,255	6,792	7,500
0,02	0,197	8,005318767	8,85	0,03	0,257	6,936	7,567
				0,03	0,262	7,080	7,733
				0,025	0,222	7,160	7,880
				0,03	0,267	7,262	7,900
				0,025	0,228	7,379	8,120
				0,03	0,273	7,483	8,100
				0,025	0,234	7,512	8,360
				0,03	0,281	7,742	8,367
				0,025	0,239	7,690	8,560
				0,025	0,244	7,870	8,760
				0,025	0,249	8,096	8,960
				0,02	0,204	8,176	9,200
				0,025	0,254	8,279	9,160
				0,025	0,259	8,463	9,360
				0,025	0,265	8,695	9,600
				0,02	0,217	8,753	9,850
				0,025	0,271	8,928	9,840
				0,02	0,224	8,987	10,200
				0,025	0,277	9,164	10,080
				0,02	0,231	9,343	10,550
				0,02	0,238	9,643	10,900
				0,02	0,241	9,824	11,050
				0,02	0,246	10,067	11,300
				0,02	0,251	10,313	11,550

0,02	0,257	10,623	11,850
0,02	0,264	10,998	12,200
0,02	0,271	11,378	12,550

Tableau : Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes de rendement pour $h_0/h_2 > 1$ et $h_0/h_2 < 1$

h_1	h_{2cor}	Fr	$\eta = \Delta H / h_1$	h_1	h_{2cor}	Fr	$\eta = \Delta H / h_1$
0,04	0,152	3,240	2,800	0,04	0,217	4,41161023	4,425
0,035	0,146	3,656	3,171	0,04	0,23	4,693150907	4,75
0,04	0,17	3,668	3,250	0,035	0,205	4,832663726	4,857142857
0,03	0,132	3,903	3,400	0,04	0,242	4,908083976	5,05
0,04	0,19	4,023	3,750	0,04	0,249	5,077458137	5,225
0,035	0,164	4,061	3,686	0,04	0,255	5,175099907	5,375
0,03	0,15	4,265	4,000	0,035	0,224	5,276880331	5,4
0,035	0,182	4,375	4,200	0,04	0,26	5,322720095	5,5
0,025	0,126	4,481	4,040	0,04	0,266	5,39704756	5,65
0,03	0,169	4,733	4,633	0,04	0,271	5,546729292	5,775
0,025	0,142	4,937	4,680	0,035	0,239	5,561055751	5,828571429
0,02	0,11	5,053	4,500	0,03	0,214	5,748416412	6,133333333
0,03	0,192	5,381	5,400	0,035	0,247	5,791946585	6,057142857
0,025	0,158	5,407	5,320	0,035	0,252	5,908560793	6,2
0,02	0,127	5,447	5,350	0,035	0,258	6,084928573	6,371428571
0,02	0,143	6,055	6,150	0,035	0,263	6,20346408	6,514285714
0,025	0,181	6,221	6,240	0,03	0,23	6,22825478	6,666666667
0,02	0,164	6,900	7,200	0,035	0,267	6,322759443	6,628571429
0,02	0,188	7,780	8,400	0,025	0,204	6,515200554	7,16
				0,035	0,274	6,503116722	6,828571429
				0,03	0,24	6,508150743	7
				0,035	0,278	6,62429088	6,942857143
				0,03	0,245	6,649629219	7,166666667
				0,035	0,283	6,807444602	7,085714286
				0,03	0,25	6,827897607	7,333333333
				0,03	0,254	6,971639901	7,466666667
				0,03	0,258	7,116376971	7,6
				0,03	0,263	7,298686881	7,766666667
				0,025	0,227	7,379388945	8,08
				0,03	0,27	7,519478277	8
				0,025	0,234	7,690230869	8,36
				0,03	0,276	7,779825232	8,2
				0,025	0,241	7,914863726	8,64
				0,03	0,283	8,005318767	8,433333333
				0,025	0,246	8,096115796	8,84
				0,025	0,25	8,278730696	9
				0,025	0,254	8,416580146	9,16
				0,02	0,212	8,405063732	9,6
				0,025	0,258	8,601555838	9,32
				0,025	0,267	8,928471344	9,68
				0,02	0,225	8,987275648	10,25
				0,025	0,272	9,117097163	9,88
				0,025	0,28	9,402489195	10,2
				0,02	0,232	9,462314041	10,6
				0,02	0,238	9,884610895	10,9
				0,02	0,242	10,06746825	11,1
				0,02	0,246	10,37470245	11,3
				0,02	0,251	10,68499993	11,55
				0,02	0,258	11,12450585	11,9
				0,02	0,263	11,44203465	12,15
				0,02	0,268	11,82698046	12,4

REFERENCE ET BIBLIOGRAPHIE

REFERENCE ET BIBLIOGRAPHIE

ACHOUR B. (2000) Ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. JHR 2000 ;38(4): 307-311.

ACKERS P. (1991) Hydraulic design of straight compound channels. SR281, HR Wallingford, Wallingford, U K, 1991.

BOUSMAR D, RIVIÈRE N, PROUST S, PAQUIER A, MOREL R, ZECH Y. (2005) Upstream discharge distribution in compound-channel flumes. J H Eng 2005, ASCE; 131(5):408-412.

BOUSMAR D, WILKIN N, JACQUEMART, J H, ZECH Y. (2004) Overbank flow in symmetrically narrowing flood plains. J H Eng 2004; 130(4): 305-312.

MORVAN H, PENDER G, WRIGHT N G, ERVINE D A. (2002) Three- Dimensional hydrodynamics of meandering compound channels. JHE 2002; 128(7): 674-682.

SELLIN R H J. (1964) A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. La Houille Blanche 2002; 7: 793-802

FERNANDES, J.N., LEAL, J.B., CARDOSO, A.H. (2010). Discussion of “Apparent friction coefficient in straight compound channels”, by Pedro J.M. Moreta and Juan Pedro Martín-Vide, Journal of Hydraulic Research (in press).

PELTIER, Y. (2011), Physical modeling of overbank flows in the vicinity of a groyne set on the floodplain. PhD-thesis of the University of Lyon, manuscript in preparation.

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

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

