

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique



Mémoire de Magister

Présenté par

M^{elle} ZIANI Sonia

Pour l'obtention du diplôme de Magister

Filière : Hydraulique
Option : Hydraulique Générale

Thème

Dissipation d'énergie par Ressaut
Hydraulique dans une conduite circulaire
avec banquettes

Soutenu le : 09/06/2015

Devant le Jury composé de :

| | | | | |
|--------------|----------|-------------------------|---------------------|------------|
| Mr MAZA | Mustapha | Professeur | Univ. de Bejaia | Président |
| Mr KHATTAOUI | Mohammed | Professeur | Univ. de Tizi-Ouzou | Rapporteur |
| Mr LADJEL | Mahmoud | Maitre de conférences A | Univ. de Bejaia | Examineur |
| Mr DJEMAI | Mohammed | Maître de conférences A | Univ. de Tizi-Ouzou | Invité |

Année Universitaire : 2014/2015

Remerciement

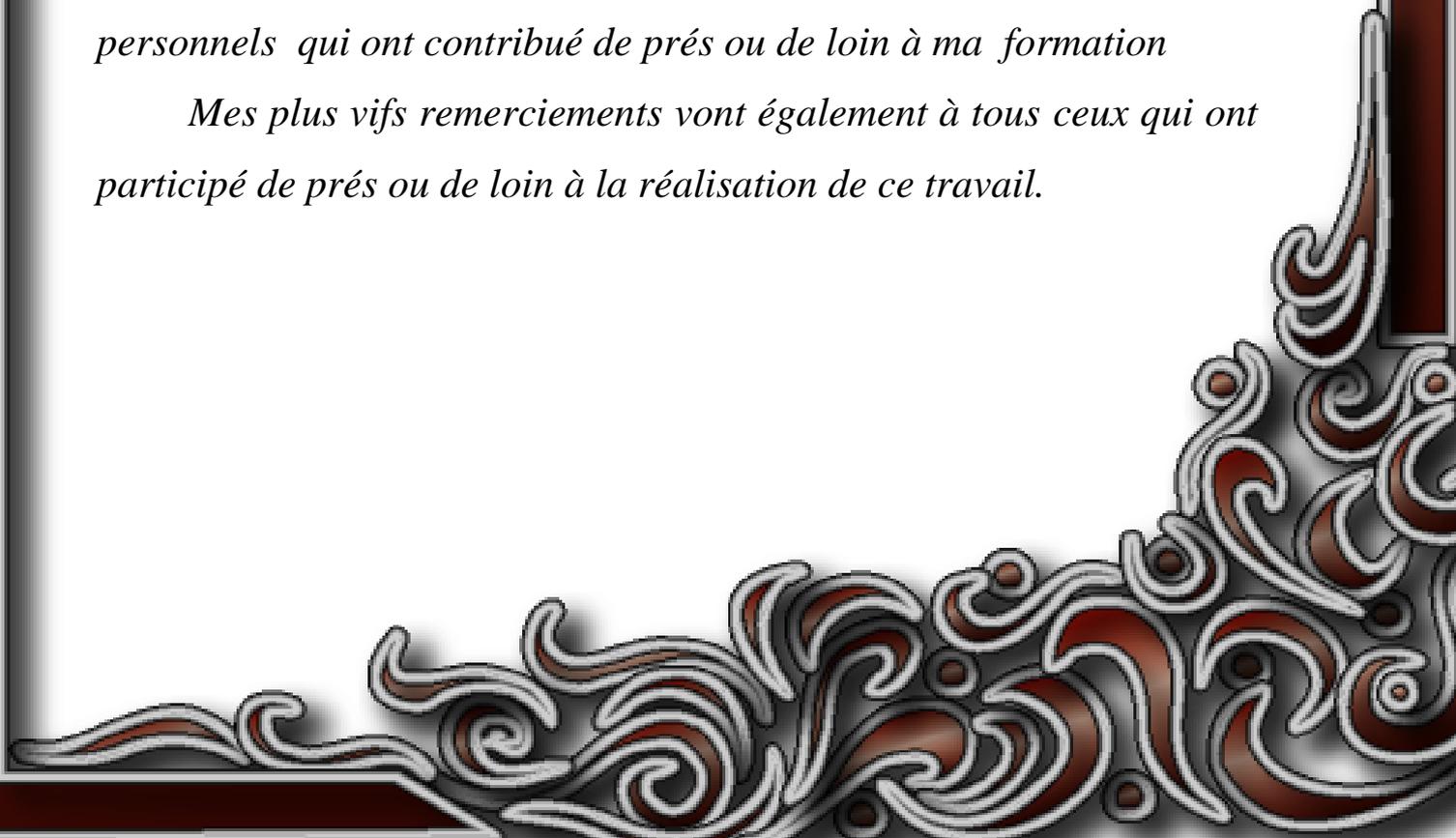
Nous tenons à remercier DIEU de nous avoir donné la force, la patience, la volonté et le courage de mener à bon terme ce modeste travail.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à mon promoteur M^r Khattaoui.M pour son encadrement et ses orientations judicieuses qui m'ont été infiniment utiles.

Je tiens encore à exprimer mes profondes gratitudee et mes vives reconnaissances à l'égard des membres de jury pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Je remercie chaleureusement tout le corps enseignants et personnels qui ont contribué de près ou de loin à ma formation

Mes plus vifs remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*Ma chère famille, père **Ahmed**, mère **Roza**, et ma sœur **Thiziri** à qui je dois beaucoup pour leurs sacrifices, leurs amour, et leurs soutiens et me voir ainsi arriver là.*

*A mes chères grand mères **Samina et Fatima***

A mes oncles, mes tantes et tous mes cousins

*A mes chers amis **Salima, Sazi, Rafika, Nabila, Lyes, Sofiane, Youyou** et surtout **Fares.** ,*

SONIA



sommaire

| | |
|------------------------------------|---|
| <i>Introduction générale</i> | 1 |
|------------------------------------|---|

Partie I : Recherche bibliographique

| | |
|---|----|
| Introduction à la première partie | 3 |
| <i>.Chapitre I : Quelques définitions</i> | 4 |
| I.1. Ecoulement à surface libre | 4 |
| I.2. Nombre de Froude | 4 |
| I.3. Canal composé (lit composé) | 4 |
| I.4. Ressaut hydraulique | 4 |
| I.5. Canal circulaire avec banquettes | 4 |
| <i>Chapitre II : Ressaut hydraulique dans une conduite circulaire brusquement élargie</i> | 5 |
| II.1. Introduction | 5 |
| II.2. Considérations théoriques | 6 |
| II.2.1. Relation générale régissant le ressaut dans la galerie circulaire brusquement élargie ... | 6 |
| II.2.2. Condition d'apparition du ressaut | 7 |
| II.3. Etude expérimentale | 8 |
| II.3.1. Protocole expérimental | 8 |
| II.3.2. Résultats expérimentaux | 9 |
| II.3.2.1. Relation générale | 9 |
| II.3.2.2. Longueurs caractéristiques du ressaut | 10 |
| II.3.2.3. Profil de surface axial du ressaut | 12 |
| II.4. Conclusion | 13 |
| <i>Chapitre III : Ecoulements uniforme et non uniforme en lit composé</i> | 14 |
| III.1. Introduction | 14 |

| | |
|---|-----------|
| III.2. Intérêt scientifique | 14 |
| III.3. Ecoulement uniforme en lit composé | 15 |
| III.3.1. Interaction mineur/majeur et couche de cisaillement | 15 |
| III.3.1.1. La force de cisaillement à l'interface mineur/majeur | 16 |
| III.3.2. Description tridimensionnelle de l'écoulement | 18 |
| III.3.2.1. Champ de vitesses | 18 |
| III.4. Ecoulement non uniforme en lit composé | 19 |
| III.5. Conclusion | 23 |
| Chapitre IV : Ressaut hydraulique en lit composé droit | 25 |
| IV.1. Introduction | 25 |
| IV.2. Rapport des hauteurs conjuguées | 25 |
| IV.3. Rendement du ressaut | 28 |
| IV.4. Conclusion | 29 |
| Conclusion à la première partie | 30 |

Partie II : Ressaut hydraulique dans une conduite circulaire avec banquettes

| | |
|---|-----------|
| Introduction à la deuxième partie | 32 |
| Chapitre I : Présentation du canal circulaire avec banquettes | 33 |
| I.1. Introduction | 33 |
| I.2. Schéma de définition | 33 |
| I.3. Détermination de la profondeur du centre de gravité de la section amont | 34 |
| I.4. Détermination de la profondeur du centre de gravité de la section aval | 38 |
| I.5. Conclusion | 42 |
| Chapitre II : Equation de la quantité de mouvement (Théorème d'Euler) | 43 |
| II.1. Introduction | 43 |
| II.2. Présentation du théorème | 43 |
| II.3. Application du théorème au ressaut hydraulique dans le canal circulaire avec banquettes | 46 |

| | |
|---|----|
| II.4. Représentation graphique de l'équation résultante | 50 |
| II.4.1. Variation de Q_d^* en fonction de F_1 pour différents h_1^* | 50 |
| II.4.2. Variation de Q_d^* en fonction h_1^* pour différents F_1 | 51 |
| II.4.3. Variation de h_2^* en fonction de h_{M1}^* pour différents β | 51 |
| II.4.4. Variation de h_{M1}^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et un β fixé. | 52 |
| II.4.5. Variation de h_{M1}^* en fonction de β pour différents F_1 et un h_1^* fixé | 55 |
| II.4.6. Variation de h_2^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et un β fixé. | 56 |
| II.4.7. Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et un h_{M1}^* fixé | 59 |
| II.5. Conclusion | 62 |
| Chapitre III : Rendement du ressaut | 63 |
| III.1. Introduction | 63 |
| III.2. Equation adimensionnelle du rendement | 63 |
| III.3. Représentation graphique | 65 |
| III.3.1. Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et un β fixé. | 65 |
| III.3.2. Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et h_{M1}^* fixé. | 68 |
| III.3.3. Variation de η en fonction de β , pour différents F_1 et un h_1^* fixé. | 72 |
| III.4. Conclusion | 72 |
| Chapitre IV : Proposition d'un protocole expérimental | 74 |
| IV.1. Introduction | 74 |
| IV.2. Dispositif expérimental | 74 |
| IV.3. Procédure expérimentale | 76 |
| IV.4. Traitement des résultats expérimentaux | 78 |
| IV.5. Appareillage de mesure | 78 |
| IV.5.1 : Débitmètre à diaphragme | 78 |
| IV.5.2 : Limnimètre à vernier | 80 |
| IV.6. Conclusion | 82 |
| Conclusion à la deuxième partie | 83 |
| Conclusion générale | 84 |
| Références bibliographiques | 87 |

Notations

D: Diamètre du lit majeur

d: Diamètre du lit mineur

F : Nombre de Froude

L_m: Lit mineur

L_M: Lit majeur

Y : Rapport des hauteurs conjuguées

β : Taux d'élargissement D/d

β₁ et β₂ : Coefficient de Boussinesq au pied et à la fin du ressaut

τ : Taux de remplissage h_2/D

L_r: Longueur du rouleau

L_j : Longueur du ressaut

PI: Plaine d'inondation

η : Rendement du ressaut

A₁: Section à la fin du ressaut

A₂ : Section au pied du ressaut

h₁^{*} : Première hauteur conjuguée relative

h₂^{*} : Deuxième hauteur conjuguée relative

h_{m1}^{*} : Hauteur relative aval

Q_d^{*} : Débit relatif = $(Q^2/gd^5)^{1/2}$

ρ : Masse volumique

α : Demi-angle au centre

ϖ : Poids spécifique

f_x : Force de résistance rajoutée

y_1 : Centre de gravité du lit mineur

y_{M1} : Centre de gravité du lit majeur

ΔH : La différence de lecture entre deux tubes du manomètre

ξ : coefficient tenant compte des pertes par frottement

C_d : Coefficient de débit

C_c : Coefficient de contraction

F_1 et F_2 : Les forces hydrostatiques au pied et à la fin du ressaut

V : Le volume

V : La vitesse

Q : Débit volume

g : Accélération de la pesanteur

A_m : Aire de la section du lit mineur

A_{M1} : Aire de la section du lit majeur

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Schéma simplifié du dispositif expérimental. | 9 |
| Figure I.2 : Variation théorique et expérimentale du taux de remplissage aval $\tau = h_2/D$ de la galerie | 10 |
| Figure I.3 : Variation expérimentale des longueurs relatives du ressaut dans une galerie circulaire brusquement élargie, en fonction du débit relatif Q_d^* et pour divers taux d'élargissement β . a) longueur relative du rouleau, b) longueur relative du ressaut. | 11 |
| Figure I.4 : Profil de surface généralisé $y(X)$ du ressaut à écoulement amont non développé dans une galerie circulaire brusquement élargie | 12 |
| Figure I.5 : Echanges aux interfaces entre le lit mineur et le lit majeur (<i>Bousmar, 2002</i>). | 15 |
| Figure I.6 : Les dimensions considérées par <i>Knight et Demitriou (1983)</i> | 16 |
| Figure I.7 : a) Forces appliquées aux murs et aux fonds des PI ; b) Force de cisaillement « apparente » aux interfaces verticales LM/PI. Les forces sont exprimées sous forme de pourcentage de la force totale appliquée au périmètre solide ; $h_r = (H - h)/H$ est la hauteur relative de débordement. | 17 |
| Figure I.8 : Force de cisaillement apparente s'exerçant à l'interface horizontale située au niveau de plein bord dans le LM (pourcentage de la force appliquée au périmètre mouillé total), en fonction de la hauteur relative de débordement $h_r = (H - h)/H$ | 18 |
| Figure I.9 : Structure tridimensionnelle de l'écoulement en lit composé droit, d'après <i>Shiono et Knight (1991)</i> | 19 |
| Figure I.10 : a) Mécanisme de génération des courants secondaires ; b) Principales contributions de production d'énergie turbulente (<i>Shiono et Muto, 1998</i>). | 20 |

| | |
|---|----|
| Figure I.11 : Vue de dessus d'un exemple de lit composé oblique | 20 |
| Figure I.12 : Vue en plan des géométries divergentes (<i>Proust, 2005</i>) | 22 |
| Figure I.13 : Alimentation séparée du canal composé droit | 22 |
| Figure I.14 : Présence d'épi d'épaisseur négligeable | 23 |
| Figure I.15 : Elargissement brusque de la plaine d'inondation | 23 |
| Figure I.16 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit | 25 |
| Figure I.17 : Variation de Y , calculé par (I.18), en fonction de F_1 . (---) : $\beta = 1$ | 27 |
| Figure I.18 : Variation de Y en fonction de F_1 . (o) : équation (I.18), (+) : équation (I.16) | 28 |
| Figure I.19 : Variation de η en fonction de F_1 . (---) : $\beta = 1$. Y est calculé par l'équation (I.18) | 29 |
| Figure I.20 : Variation de η en fonction de F_1 . (o) : équation (I.16), (+) : équation (I.18)..... | 29 |
| Figure II.1 : Canal circulaire avec banquettes | 34 |
| Figure II.2 : Centre de gravité dans le lit mineur | 34 |
| Figure II.3 : Variation de A_1^* en fonction de h_1^* . x : Relation (II.2) ; o : Relation (II.4) | 37 |
| Figure II.4 : Variation de $\overline{h_1^*}$ en fonction de h_1^* | 38 |
| Figure II.5 : Centre de gravité dans le lit majeur | 39 |
| Figure II.6 : Variation de A_{M1}^* en fonction de h_{M1}^* | 41 |
| Figure II.7 : Variation de $\overline{h_{M1}^*}$ en fonction de h_{M1}^* | 41 |
| Figure II.8 : Volume de contrôle pour un tube de courant | 45 |
| Figure II.9 : Variation de Q_d^* en fonction de F_1 pour différents h_1^* | 50 |
| Figure II.10 : Variation de Q_d^* en fonction h_1^* pour différents F_1 | 51 |
| Figure II.11 : Variation de h_2^* en fonction de h_{M1}^* pour différents β | 52 |
| Figure II.12 : Variation de h_{M1}^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 1$ | 53 |

| | |
|--|----|
| Figure II.13 : Variation de h_{M1}^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 2$. | 53 |
| Figure II.14 : Variation de h_{M1}^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 3$. | 54 |
| Figure II.15 : Variation de h_{M1}^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 4$. | 54 |
| Figure II.16 : Variation de h_{M1}^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 5$. | 55 |
| Figure II.17 : Variation de h_{M1}^* en fonction de β pour différents F_1 et un $h_1^* = 0,3$. | 55 |
| Figure II.18 : Variation de h_2^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 1$. | 56 |
| Figure II.19 : Variation de h_2^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 2$. | 57 |
| Figure II.20 : Variation de h_2^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 3$. | 57 |
| Figure II.21 : Variation de h_2^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 4$. | 58 |
| Figure II.22 : Variation de h_2^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 5$. | 58 |
| Figure II.23 : Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0$. | 59 |
| Figure II.24 : Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,1$. | 60 |
| Figure II.25 : Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,2$. | 60 |
| Figure II.26 : Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,3$. | 61 |
| Figure II.27 : Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,4$. | 61 |
| Figure II.28 : Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,5$. | 62 |
| Figure II.29 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 1$. | 66 |
| Figure II.30 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 2$. | 66 |
| Figure II.31 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 3$. | 67 |
| Figure II.32 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 4$. | 67 |
| Figure II.33 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 5$. | 68 |
| Figure II.34 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0$. | 69 |

| | |
|---|----|
| Figure II.35 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,1$ | 69 |
| Figure II.36 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,2$ | 70 |
| Figure II.37 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,3$ | 70 |
| Figure II.38 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,4$ | 71 |
| Figure II.39 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,5$ | 71 |
| Figure II.40 : Variation de η en fonction de β pour différents F_1 et $h_1^* = 0,3$ | 72 |
| Figure II.41 : Schéma type simplifié du dispositif expérimental 1 : ouverture, 2 : Lit mineur, 3 : Lit majeur | 75 |
| Figure II.42 : Coupe longitudinale du débitmètre à diaphragme | 79 |
| Figure II.43 : Photographie du limnimètre à vernier | 81 |

liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau II.1 : Caractéristiques relatives de la section amont..... | 37 |
| Tableau II.2 : Caractéristiques relatives de la section aval | 40 |

INTRODUCTION GENERALE

L'écoulement à surface libre est caractérisé par une surface où règne une pression atmosphérique. Cet écoulement peut être uniforme, graduellement varié ou brusquement varié. L'écoulement brusquement varié est caractérisé par de brusques variations des caractéristiques hydrauliques de l'écoulement, comme la vitesse ou la pression, sur une courte distance. Parmi les écoulements brusquement variés, on trouve les ressauts hydrauliques, définis comme une brusque transition d'un régime torrentiel de l'écoulement en régime fluvial sur une courte distance.

Le phénomène du ressaut hydraulique peut se produire à l'aval immédiat d'une vanne de fond, ou au piémont d'un barrage déversoir. Le ressaut est le siège d'une dissipation importante d'énergie. C'est à cet effet qu'il est justement utilisé en pratique. Le ressaut hydraulique est caractérisé principalement par les deux hauteurs conjuguées, initiale et finale, la longueur du ressaut et la longueur du rouleau. Le dimensionnement du bassin, appelé à abriter le ressaut hydraulique, dépend aussi du profil de la surface libre de ce dernier. La connaissance de la distribution des vitesses, dans le corps même du ressaut, permet de comprendre le comportement de celui-ci, et, par conséquent, de prendre les dispositions nécessaires pour la sécurité de l'ouvrage l'abritant.

Le nombre sans dimension de *Froude* de l'écoulement incident, noté F_1 , représentant le rapport entre les forces d'inertie et les forces de pesanteur, est d'une importance capitale dans l'étude des écoulements brusquement variés. En outre, l'équation de Bernoulli (équation d'énergie) et celle d'Euler (équation de la quantité de mouvement) sont les principales équations utilisées dans l'étude des dits écoulements, *khattaoui* (2007).

Les ressauts se produisant dans des canaux de section simple ont fait l'objet de la quasi-totalité des recherches antérieures. Ceux se produisant dans les canaux de section composée ne sont que très peu étudiés.

Notre présente étude s'intéresse justement à une des formes composées de canaux ; il s'agit du canal circulaire avec banquettes. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet national de recherche, intitulé « Contribution à l'étude de quelques ouvrages hydrauliques », dirigé par le Professeur Achour Bachir de l'université de Biskra.

Le mémoire est subdivisé en deux principales parties. La première partie est consacrée à la recherche bibliographique. Dans la deuxième partie, nous avons apporté notre propre contribution qui a consisté à l'étude du ressaut hydraulique qui se produit dans un canal circulaire avec banquettes.

La première partie de ce mémoire comporte quatre chapitres. Le premier chapitre définit les principaux termes qui reviennent à chaque fois dans cette étude. L'étude d'Achour (2000) sur le ressaut dans une conduite circulaire brusquement élargie est présentée en détail dans le deuxième chapitre. Un résumé succinct des études antérieures sur les écoulements uniforme et non uniforme dans les canaux composés est présenté dans le troisième chapitre. L'unique étude à notre connaissance qui a eu comme objet le ressaut dans un canal composé, l'étude de *khattaoui et al* (2012) en l'occurrence, est présenté dans le dernier chapitre de cette première partie.

La deuxième partie de ce mémoire comporte elle aussi quatre chapitres. La géométrie du canal circulaire avec banquettes est présentée dans le premier chapitre. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté puis appliqué le théorème de la quantité de mouvement au canal circulaire avec banquettes. Plusieurs graphiques ont été tracés pour illustrer l'équation résultante. L'équation donnant le rendement du ressaut est développée dans le troisième chapitre. La relation résultante est également représentée sur plusieurs graphiques. Dans le quatrième et dernier chapitre de cette deuxième partie, un protocole expérimental est proposé, servant de support pour la poursuite de cette étude à l'avenir par des essais sur modèle réduit au laboratoire.

Le mémoire est terminé par une conclusion générale dans laquelle nous avons rappelé les principaux résultats de cette étude et donné des recommandations pour sa poursuite.

PARTIE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction à la première partie

La première partie de ce mémoire est réservée aux travaux antérieurement réalisés touchant de près notre thème. La quasi-totalité des recherches antérieures sur les canaux composés ont été consacrées aux écoulements uniforme et non uniforme. Le ressaut hydraulique n'a reçu que peu d'importance, il n'a été étudié que dans le canal composé droit. Du fait que notre canal d'étude est de forme circulaire avec banquettes, on s'est intéressé dans cette recherche bibliographique aux études réalisées sur les ressauts hydrauliques dans les canaux circulaires.

Cette première partie est subdivisée en quatre chapitres

Des définitions sont données dans le premier chapitre de cette première partie afin de faciliter la lecture de ce mémoire et permettre aux novices de ce mettre rapidement dans le bain du sujet.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté l'étude d'Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une conduite circulaire brusquement élargie. C'est une étude très intéressante pour notre sujet du fait que notre canal est de forme circulaire aussi mais avec banquettes.

Les principaux résultats des études antérieures portées sur les écoulements uniforme et non uniforme dans les canaux composés sont résumés dans le troisième chapitre.

Dans le quatrième et dernier chapitre de cette première partie, nous avons présenté l'étude de *Khattaoui et al.* (2012) sur le ressaut hydraulique dans un canal composé droit.

Enfin, cette première partie est terminée par une conclusion dans laquelle nous avons synthétisé les principaux résultats inhérents à notre sujet de recherche.

Chapitre I. Quelques définitions

I.1. Écoulement à surface libre : l'écoulement à surface libre est un écoulement dont la surface libre est en contact avec l'atmosphère ; Ceci à l'inverse d'un écoulement en charge.

I.2. Nombre de Froude : Le nombre de *Froude*, F , est un nombre sans dimension caractérisant le rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité. Il s'écrit :

$$F = \left[\frac{Q^2(\partial A/\partial h)}{gA^3} \right]^{1/2} \quad (\text{I.1})$$

Où, A est la section transversal, h est le tirant d'eau, g est l'accélération de la pesanteur.

Le nombre de *Froude* définit le régime d'écoulement. Le régime peut être fluvial ($F < 1$), critique ($F = 1$) ou torrentiel ($F > 1$).

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

I.3. Canal composé (lit composé) : Le canal composé ou lit composé est caractérisé par un lit mineur surmonté d'un lit majeur de largeur plus grande que celle du lit mineur.

I.4. Ressaut hydraulique : Le ressaut hydraulique est défini comme une brusque transition d'un écoulement en régime torrentiel en un écoulement en régime fluvial. Cette transition s'effectue par une grande turbulence du mélange d'eau et d'air, siège d'une importante dissipation d'énergie.

I.5. Canal circulaire avec banquettes : C'est un canal composé dont aussi bien le lit mineur que le lit majeur est de forme demi-circulaire.

Chapitre II. Ressaut hydraulique dans une conduite circulaire brusquement élargie

II.1. Introduction

La galerie circulaire brusquement élargie est l'ouvrage le plus souvent rencontré dans les évacuateurs de crues en puits. Elle est connectée au puits de l'évacuateur par l'intermédiaire d'un coude de diamètre de sortie très inférieur à celui de la galerie. Ce type d'ouvrage fonctionne sous des charges très élevées impliquant une importante énergie cinétique à la sortie du coude, c'est à dire au droit de l'élargissement. L'écoulement dans le coude est le plus souvent en charge, tandis que la galerie est en règle générale le siège d'un écoulement à surface libre. La galerie s'étend sur une longueur souvent importante pour aboutir plus à l'aval dans l'oued dans lequel elle déverse le débit recueilli par l'évacuateur. La profondeur de l'écoulement dans l'oued peut s'élever et son influence sur le comportement de l'écoulement dans la galerie peut ne pas être insignifiante. Si le plan de charge à l'aval de l'élargissement est tel que l'écoulement y est en régime fluvial, un ressaut peut prendre naissance à l'intérieur de la galerie et dont la position initiale dépendra fortement des conditions de l'écoulement incident.

Le ressaut hydraulique évoluant dans une conduite ou une galerie circulaire partiellement occupée par l'écoulement n'a fait l'objet que de quelques recherches. Les travaux les plus significatifs et qui ont contribué à définir les caractéristiques du ressaut tel que le rapport Y des hauteurs conjuguées sont ceux de *Lane* et *Kindsvater*(1938), *Rajaratnam*(1964, 1965) et *Kunstatsky* et *Vybora*(1966). Ces travaux ont surtout montré que les rapports Y expérimentaux sont légèrement inférieurs aux rapports théoriques; cette particularité a été par ailleurs confirmée par les essais de *Silvester*(1964).

Les travaux de *Rajaratnam*,N., *Subramania*,K., (1967) ont notamment mis l'accent sur la formation latérale d'une expansion de l'écoulement incident caractérisant le pied du ressaut, aussi bien pour le canal à géométrie exponentielle que circulaire.

Les études les plus récentes effectuées sur le ressaut dans une conduite circulaire sont celles de *Hager et Sinniger* (1989), *Hager et Bremen* (1989); les essais ont cependant été menés dans une conduite profilée en "U" constituée à la base d'un demi-cercle et surmonté de deux parois verticales. Ce modèle physique a permis en outre une étude comparative des caractéristiques du ressaut évoluant dans une conduite circulaire et une conduite en "U". Pour la même valeur de la hauteur relative initiale du ressaut et du débit relatif évacué

par le canal, les essais ont montré que le rapport Y des hauteurs conjuguées ne sont que légèrement différents. Pour les valeurs élevées de la hauteur relative initiale de l'écoulement incident, les caractéristiques du ressaut dans le canal profilé en "U" sont comparables à celles du ressaut évoluant dans un canal de section droite rectangulaire.

L'objectif principal de l'étude d'Achour (2000), la plus récente de ces études, était d'observer expérimentalement le comportement du ressaut dans une galerie horizontale et circulaire brusquement élargie; le ressaut est créé de telle manière que l'écoulement incident soit non développé. Nous tenterons alors de définir la relation fonctionnelle liant les divers paramètres intervenant au phénomène et que nous présenterons en termes adimensionnels afin de lui donner un caractère de validité générale. L'influence du taux d'élargissement sera également observée ainsi que celle du débit relatif rapporté au tronçon initial de conduite circulaire générant l'écoulement incident. Les caractéristiques du ressaut telles que ses longueurs ainsi que son profil de surface axial seront quantifiées et des relations simples adimensionnelles sont proposées.

II.2. Considérations théoriques

II.2.1. Relation générale régissant le ressaut dans la galerie circulaire brusquement élargie

L'application du théorème de la quantité de mouvement dans la direction longitudinale, entre les sections initiale 0-0 et finale 2-2 du ressaut correspondant respectivement à $x = 0$ et $x = L_j$ (figure I.1), conduit à écrire, en admettant une répartition hydrostatique de la pression et une distribution uniforme de la vitesse:

$$\bar{h}_0 A_0 + \frac{Q^2}{g A_0} + F_x = \bar{h}_2 A_2 + \frac{Q^2}{g A_2} \quad (\text{I.2})$$

$\bar{h}_0 = \frac{d}{2}$ désigne le centre de gravité de la section initiale, $\bar{h}_2 = (D^3/12A_2)\sin\alpha_2^3 - (D/2)\cos\alpha_2$ est la position du centre de gravité de la section $A_2 = (D/2)^2(\alpha_2 - \sin\alpha_2 \cos\alpha_2)$ comptée à partir de la surface libre et où $\alpha_2 = \cos^{-1}(1 - 2\tau)$ est le demi-angle au centre, mesuré en radian, du segment circulaire de hauteur h_2 , F_x est la force de pression exercée par la paroi de l'élargissement dans la direction longitudinale. Par analogie à la relation de Borda-Carnot et au vu de la forme de la relation (I.2), Achour estime qu'il est admissible d'écrire que $F_x = 0,5(D - d)h_1^2$, avec $h_1 = d$. La relation (I.2) s'écrit alors :

$$\frac{d}{2} + \frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4} = h + \frac{8Q^2}{gD^4(\alpha - \sin\alpha \cos\alpha)^2} \quad (\text{I.3})$$

Lorsqu'il s'agit de répondre à un besoin de dimensionnement, l'application de la relation (I.3) permet d'évaluer le taux d'élargissement β et par suite la valeur du diamètre D de la galerie, à partir des valeurs connues du débit relatif Q_d^* et du taux de remplissage aval imposé $\tau = h_2/D$.

II.2.2. Condition d'apparition du ressaut

La figure (I.1) représente de manière schématique un ressaut hydraulique évoluant dans une galerie circulaire brusquement élargie de diamètre D . L'écoulement incident est généré par une conduite circulaire de diamètre d et le ressaut est localisé à $x \approx 0$, où x représente la coordonnée longitudinale.

Toutes les configurations de l'écoulement telles qu'elles sont représentées sur la figure (I.1) correspondent à l'égalité $H_0 = H_1$ des charges dans les sections voisines 0-0 et 1-1 :

$$\frac{d}{2} + \frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4} = h + \frac{8Q^2}{gD^4(\alpha - \sin\alpha \cos\alpha)^2} \quad (\text{I.4})$$

Q est le débit volume, α est le demi-angle au centre, mesuré en radian, du segment circulaire de hauteur h et tel que $\alpha = \cos^{-1}(1 - 2h/D)$, g est l'accélération de la pesanteur. La relation (I.4) peut s'écrire en termes adimensionnels :

$$Q_d^{*2} = (\pi^2/8) \frac{(\beta\tau - 1/2)}{[1 - \pi^2\beta^{-4}(\alpha - \sin\alpha \cos\alpha)^{-2}]} \quad (\text{I.5})$$

$Q_d^* = [Q^2/(gd^5)]^{1/2}$ est le débit relatif rapporté au diamètre d ,

$\beta = D/d$ est le taux d'élargissement de la galerie et $\tau = h/D$ est le paramètre de forme du segment circulaire dans la section 1-1 (figure I.1). Les racines, obtenues par application de la relation (I.3), n'ont un sens physique que sous la condition $\beta\tau > 1$, ou bien $h/d \geq 1$; ce résultat était prévisible étant donnée la configuration de l'écoulement pour $x = 0$ (figure I.1). Lorsque le régime d'écoulement dans la galerie devient critique, l'inégalité précédente se transforme en égalité et s'écrit :

$$\tau_c = \beta^{-1} \quad (\text{I.6})$$

L'indice "c" désigne l'écoulement critique. En outre, l'écoulement critique dans la galerie circulaire se traduit par la condition :

$$\frac{64 Q_d^{*2} \sin\alpha_c}{(\alpha_c - \sin\alpha_c \cos\alpha_c)^3} = 1 \quad (\text{I.7})$$

$Q_d^* = [Q^2/(gd^5)]^{1/2} = \beta^{-5/2} Q_d^*, \alpha_c = \cos^{-1}(1 - 2\tau_c)$. En tenant compte de (I.6), la relation (I.7) s'écrit :

$$Q_d^{*2} = \frac{(\alpha_c - \sin\alpha_c \cos\alpha_c)^3}{64 \tau_c^5 \sin\alpha_c} \quad (\text{I.8})$$

C'est la relation (I.8) qui permet de définir le débit limite $Q_{d,\text{lim}}^*$, au-delà duquel le ressaut apparaît dans la galerie circulaire brusquement élargie et caractérisé par un écoulement amont non développé.

II.3. Etude expérimentale

II.3.1. Protocole expérimental

Le modèle expérimental testé est composé d'une galerie circulaire en plexiglas transparent d'une longueur de 3 m et de diamètre intérieur $D = 0,289$ m. La galerie est connectée à son extrémité amont à un tronçon de conduite interchangeable, de section droite circulaire et de diamètre d , directement alimenté par une pompe axiale assurant un débit maximum de 30 l/s. L'écoulement dans ce tronçon de conduite initiale est sous pression pour toute la gamme des débits et des diamètres utilisés. L'écoulement incident est donc généré par le tronçon de conduite initiale alimentant la galerie et la position initiale du ressaut peut être réglée par le déplacement vertical de la vanne de fond située à l'extrémité aval du banc d'essai. La galerie débouche dans un canal de restitution de forme rectangulaire par lequel transite l'écoulement avant de déverser dans un bassin d'accumulation qui précède la pompe. Tout le dispositif ainsi décrit fonctionne en circuit fermé. Cinq valeurs de d variant entre 5 cm et 12 cm ont été considérées et autant de valeurs du taux d'élargissement $\beta = 5,780 ; 4,128 ; 3,211 ; 2,890$ et $2,408$. Les débits Q , mesurés à $\pm 0,5$ l/s au moyen d'un débitmètre à diaphragme préalablement étalonné, se trouvent dans la gamme 2,4 l/s et 23 l/s. La longueur de la galerie a été suffisante pour contenir l'ensemble des profils de surface du ressaut créés. Les profondeurs de l'écoulement, telles que la profondeur finale et les hauteurs $h(x)$ du profil de surface du ressaut ont été mesurées pour chacun des débits volumes Q . La mesure de ces grandeurs a été rendue possible grâce à une série de prises de pression statique placées le long de la génératrice inférieure de la galerie et reliées à un tableau manométrique. En raison des fluctuations parfois importantes de la surface libre, les profondeurs correspondantes ont été mesurées à ± 1 cm. Les longueurs caractéristiques du ressaut, c'est à dire la longueur L_r du rouleau de surface ainsi que la longueur L_j du ressaut, ont été mesurées avec une précision de ± 10 cm à l'aide d'un ruban gradué. La longueur L_r a été visiblement associée à la

section aval de l'écoulement indiquant la fin du rouleau de surface, tandis que la longueur L_j a été associée à la section aval pour laquelle l'écoulement tend à devenir parallèle à la génératrice inférieure de la galerie. Ceci a pu être aisément observé grâce aux prises de pression statique placées à l'aval de la galerie. Une large gamme de valeurs de la profondeur h_2 du ressaut a pu être expérimentalement obtenue et correspond à $7\text{cm} \leq h_2 \leq 28,9\text{cm}$ ou à un taux de remplissage aval de $0,245 \leq \tau \leq 1$. Le taux de remplissage aval maximal $\tau = 1$ n'a pu être strictement atteint que pour la plus grande valeur du taux d'élargissement $\beta = 5,780$.

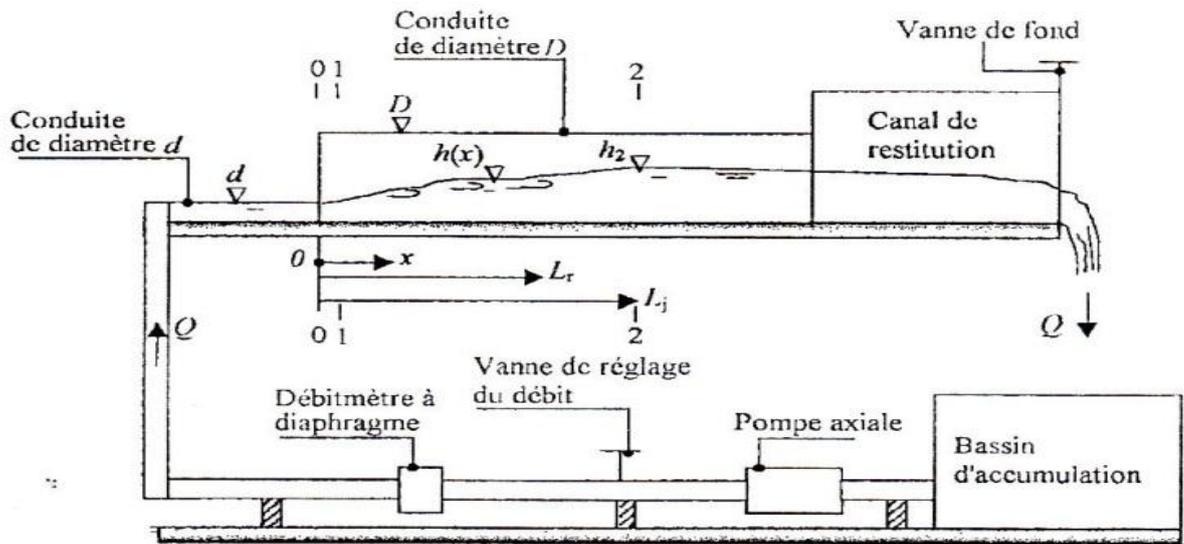


Figure. I.1 : Schéma simplifié du dispositif expérimental.

II.3.2. Résultats expérimentaux

II.3.2.1. Relation générale

L'objectif de cette première partie de cette étude est de vérifier expérimentalement la validité de la relation (I.3). La figure (I.2.) montre la variation expérimentale et théorique de τ en fonction du débit relatif Q_d^* pour chacune des valeurs testées du taux d'élargissement β de la galerie. La courbe limite d'apparition du ressaut, tracée selon la relation (I.8) y est également représentée. Nous pouvons ainsi clairement observer que les points expérimentaux répondent de manière satisfaisante aux courbes théoriques. Il faut noter également que l'apparition du ressaut dans la galerie ne correspond pas à l'égalité $\tau = \beta^{-1}$ mais satisfait l'inégalité $\tau > \beta^{-1}$; ainsi, le taux de remplissage aval de la galerie est tel que $\beta^{-1} < \tau \leq 1$.

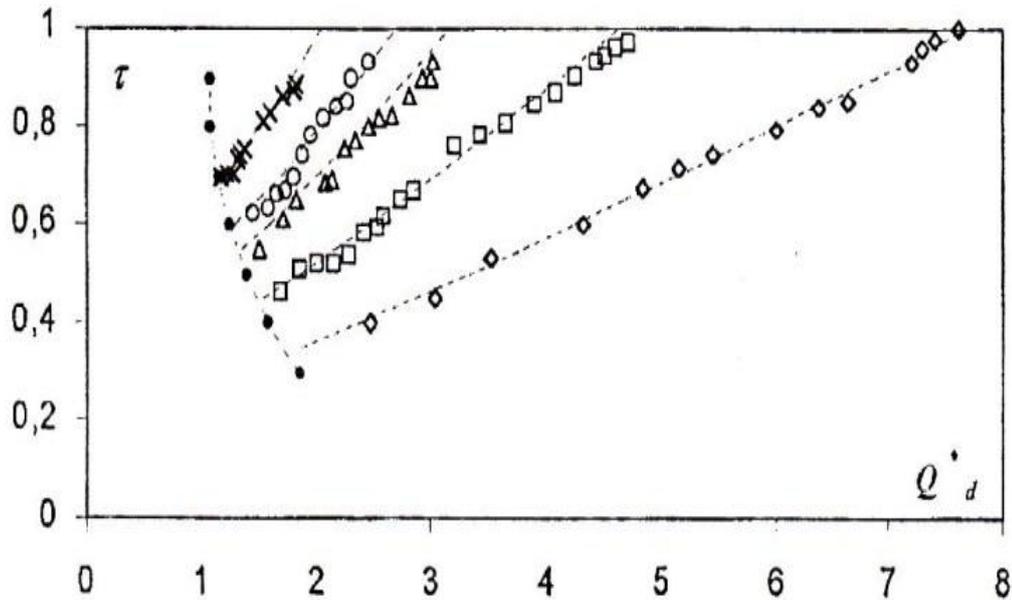


Figure I.2 : Variation théorique et expérimentale du taux de remplissage

aval $\tau = h_2/D$ de la galerie en fonction du débit relatif $Q_d^* = [Q^2/(gd^5)]^{1/2}$. (- - -) courbes théoriques tracées selon la relation (I.3). (- ● -) courbe limite d'apparition du ressaut selon la relation (I.8). Points expérimentaux : (x) $\beta = 2,408$; (o) $\beta = 2,890$; (Δ) $\beta = 3,211$; (\blacksquare) $\beta = 4,128$; (\diamond) $\beta = 5,780$.

II.3.2.2. Longueurs caractéristiques du ressaut

Les longueurs L_r et L_j du ressaut ne peuvent être quantifiées que par la voie expérimentale. En raison de l'instabilité horizontale du ressaut et de l'imprécision avec laquelle sont localisées les sections correspondantes, la représentation graphique de la variation des longueurs relatives L_r/h_2 et L_j/h_2 caractéristiques du ressaut se traduit par un nuage de points plus ou moins épais selon la précision de l'appareillage et de l'habileté du manipulateur.

Les figures 3.a et 3.b montrent respectivement la variation expérimentale des longueurs relatives L_r/h_2 et L_j/h_2 en fonction du débit relatif Q_d^* et pour l'ensemble des valeurs testées du taux d'élargissement β de la galerie. Nous pouvons ainsi observer que les mesures expérimentales se traduisent par un nuage de points relativement mince qui permet de conclure que les points obtenus se répartissent uniformément autour d'une courbe plate ou même autour d'une valeur moyenne. En outre, les figures (I.3.a et I.3.b) n'indiquent aucune influence significative du débit relatif Q_d^* et du taux d'élargissement β sur les

longueurs relatives du ressaut. Ce résultat est surtout observé pour $Q_d^* \leq 6$ et nous pouvons écrire:

$$L_j/h_2 = 7,00 \pm 0,5 \quad (\text{I.9})$$

$$L_r/h_2 = 6,50 \pm 0,5 \quad (\text{I.10})$$

Les relations (I.9) et (I.10) indiquent que les longueurs relatives du ressaut dans une conduite circulaire brusquement élargie et correspondant à une position telle que $x \approx 0$ sont légèrement plus grandes, mais toutefois comparables, que celles du ressaut évoluant dans une conduite circulaire dépourvue d'élargissement pour lequel $L_j/h_2 = 6$ Hager (1987).

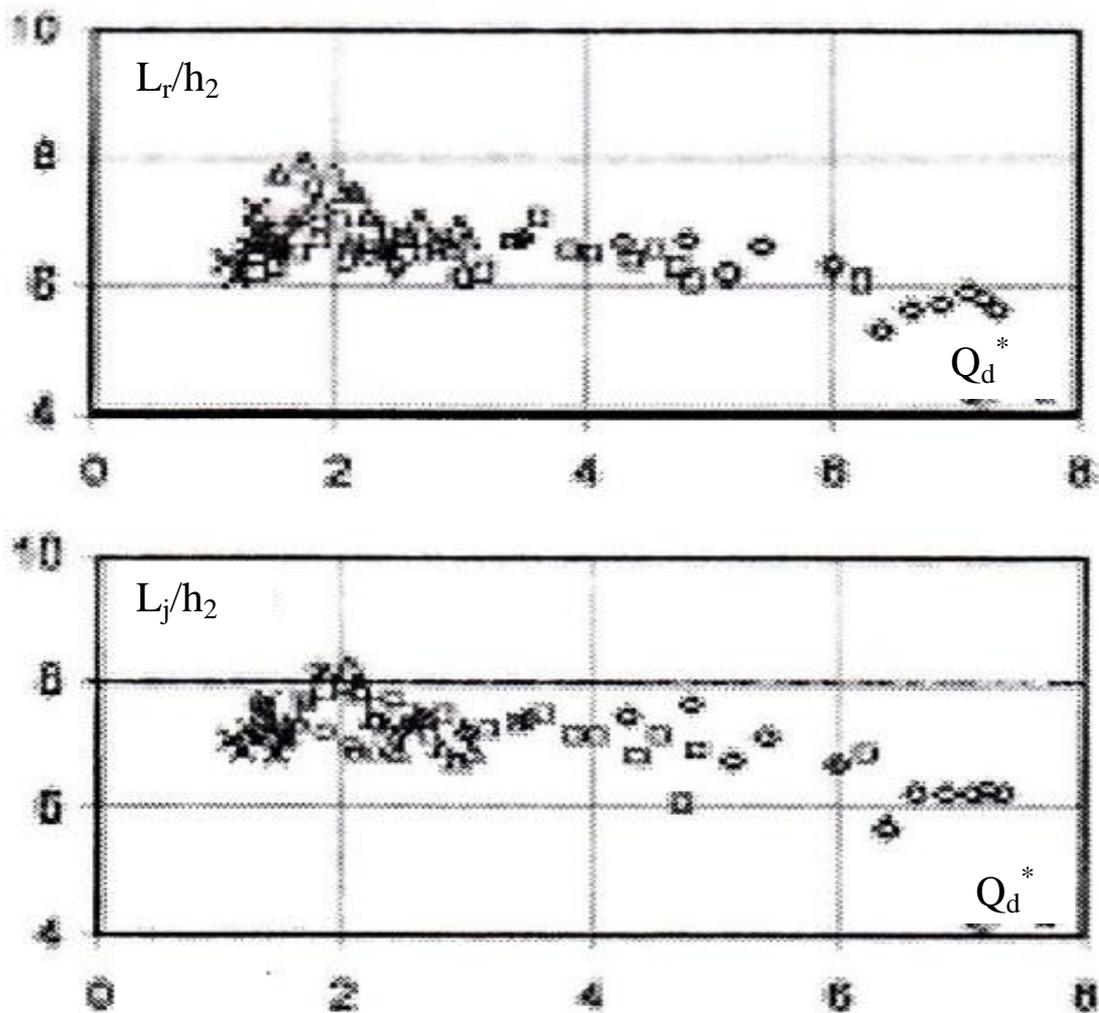


Figure I.3 : Variation expérimentale des longueurs relatives du ressaut dans une galerie circulaire brusquement élargie, en fonction du débit relatif Q_d^* et pour divers taux d'élargissement β . a) longueur relative du rouleau, b) longueur relative du ressaut. Notation selon la figure (I.2).

II.3.2.3. Profil de surface axial du ressaut

L'étude expérimentale du ressaut à écoulement amont non développé dans une galerie circulaire brusquement élargie n'a montré aucune asymétrie de l'écoulement par rapport à l'axe longitudinal de la conduite. Une relative instabilité horizontale a été cependant observée pour toute la gamme des débits Q et des taux d'élargissement β . L'objectif que vise cette partie de l'étude est de définir le profil de surface du ressaut dans l'axe longitudinal de la galerie. Pour une valeur fixée de β , il est possible d'obtenir différents profils de ressauts selon le débit évacué. En règle générale, le profil de surface du ressaut est défini comme étant la courbe moyenne de la surface libre entre les sections initiale et finale du ressaut de profondeur respective h_1 et h_2 . Nous adopterons alors le schéma de définition représenté par la figure (I.1). L'introduction des variables y et X telles que $y = [h(x) - h_1] / (h_2 - h_1)$ et $X = x/L_j$, ($0 \leq y \leq 1, 0 \leq X \leq 1$), a permis de définir le profil de surface généralisé du ressaut à travers une relation unique adimensionnelle. La figure (I.4) traduit la variation expérimentale de y en fonction de X pour l'ensemble des valeurs testées du taux d'élargissement β . Les mesures expérimentales ont montré que l'ensemble des couples (y, X) se situent sur une courbe unique. L'auteur a constaté que cette courbe unique répond avec une excellente approximation à la relation:

$$y = \sin(90^\circ X), 0 \leq X \leq 1 \quad (\text{I.11})$$

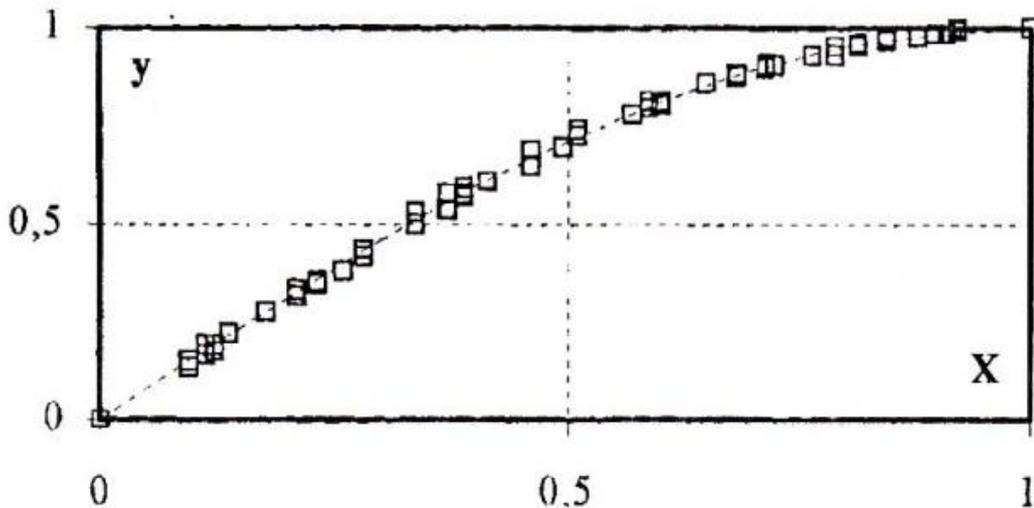


Figure I.4 : Profil de surface généralisé $y(X)$ du ressaut à écoulement amont non développé dans une galerie circulaire brusquement élargie : $0,32 \leq Q_d^* \leq 14,30$; $2,408 \leq \beta \leq 5,780$. (- - -) relation (I.11).

II.4. Conclusion

Le ressaut hydraulique à écoulement amont non développé et évoluant dans une galerie horizontale circulaire brusquement élargie a été examiné du point de vue théorique et expérimentale. Tenant compte de l'influence de la réaction de la paroi de l'élargissement, l'application du théorème de la quantité de mouvement dans le sens longitudinal a permis d'établir la relation liant le débit relatif $Q_d^* = [Q^2/(gd^5)]^{1/2}$ rapporté au diamètre d amont, le taux d'élargissement $\beta = D/d$ de la galerie où D est le diamètre de celle-ci et enfin le taux de remplissage aval $\tau = h_2/D$. Le débit limite relatif $Q_{d,lim}^*$ d'apparition du ressaut a été défini et correspond à la condition $\beta\tau = 1$.

L'étude expérimentale s'est basée sur cinq valeurs du taux d'élargissement β correspondant à la gamme $2,408 \leq \beta \leq 5,780$. Le taux de remplissage aval τ de la galerie, c'est à dire la hauteur relative finale du ressaut, a été tel que $0,245 \leq \tau \leq 1$. L'analyse des mesures expérimentales a montré que les longueurs relatives L_r/h_2 du rouleau de surface et L_j/h_2 du ressaut sont indépendantes du débit relatif Q_d^* et du taux d'élargissement β ; ces longueurs relatives sont en outre comparables à celles du ressaut évoluant dans une conduite circulaire dépourvue d'élargissement. L'étude expérimentale s'est enfin intéressée au profil de surface du ressaut.

Chapitre III. Ecoulements uniforme et non uniforme en lit composé

III.1. Introduction

La modélisation de l'inondation se heurte à plusieurs difficultés dès lors qu'interviennent des débordements de l'écoulement du lit mineur dans les lits majeurs contigus. Dans ce cas, les écoulements sont dits « en lit composé » et sont caractérisés par une forte interaction entre, d'une part, l'écoulement rapide et profond du lit mineur et, d'autre part, l'écoulement relativement lent et peu profond du lit majeur. Il en résulte un transfert de quantité de mouvement entre les deux lits associé à la formation de structures turbulentes aux interfaces les séparant. Dissipant une partie de l'énergie de l'écoulement, cette interaction modifie la capacité d'écoulement des deux lits et celle du lit composé.

Dans ces géométries composées, les lits majeurs peuvent en outre présenter une morphologie très variable le long d'une même rivière, et en particulier des variations de largeur ; celles-ci étant continues (divergence, convergence) ou discontinues (présence d'obstacle type « remblai routier », élargissement brusque). Il en découle des transferts de masse entre lit majeur et lit mineur qui conduisent – au même titre que les transferts turbulents – à des pertes d'énergie dans le cas où les écoulements dans le lit mineur et dans le lit majeur n'ont pas la même vitesse. Nous avons ainsi affaire à des écoulements graduellement ou fortement variés - selon le degré de variation de la largeur des lits majeurs - et caractérisés par une hétérogénéité des vitesses au sein des sections en travers.

III.2. Intérêt scientifique

Lors du débordement d'un cours d'eau hors de son lit mineur, la configuration d'écoulement en lit composé « avec variation continue ou discontinue de la largeur du lit majeur » est celle que l'on rencontre le plus fréquemment sur le terrain. La structure de ces écoulements doit donc être comprise, afin de pouvoir estimer de manière fiable :

➤ La relation entre débit et niveau d'eau pour le zonage des inondations [$h = f(Q)$] ou pour le calcul de la capacité d'écoulement d'un bief [$Q = f(h)$],

➤ Les paramètres hydrauliques moyens dans le lit majeur (niveau d'eau et vitesse), que ce soit en zone rurale (problèmes de stockage) ou dans les plaines d'inondation urbanisées (problèmes de vulnérabilité).

III.3. Écoulement uniforme en lit composé

Lorsqu'un écoulement, contenu jusqu'alors dans le lit mineur, se met à déborder sur la plaine d'inondation, une forme d'interaction a lieu entre, d'une part, l'écoulement rapide et profond du lit mineur et, d'autre part, l'écoulement relativement lent et peu profond de la plaine d'inondation. Il en résulte un transfert de quantité de mouvement qui est à l'origine de la diminution des vitesses et des contraintes à la paroi au sein du lit mineur et de leur augmentation dans la plaine d'inondation. Au final, le débit de la plaine d'inondation est augmenté et celui du lit mineur réduit (Proust, 2005).

III.3.1. Interaction mineur/majeur et couche de cisaillement

La somme considérable de travaux se rapportant à l'interaction mineur/majeur témoigne de la complexité des écoulements débordant hors de leur lit naturel. La difficulté à comprendre et à modéliser ces phénomènes provient du fait que la physique de l'interaction entre lits est fonction de plusieurs paramètres géométriques et hydrauliques : la hauteur de plein bord du lit mineur, h_{pb} ; la hauteur relative de débordement, $h_r = h_{pi}/h_{lm}$; le rapport des largeurs, B_{pi}/B_{lm} ; le rapport des rugosités des sous-sections appelé rugosité relative, n_{pi}/n_{lm} ; la pente du fond, S_0 ; et la forme de la section du lit mineur (rectangulaire, trapézoïdale.....).

La zone de transfert de quantité de mouvement ou couche de cisaillement, est une zone de production de structures turbulentes (figure I.5), dont certaines sont des vortex à axe vertical. Ces derniers furent identifiés la première fois en laboratoire par *R.H. Sellin* (1964).

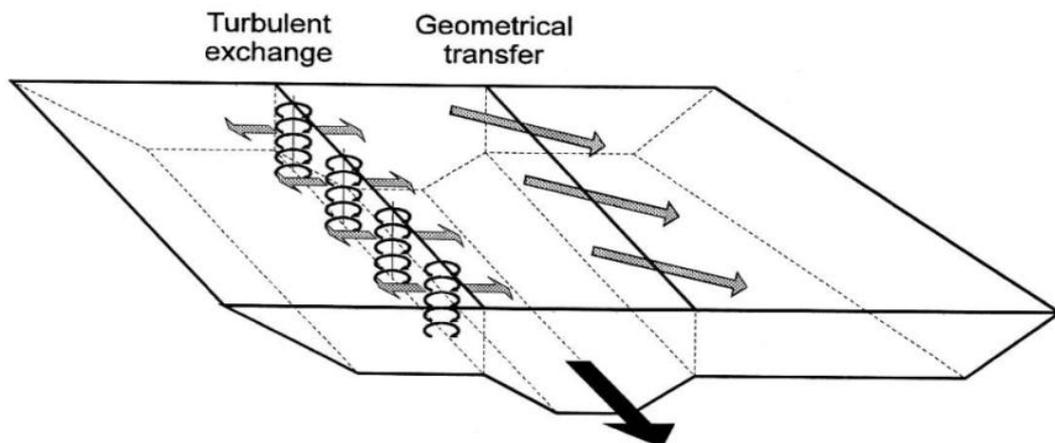


Figure I.5 : Echanges aux interfaces entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar, 2002).

III.3.1.1. La force de cisaillement à l'interface mineur/majeur

En parlant des travaux de *Cruff* (1965) pour les sections rectangulaires, *Myers* (1978) suggère qu'au sein de la zone de transfert, tout se passe comme si une force, dite « force de cisaillement apparente », était localisée à la jonction mineur/majeur – frontière virtuelle liquide – par analogie au frottement sur les parois.

Résultant du gradient de vitesse de l'interface, elle génère des structures turbulentes qui sont responsables d'une perte d'énergie additionnelle, et est représentative de l'intensité de la turbulence.

Cette force est particulièrement bien décrite et analysée dans *Knight et Demitriou* (1983). Les notations considérées sont portées sur la figure (I.6).

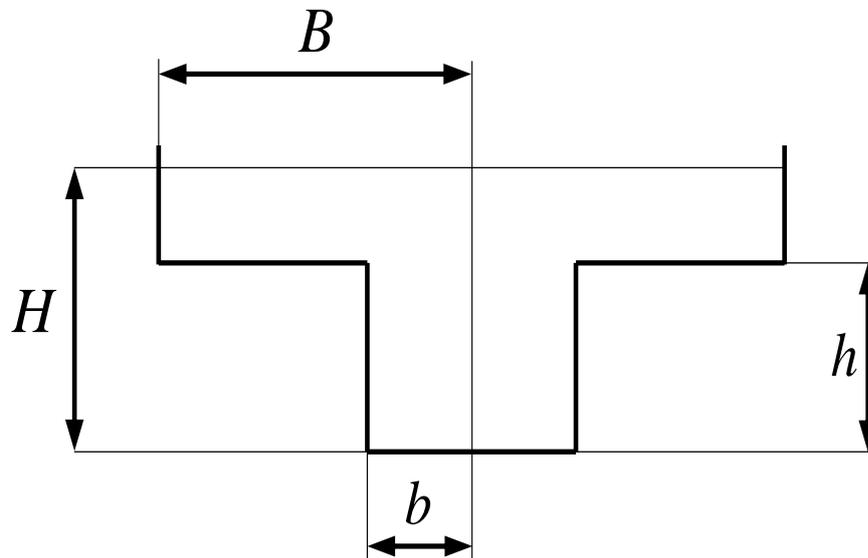


Figure I.6 : Les dimensions considérées par *Knight et Demitriou* (1983)

Dans un premier temps, ils ont mesuré la répartition des contraintes de cisaillements sur le fond (figure I.7), au tube de *Preston*, pour différents rapport B/b et hauteurs relatives $h_r = (H - h)/H$. A partir des valeurs des contraintes pariétales moyennées par sous-section, τ_{pi} , et τ_{tm} dans le Lm, ils en déduisent la valeur de la contrainte apparente à l'interface, τ_a , les deux contraintes équilibrant la force de gravité sur une sous-section en régime uniforme.

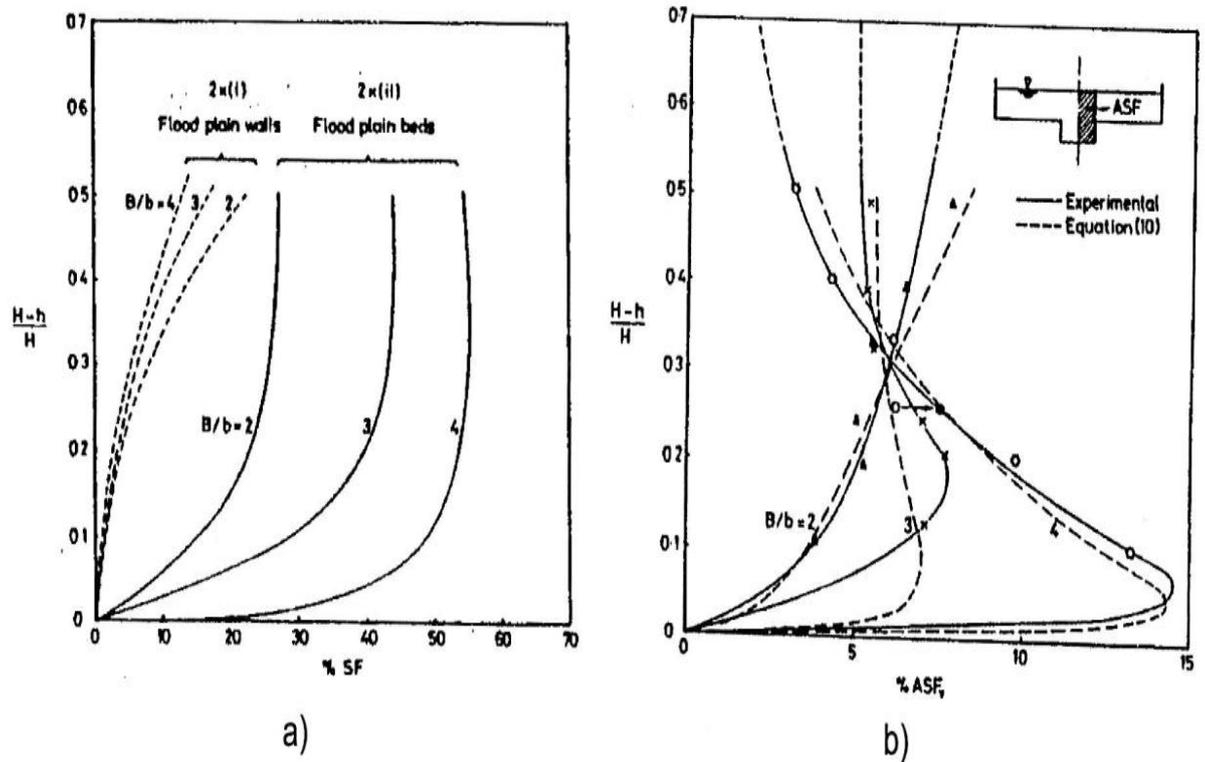


Figure I.7 : a) Forces appliquées aux murs et aux fonds des PI ; b) Force de cisaillement « apparente » aux interfaces verticales Lm/PI. Les forces sont exprimées sous forme de pourcentage de la force totale appliquée au périmètre solide ; $h_r = (H - h)/H$ est la hauteur relative de débordement. (Knight et Demitriou, 1983)

On retiendra des travaux de Knight et Demitriou (1983) que la force d'interaction entre lits est tout aussi dépendante de la hauteur de débordement que de la largeur de la PI relativement à celle de Lm.

Une analyse similaire a été aussi conduite par Knight et Demitriou en séparant l'écoulement au niveau de la hauteur de plein bord, noté h , par une interface horizontale (figure I.8). Knight et Demitriou évaluent aussi la « force de cisaillement apparente horizontale » à la hauteur h dans le lit mineur. Ils l'ont rapportée au cisaillement pariétal moyen, τ_{moy} . Les auteurs mettent clairement en évidence le fait qu'une partie non négligeable de l'énergie de l'écoulement est dissipée à l'interface Lm/PI et que cette perte est à la fois fonction de paramètres géométriques (B/b) et hydrauliques (h_r et $(U_{lm} - U_{pi})$).

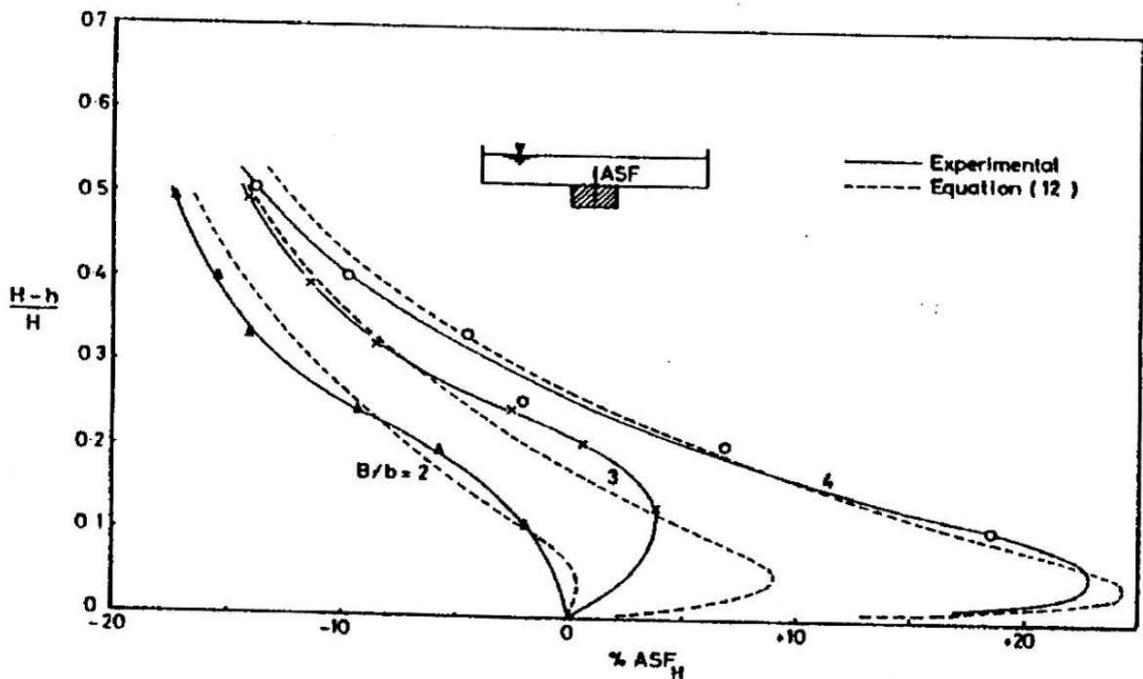


Figure I.8 : Force de cisaillement apparente s'exerçant à l'interface horizontale située au niveau de plein bord dans le Lm (pourcentage de la force appliquée au périmètre mouillé total), en fonction de la hauteur relative de débordement $h_r = (H - h)/H$. (Knight et Demetriou, 1983)

III.3.2. Description tridimensionnelle de l'écoulement

III.3.2.1. Champ de vitesses

L'exploration du champ de vitesses instantanées en lit composé a été effectuée à l'aide de Films chauds ou d'anémomètre Doppler laser à fibre optique. Elle a mis en évidence la présence simultanée de structures turbulentes 3D de différentes tailles et échelles de temps (figure I.9). La description de ces structures en lit droit est présentée dans Knight et Shiono (1990), Tominaga et Nezu (1991) et Nezu et Nakayama (1993).

On retrouve les vortex à axe vertical de nature périodique – décrit par Sellin (1964) –, qui se développent au niveau de la couche de cisaillement. A ces derniers s'ajoutent des cellules de courants secondaires hélicoïdaux, à axe longitudinal, dans le lit mineur et dans la plaine d'inondation. Ces cellules ont été déjà observées en lit simple à section rectangulaire ou trapézoïdale par Tominaga et al. (1989) : de l'ordre de 2 à 3% de l'écoulement primaire moyen, elles sont engendrées par l'anisotropie de la turbulence et son inhomogénéité ; ces derniers trouvant leurs origines dans les conditions aux limites

imposées par le fond du lit, les berges, la forme de la section, et leurs rugosités respectives. Ainsi, il n'existe pas de courant secondaires dans les sections circulaires à rugosité uniforme. En lit composé, le phénomène est amplifié par l'interaction Lm/PI .

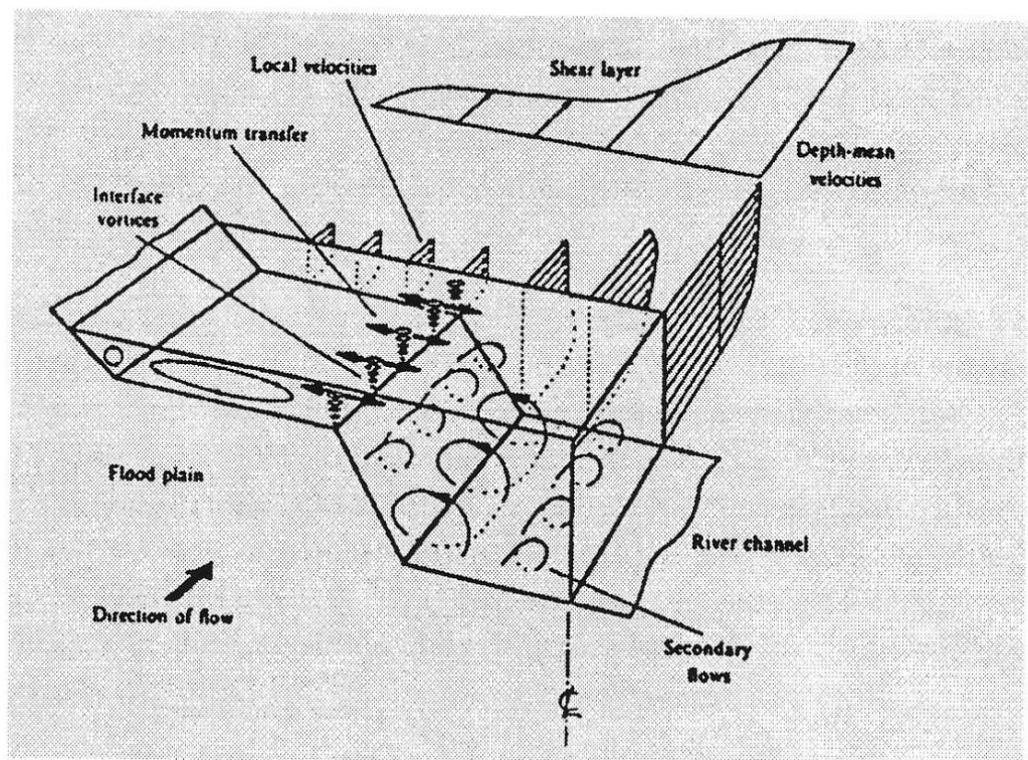


Figure I.9 : Structure tridimensionnelle de l'écoulement en lit composé droit, d'après Shiono et Knight (1990).

III.4. Écoulement non uniforme en lit composé

En milieu naturel, la plupart des biefs n'ont pas une géométrie prismatique après le débordement de l'écoulement hors du lit mineur. Ils peuvent présenter : a) un lit mineur méandrant au sein d'une plaine d'inondation de largeur constante (figure I.10); b) un lit droit au sein d'une plaine d'inondation de largeur variable (figure I.11) ; c) enfin, cas le plus complexe, un lit mineur méandrant au sein d'une plaine d'inondation variable.

On a donc affaire la plus part du temps, à des écoulements non uniformes, caractérisés par des transferts de masse entre lits donnant naissance à des pertes de charge additionnelles.

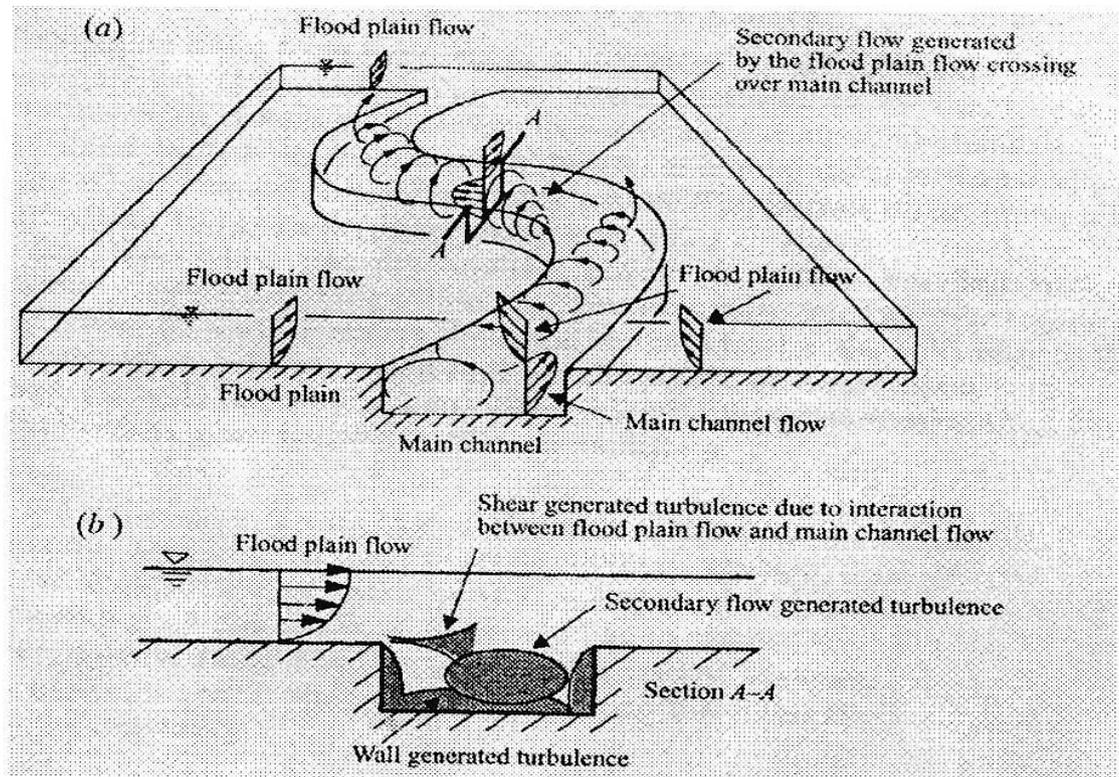


Figure I.10 :a) Mécanisme de génération des courants secondaires ; b) Principales contributions de production d'énergie turbulente (*Shiono et Muto, 1998*).

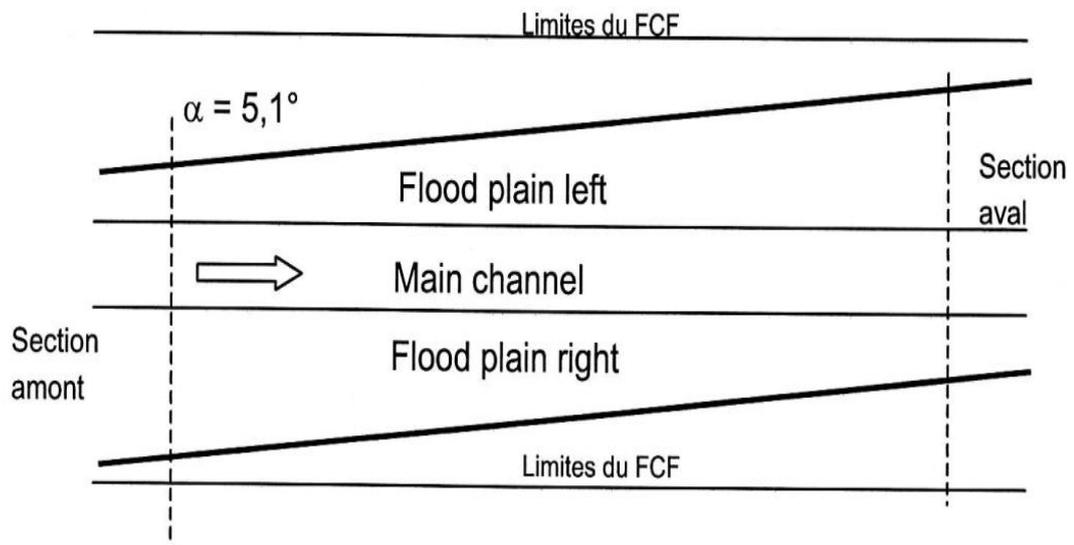


Figure I.11 : Vue de dessus d'un exemple de lit composé oblique

Les différents écoulements uniformes présentent des caractéristiques physiques semblables en ce sens qu'ils sont gouvernés par les trois mêmes sources de dissipation :

Les frottements au fond, les échanges turbulents aux interfaces mineur/majeur, et les transferts de quantité de mouvement dû aux échanges de masse entre lits. Pour autant, les poids relatifs de ces sources de dissipation varient en fonction des paramètres géométriques et hydrauliques des écoulements.

Pour un écoulement dans un lit composé asymétrique, présentant une convergence brusque du lit majeur (22°), celui-ci présente un caractère fortement convectif en ce sens que le transfert de quantité de mouvement par échange de masse domine le transfert par échange turbulent. Cela a été démontré par des bilans de quantité de mouvement expérimentaux et des mesures de tenseurs de Reynolds. Les transferts de masse sont tels que l'écoulement dans le lit majeur passe en supercritique et qu'un gradient transversal de surface libre apparaît sur la fin du convergent.

Des expériences en lit composé symétrique avec divergence linéaire de plaine d'inondations ont été conduites par *Proust* (2005) (figure I.12). Pour les trois demi-angles de divergences testés (3,8 ; 5,7 ; 11,3), on a respectivement affaire à : des écoulements symétriques sans décollement de la couche limite ; des écoulements asymétriques avec formation d'une zone de ralentissement dans un des lits majeurs, pour certain débits ; des écoulements asymétriques avec formation de zone de re-circulation. L'auteur met en évidence l'influence des paramètres géométriques et hydrauliques sur les différents écoulements.

Pour faciliter la compréhension des transferts de masse en lit non prismatique, des écoulements non uniformes en lit droit ont été explorés (*Proust*, 2005). Dans cette géométrie, l'établissement du régime uniforme est fortement lié au type d'alimentation du lit composé en limite amont. Un réservoir unique conduit à une suralimentation du lit majeur qui crée par la suite des transferts de masse en direction du lit mineur tout au long de l'écoulement. A contrario, une alimentation séparée (figure I.13) des sous-sections permet l'obtention rapide d'un régime établi : celle-ci est fortement préconisée pour des expériences ultérieures, notamment dans les canaux dont le rapport longueur/largeur est faible. Dans les lits composés droits, la répartition de débit à l'amont doit donc être considérée comme une condition limite amont.

Un type de variation discontinue de la plaine d'inondation a été analysé par *Proust* (2005) (figure I.14 et I.15). Il s'agit d'écoulements en lit composé asymétrique en présence d'un épi type « remblai routier » dans le lit majeur.

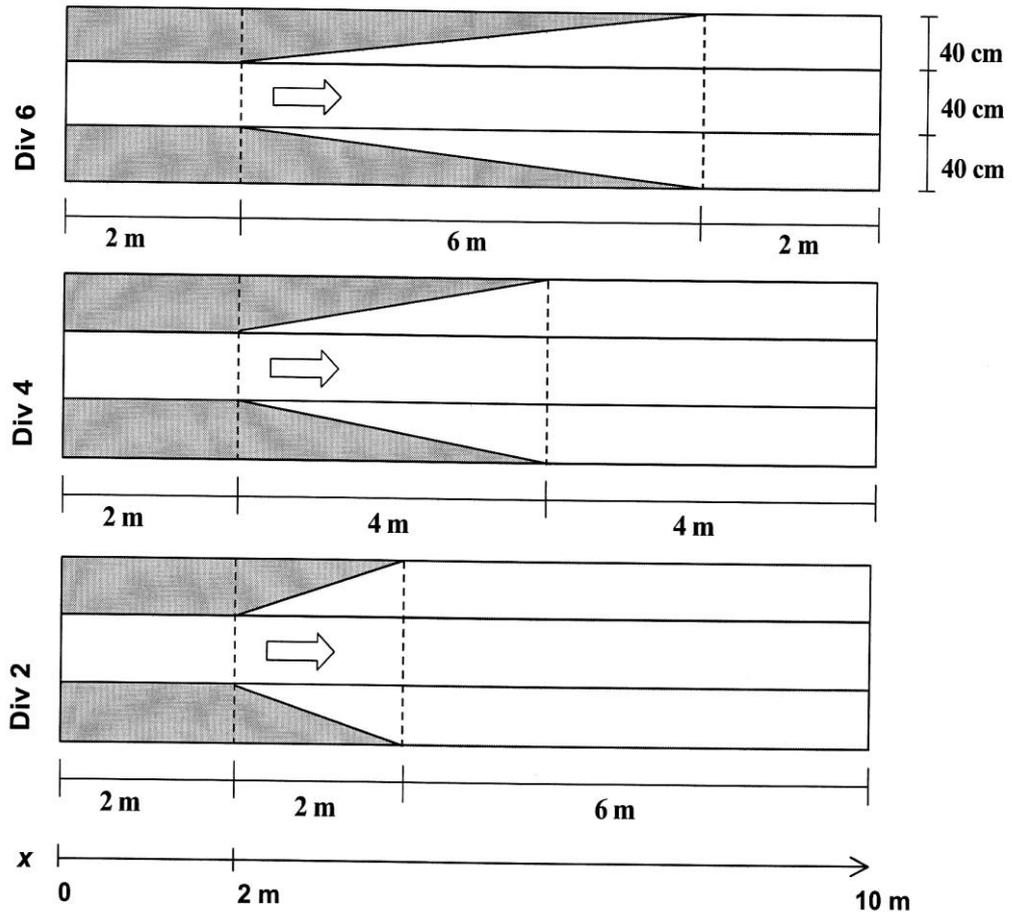


Figure I.12 : Vue en plan des géométries divergentes (Proust, 2005).

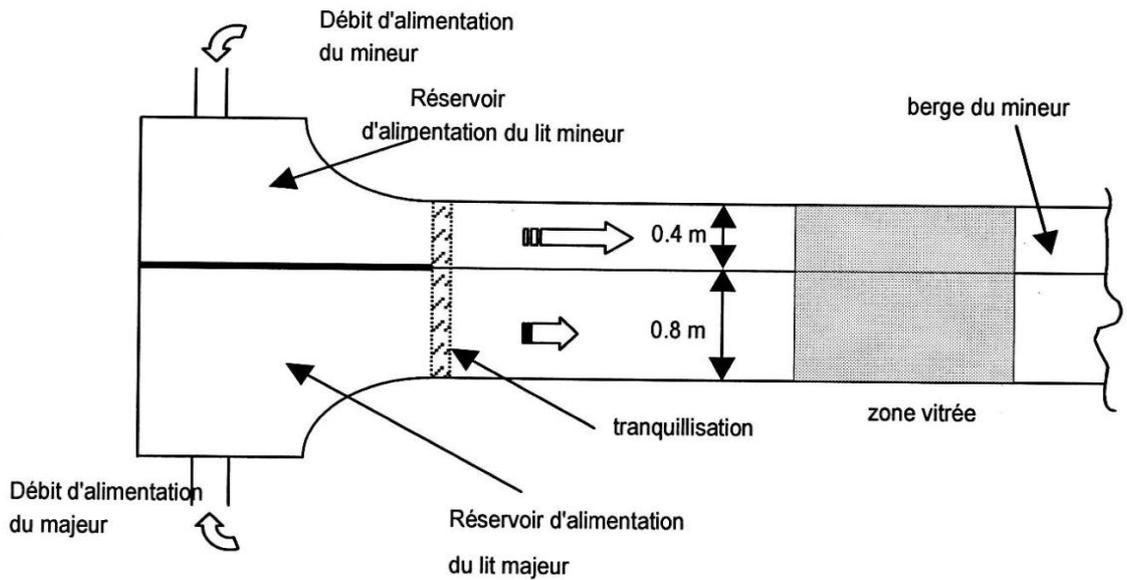


Figure I.13 : Alimentation séparée du canal composé droit

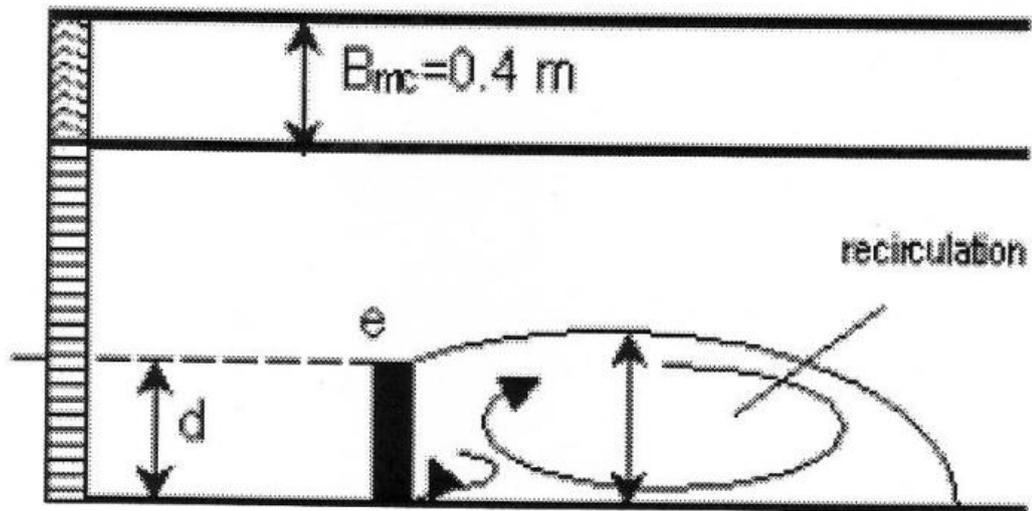


Figure I.14 : Présence d'épi d'épaisseur négligeable

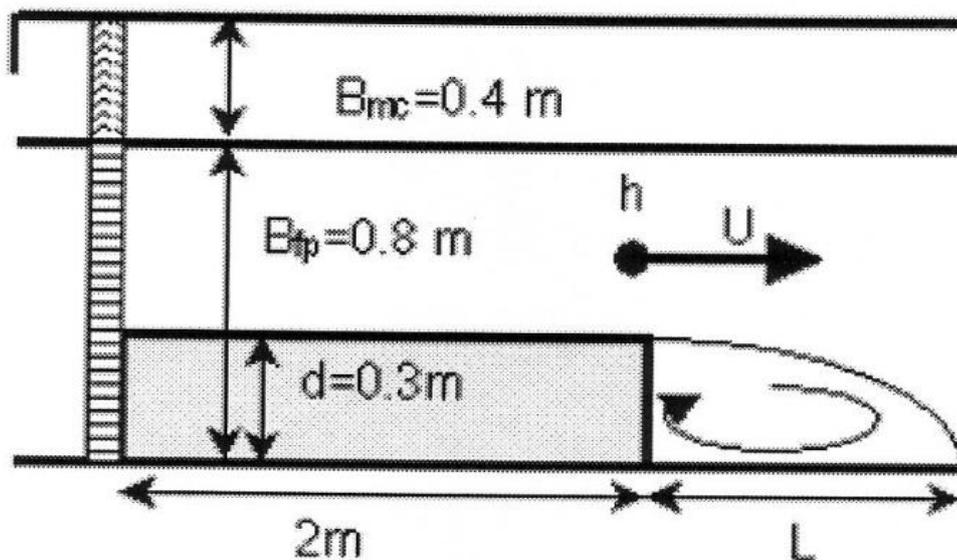


Figure I.15 : Elargissement brusque de la plaine d'inondation

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents travaux relatifs aux écoulements uniformes et non uniformes dans les lits composés. Ce chapitre a bien mis en évidence, principalement par les différents résultats expérimentaux, l'interaction entre le lit mineur et le lit majeur. Plus explicitement, l'interaction entre, d'une part, l'écoulement

rapide et profond du lit mineur et, d'autre part, l'écoulement relativement lent et peu profond du lit majeur. Il en résulte un transfert de quantité de mouvement entre les deux lits associé à la formation de structures turbulentes aux interfaces les séparant. Dissipant une partie de l'énergie de l'écoulement, cette interaction modifie la capacité d'écoulement des deux lits et celle du lit composé.

Les lits composés peuvent en outre présenter des lits majeurs d'une morphologie très variable le long d'une même rivière, et en particulier des variations de largeur ; celles-ci étant continues (divergence, convergence) ou discontinues (présence d'obstacle type « remblai routier », élargissement brusque). Il en découle des transferts de masse entre lit majeur et lit mineur qui conduisent – au même titre que les transferts turbulents – à des pertes d'énergie dans le cas où les écoulements dans le lit mineur et dans le lit majeur n'ont pas la même vitesse. Nous avons ainsi affaire à des écoulements graduellement ou fortement variés - selon le degré de variation de la largeur des lits majeurs - et caractérisés par une hétérogénéité des vitesses au sein des sections en travers.

L'exploitation des écoulements non uniformes en lit composé avec variation continue de la largeur du lit majeur n'a été que partielle : Ces angles de non prismaticité étudiés sont compris entre 0 et 22°. Il serait intéressant de pousser l'analyse à des conditions d'écoulement plus rapidement variées. L'influence sur ces écoulements d'une différence de rugosité significative entre lit mineur et lit majeur n'a pas été analysée. Des travaux complémentaires sur l'influence de la condition limite aval en hauteur, nous semblent également nécessaires. Pour les variations discontinues de largeur du lit majeur, un travail important reste à faire au niveau de la compréhension des écoulements profonds, de leur modélisation numérique ; pour ces écoulements, l'importance des transferts turbulents et la dispersion des vitesses sur la verticale risquent de complexifier grandement les phénomènes physiques en jeu.

Chapitre IV : Ressaut hydraulique en lit composé droit

IV.1. Introduction

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

IV.2. Rapport des hauteurs conjuguées

La figure (I.16) montre les différentes caractéristiques géométriques et hydrauliques du ressaut hydraulique en lit composé droit.

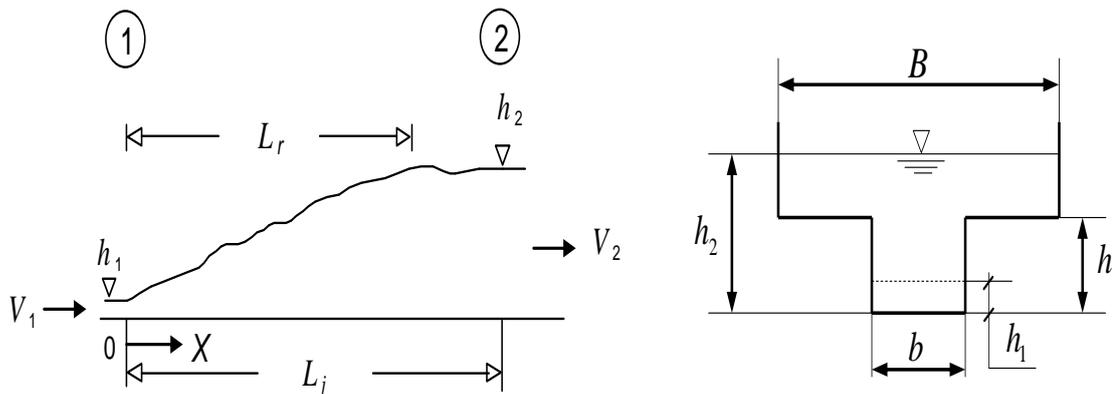


Figure I.16 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit

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. 2005*).

L'équation de la quantité de mouvement appliquée entre le pied et la fin du ressaut, défini par la figure (I.16), s'écrit comme suit :

$$\rho Q(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = f_1 - f_2 \quad (\text{I.12})$$

En s'inspirant de l'article de *Achour* (2000), par analogie à la relation de *Borda-Carnot* et au vue de la forme de la relation (I.12), il paraît admissible de rajouter une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement aurait comme expression:

$$f_x = -k\varpi(h_2 - h)^x h_1^y (B - b)^z \quad (\text{I.13})$$

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 $x + y + z = 3$, le coefficient k est tel que $k = \varphi(L_j \text{ ou } L_r, h_2, h_1, h)$.

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

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = f_1 - f_2 + f_x \quad (\text{I.14})$$

Analysons l'équation pour la fonction :

$$f_x = \frac{1}{2} \varpi (h_2 - h) h_1 (B - b) \quad (\text{I.15})$$

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 : $f_1 = \varpi (h_1/2) b h_1$ et $f_2 = \varpi (h_2 - h/2) b h + \varpi [(h_2 - h)/2] B (h_2 - h)$.

En tenant compte de toutes ces hypothèses et informations ainsi que de l'équation de continuité, $V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q$, l'équation (I.14) s'écrit en définitive, après réarrangement, comme suit :

$$2F_1^2 \left(\frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{2Y-1/\tau}{\tau} - \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (\text{I.16})$$

$$F_1 = Q / \sqrt{b^2 h_1^3 g} \quad (\text{I.17})$$

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

$$2F_1^2 \left(\frac{\beta}{Y - (1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{2Y-1/\tau}{\tau} - \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} \quad (\text{I.18})$$

Les relations (I.16) et (I.18) sont des équations fonctionnelles de forme $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

Notons que les équations (I.16) et (I.18) 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 (I.17) illustre la variation de Y , calculé par l'équation (I.18), 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 $F_{1min} = [1/(2\sqrt{2})]\sqrt{(2/\tau + 1)^2 - 1}$ correspondant à $h_2 = h$.

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

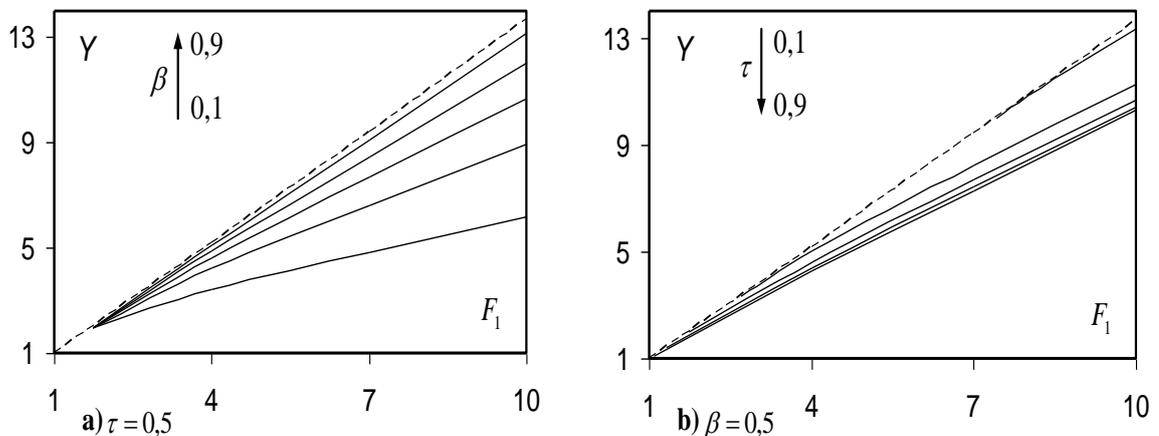


Figure I.17 : Variation de Y , calculé par (I.18), en fonction de F_1 . (---) : $\beta = 1$.

Sur la figure (I.18) nous avons représenté la variation de Y en fonction de F_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. On voit clairement que les Y calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont inférieures à celles calculées en l'a 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.

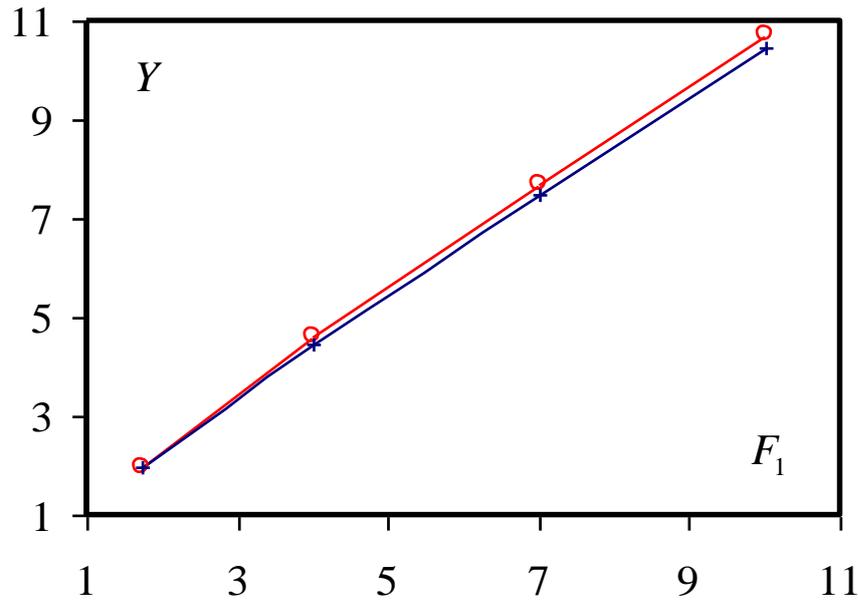


Figure I.18 : Variation de Y en fonction de F_1 . (o) : équation (I.18), (+) : équation (I.16)

IV.3. Rendement du ressaut

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

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (\text{I.19})$$

L'équation (I.19) permet le calcul, d'une manière explicite, le rendement du ressaut se produisant en lit composé droit, connaissant F_1 , Y ainsi que β et τ . En considérant les valeurs de Y calculées avec la relation (I.18), nous avons représenté sur la figure (I.19) la variation de η en fonction de F_1 . Pour un τ et un β fixés, il est clairement illustrer sur la figure que le rendement η d'un ressaut hydraulique dans un lit composé, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de F_1 . Pour un τ connu, en fixant F_1 , η diminue avec l'augmentation de β . Pour un β et un F_1 fixés, on peut aisément voir que le η augmente avec l'accroissement de τ .

Sur la figure (I.20) est représentée la variation de η en fonction de F_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. Il est bien illustré que les η calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont supérieures à celles calculées en l'a négligeant

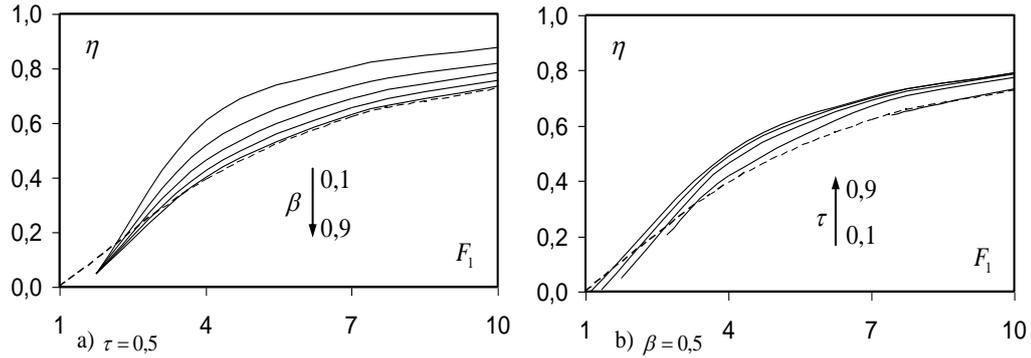


Figure I.19 : Variation de η en fonction de F_1 . (---) : $\beta = 1$. Y est calculé par l'équation (I.18).

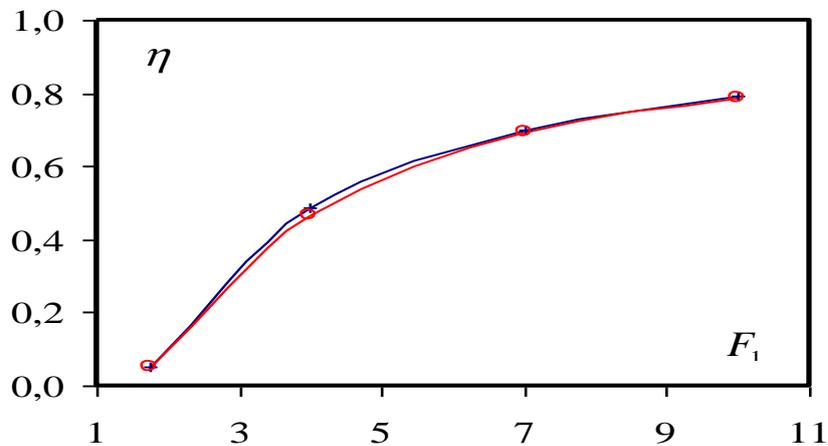


Figure I.20 : Variation de η en fonction de F_1 . (o) : équation (I.16), (+) : équation (I.18)

IV.4. Conclusion

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.

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

Conclusion à la première partie

L'étude bibliographique a révélé que la quasi-totalité des recherches antérieures sur les canaux composés ont été consacrées aux écoulements uniforme et non uniforme. Le ressaut hydraulique n'a reçu que peu d'importance, il n'a été étudié qu'en canal composé droit, où il a été examiné du point de vue théorique et expérimental. Tenant compte de l'influence de la réaction de la paroi de l'élargissement,

L'application du théorème de la quantité de mouvement dans le sens longitudinal, effectué pour le ressaut hydraulique à écoulement amont non développé et évoluant dans une galerie horizontale circulaire brusquement élargie, a permis d'établir la relation adimensionnelle le régissant. Le débit limite relatif $Q_{d^*}^*_{,lim}$ d'apparition du ressaut a été aussi défini. L'analyse des mesures expérimentales a montré que les longueurs relatives L_r/h_2 du rouleau de surface et L_j/h_2 du ressaut sont indépendantes du débit relatif Q_d^* et du taux d'élargissement β ; ces longueurs relatives sont en outre comparables à celles du ressaut évoluant dans une conduite circulaire dépourvue d'élargissement. Une relation simple est également proposée donnant le profil de surface du ressaut.

L'écoulement dans les lits composés est caractérisé par un transfert de quantité de mouvement entre le lit majeur et le lit mineur associé à la formation de structures turbulentes aux interfaces les séparant. Dissipant une partie de l'énergie de l'écoulement, cette interaction modifie la capacité d'écoulement des deux lits et celle du lit composé.

L'exploitation des écoulements non uniformes en lit composé avec variation continue de la largeur du lit majeur n'a été que partielle. Les angles de non prismaticité étudiés sont compris entre 0 et 22°. Il serait intéressant de pousser l'analyse à des conditions découlements plus rapidement variées. L'influence sur ces écoulements d'une différence de rugosité significative entre lit mineur et lit majeur n'a pas été analysée. Des travaux complémentaires, sur l'influence de la condition limite aval en hauteur, nous semblent également nécessaires. Pour les variations discontinues de largeur du lit majeur, un travail important reste à faire au niveau de la compréhension des écoulements profonds; pour ces écoulements, l'importance des transferts turbulents et la dispersion des vitesses sur la verticale risquent de complexifier grandement les phénomènes physiques en jeu.

Le ressaut hydraulique en lit composé droit a fait l'objet d'une seule étude théorique. L'application de l'équation de la quantité de mouvement a abouti à une équation fonctionnelle liant quatre paramètres adimensionnels, géométrique et hydraulique. Une

nouvelle approche est proposée en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. Afin de trouver l'expression définitive de cette force de résistance, étroitement liée au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures, sur modèle réduit au laboratoire, non effectuées encore à ce jour, sont indispensables.

Nous nous proposons pour notre contribution d'étudier le ressaut hydraulique se produisant dans un canal circulaire avec banquettes ; c'est ce qu'on a développé dans la deuxième partie de ce mémoire.

PARTIE II : RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UNE CONDUITE CIRCULAIRE AVEC BANQUETTES

Introduction à la deuxième partie

La deuxième partie de ce mémoire est subdivisée en quatre chapitres.

Le canal circulaire avec banquettes est présenté dans le premier chapitre. Ses caractéristiques géométriques nécessaires à notre étude ont été déterminées.

Dans le deuxième chapitre le théorème d'Euler, appelé également « équation de la quantité de mouvement », est d'abord présentée puis appliqué au ressaut hydraulique se produisant dans un bassin de dissipation de forme circulaire avec banquettes. L'équation résultante est ensuite représentée sur plusieurs graphiques.

Un dissipateur n'est rentable que si son rendement est important. La relation donnant le rendement du ressaut est déterminée au chapitre trois. Cette relation est représentée ensuite sur un graphique. La connaissance du rendement du ressaut est indispensable dans le choix des dimensions du bassin de dissipation.

Le quatrième et dernier chapitre de cette partie est consacré à la proposition d'un protocole expérimentale servant de guide à l'avenir pour la poursuite de la présente étude par des essais sur modèle réduit au laboratoire.

Chapitre I. Présentation du canal circulaire avec banquettes

I.1. Introduction

Le canal circulaire avec banquettes est présenté dans ce chapitre. Sur un schéma de définition nous avons présenté ses caractéristiques géométriques. Ce canal est constitué par un lit mineur surmonté d'un lit majeur.

Précisant que le ressaut objet de cette étude est caractérisé par un pied entièrement dans le lit mineur, tandis que sa fin est une section composée.

La profondeur du centre de gravité de la section amont du ressaut est déterminée en se basant sur les moments statiques. Des relations approchées sont ensuite proposées pour le calcul de la profondeur relative du centre de gravité ainsi de l'aire relative de cette section.

Pour ce qui est de la section de la fin du ressaut, nous avons également appliqué les moments statiques pour la détermination de la profondeur du centre de gravité de la partie de cette section située dans le lit majeur. Connaissant la profondeur du centre de gravité du lit mineur, l'équation de la quantité de mouvement peut être aisément appliquée. Des relations approchées sont également proposées pour le calcul de la profondeur relative ainsi que de l'aire relative de cette partie de la section composée d'aval. Des relations approchées sont ensuite proposées pour le calcul de la profondeur relative et de l'aire relative de la section amont.

I.2. Schéma de définition

La figure (II.1) présente le canal circulaire avec banquette. Ce canal est caractérisé par un lit mineur de diamètre d et un lit majeur de diamètre D . Le ressaut étudié est tel que le pied est dans lit mineur, c'est-à-dire que la première hauteur conjuguée du ressaut h_1 est inférieur ou égale à $r = \frac{d}{2}$, et la fin dans le lit majeur, c'est-à-dire que la deuxième hauteur conjuguée du ressaut h_2 est strictement supérieur à $r = \frac{d}{2}$ et bien évidemment inférieur à $r + R = \frac{d+D}{2}$.

Sur la figure, N_1 et N_2 représente respectivement le niveau amont, le pied du ressaut, et le niveau aval, la fin du ressaut.

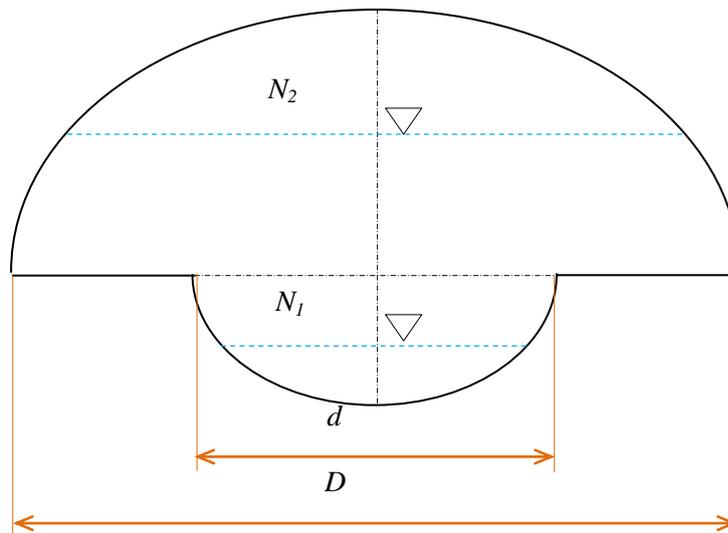


Figure II.1 : Canal circulaire avec banquettes

I.3. Détermination de la profondeur du centre de gravité de la section amont

La section amont est entièrement dans le lit mineur. Considérons un secteur semi-circulaire de diamètre d . Par commodité on utilise les coordonnées polaires $r = \frac{d}{2}$ et α_1 . Considérons alors comme le montre la figure (II.2) ci-dessous, un élément de surface ds tel que: $ds = \frac{d}{2} dr d\alpha_1$.

La position du centre de gravité sur l'axe y dirigée vers le bas, comme indiqué sur la figure, est tel que : $y_G = \frac{\int ds y}{\int ds}$, où $y = \frac{d}{2} \cos\alpha$.

La largeur de la surface libre de l'écoulement est $B = d \sin\alpha_1$.

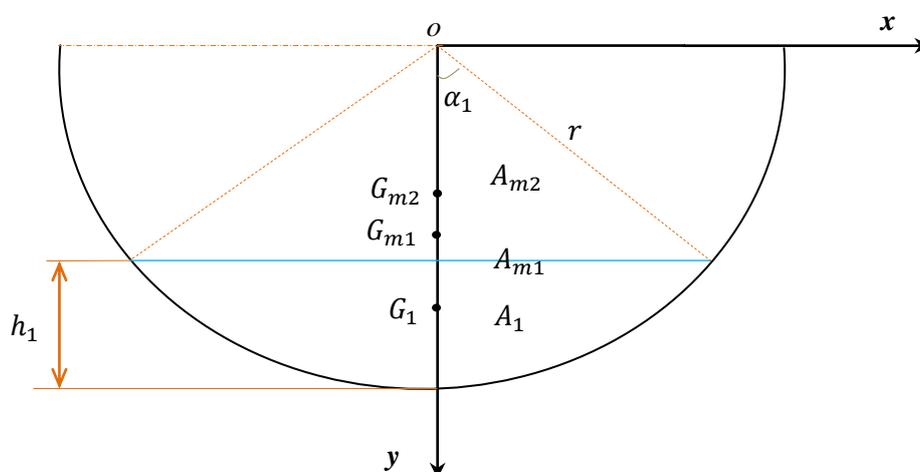


Figure II.2 : Centre de gravité dans le lit mineur

Ce qui est recherché ici est la profondeur du centre de gravité la section A_1 du pied du ressaut ; c'est la profondeur du point G_1 par rapport à la surface libre de l'écoulement. Par rapport aux axes indiqués sur la figure, l'ordonnée y_1 est la distance entre le point « o » indiquant l'origine des axes et le centre de gravité G_1 de la section amont.

Soit :

A_1 : La section d'eau (section au pied du ressaut pour notre cas) ;

A_{m2} : La section du triangle délimité par la surface libre de l'eau et le centre « 0 » ;

A_{m1} : La section de l'arc de cercle de rayon $r = \frac{d}{2}$ et d'angle $2\alpha_1$;

G_1, G_{m1} et G_{m2} sont les centres de gravité respectivement de A_1, A_{m1} et A_{m2} .

D'après la statique, en prenant les moments par rapport à l'axe des x , nous avons :

$$A_{m1}y_{m1} = A_1y_1 + A_{m2}y_{m2}$$

$$\text{Donc : } y_1 = \frac{A_{m1}y_{m1} - A_{m2}y_{m2}}{A_1}$$

Où :

$$A_{m1} = \frac{1}{4}\alpha_1 d^2,$$

$$A_{m2} = \frac{1}{4}d^2 \sin\alpha_1 \cos\alpha_1,$$

$$A_1 = A_{m1} - A_{m2} = \frac{d^2}{4}(\alpha_1 - \sin\alpha_1 \cos\alpha_1),$$

$$y_{m1} = \frac{d \sin\alpha_1}{3\alpha_1},$$

$$y_{m2} = \frac{2}{3}\left(\frac{d}{2} - h_1\right) = \frac{1}{3}d \cos\alpha_1.$$

$$\text{Donc : } y_1 = \frac{\frac{1}{4}\alpha_1 d^2 \left(\frac{d \sin\alpha_1}{3\alpha_1}\right) - \frac{1}{4}d^2 \sin\alpha_1 \cos\alpha_1 \left(\frac{1}{3}d \cos\alpha_1\right)}{\frac{d^2}{4}(\alpha_1 - \sin\alpha_1 \cos\alpha_1)}$$

$$y_1 = \frac{d \sin\alpha_1 (1 - \cos\alpha_1^2)}{3 (\alpha_1 - \sin\alpha_1 \cos\alpha_1)}$$

La profondeur du centre de gravité de A_1 est tel que :

$$\bar{h}_1 = y_1 - \left(\frac{d}{2} - h_1\right) = y_1 - \frac{d}{2} \cos\alpha_1$$

Par suite :

$$\begin{aligned}\bar{h}_1 &= \frac{d \sin\alpha_1(1 - \cos\alpha_1^2)}{3(\alpha_1 - \sin\alpha_1 \cos\alpha_1)} - \frac{d}{2} \cos\alpha_1 \\ \bar{h}_1 &= \frac{d \sin\alpha_1(1 - \cos\alpha_1^2) - 3(\alpha_1 - \sin\alpha_1 \cos\alpha_1) \frac{d}{2} \cos\alpha_1}{3(\alpha_1 - \sin\alpha_1 \cos\alpha_1)} \\ \bar{h}_1 &= \frac{d[2 \sin\alpha_1(1 - \cos\alpha_1^2) - 3\alpha_1 \cos\alpha_1 + 3 \sin\alpha_1 \cos\alpha_1^2]}{6(\alpha_1 - \sin\alpha_1 \cos\alpha_1)} \\ \bar{h}_1 &= \frac{d[2 \sin\alpha_1 - 2 \sin\alpha_1 \cos\alpha_1^2 - 3\alpha_1 \cos\alpha_1 + 3 \sin\alpha_1 \cos\alpha_1^2]}{6(\alpha_1 - \sin\alpha_1 \cos\alpha_1)} \\ \bar{h}_1 &= \frac{d[2 \sin\alpha_1 - 3\alpha_1 \cos\alpha_1 + \sin\alpha_1 \cos\alpha_1^2]}{6(\alpha_1 - \sin\alpha_1 \cos\alpha_1)} \\ \bar{h}_1 &= \frac{d[2 \sin\alpha_1 - 3\alpha_1 \cos\alpha_1 + \sin\alpha_1(1 - \sin\alpha_1^2)]}{6(\alpha_1 - \sin\alpha_1 \cos\alpha_1)}\end{aligned}$$

Finalement :

$$\bar{h}_1 = \frac{d[3 \sin\alpha_1 - 3\alpha_1 \cos\alpha_1 - \sin\alpha_1^3]}{6(\alpha_1 - \sin\alpha_1 \cos\alpha_1)} \quad (\text{II.1})$$

Pour une profondeur étoilée, $h_1^* = \frac{h_1}{d}$, la section étoilée, $A_1^* = \frac{A_1}{d^2}$, et son centre de gravité étoilé, $\bar{h}_1^* = \frac{\bar{h}_1}{d}$, peuvent être estimés par les relations approchées suivantes :

$$A_1^* = 1,1334(h_1^*)^{1,46} \quad (\text{II.2})$$

Le coefficient de corrélation est $R = 0,9998$;

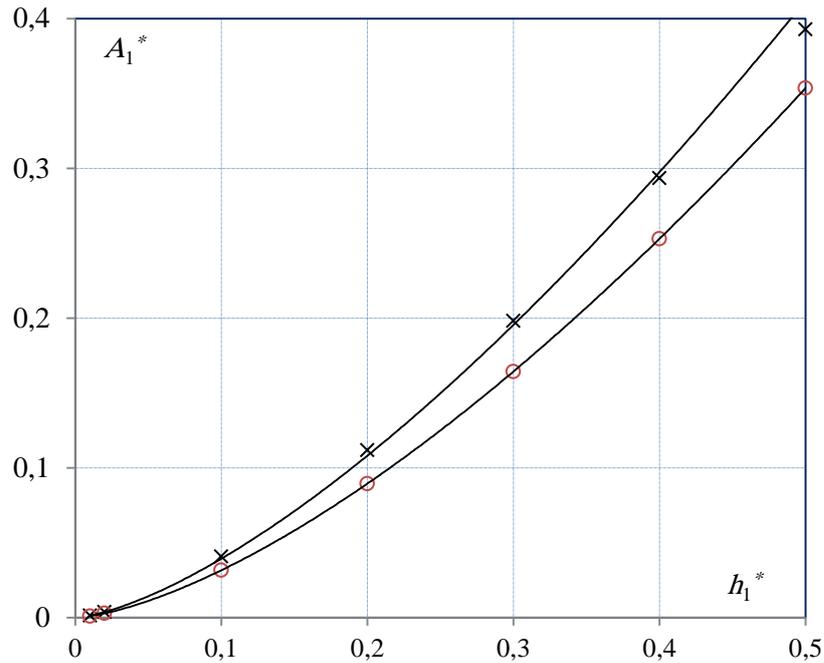
$$\bar{h}_1^* = 0,421(h_1^*)^{1,0127} \quad (\text{II.3})$$

Le coefficient de corrélation $R = 1$.

Ces deux relations de tendances sont représentées ci-après.

Sur la figure (II.3) est représenté la variation de $A_1^* = \frac{A_1}{d^2}$ en fonction de $h_1^* = \frac{h_1}{d}$. Deux relations sont représentées, la relation (II.2), qui est l'équation de la courbe de tendance, avec un coefficient de corrélation de 0,9998, des valeurs exactes issues de notre développement géométrique, et la relation à laquelle a opté *Hager* (1987) pour simplifier son développement et qui s'écrit :

$$A_1^* = h_1^{*1,5} \quad (\text{II.4})$$


 Figure II.3 : Variation de A_1^* en fonction de h_1^* .

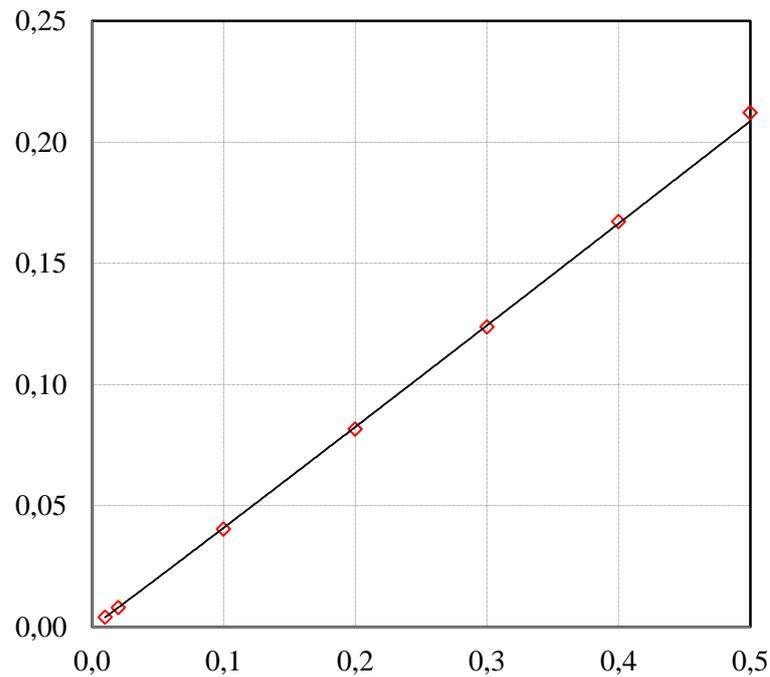
× : Relation (II.2) ; o : Relation (II.4)

A titre indicatif, le tableau (II.1) ci-dessous donne l'énorme erreur commise sur l'aire A_1^* en la calculant par la relation approchée proposée par Hager (1987).

Sur le tableau (II.1) sont dressées également les valeurs de la profondeur relative du centre de gravité \bar{h}_1^* pour différentes valeurs de la profondeur relative h_1^* calculées par la relation (II.3) de la courbe de tendance proposée avec un coefficient de corrélation de 1. Cette relation est représentée sur la figure (II.4).

Tableau II.1 : Caractéristiques relatives de la section amont

| h_1^* | A_1^* | | \bar{h}_1^* | Erreur Hager en % |
|---------|---------|--------|---------------|-------------------|
| | exacte | Hager | | |
| 0,01 | 0,0013 | 0,0010 | 0,0040 | 24,77 |
| 0,02 | 0,0037 | 0,0028 | 0,0080 | 24,55 |
| 0,10 | 0,0409 | 0,0316 | 0,0404 | 22,64 |
| 0,20 | 0,1118 | 0,0894 | 0,0816 | 20,01 |
| 0,30 | 0,1982 | 0,1643 | 0,1237 | 17,08 |
| 0,40 | 0,2934 | 0,2530 | 0,1672 | 13,77 |
| 0,50 | 0,3927 | 0,3536 | 0,2122 | 9,97 |

Figure II.4 : Variation de $\overline{h_1^*}$ en fonction de h_1^*

I.4. Détermination de la profondeur du centre de gravité de la section aval

La section aval est une section composée. La figure (II.5) représente une conduite circulaire avec banquettes. Connaissant la position du centre de gravité du lit mineur, l'application de l'équation de la quantité de mouvement nécessite la connaissance de la position du centre de gravité dans le lit majeur.

Soient :

α_2 : La moitié de l'angle d'ouverture de la surface libre ;

A_M : La section du lit majeur de forme demi-circulaire ;

A_m : La section du lit mineur de forme demi-circulaire ;

A_{M2} : La section au-dessus de la surface libre dans le lit majeur ;

A_{M1} : La section d'eau dans le lit majeur ;

$A_2 = A_m + A_{M1}$: La section à la fin du ressaut

A_1 : La section au pied du ressaut

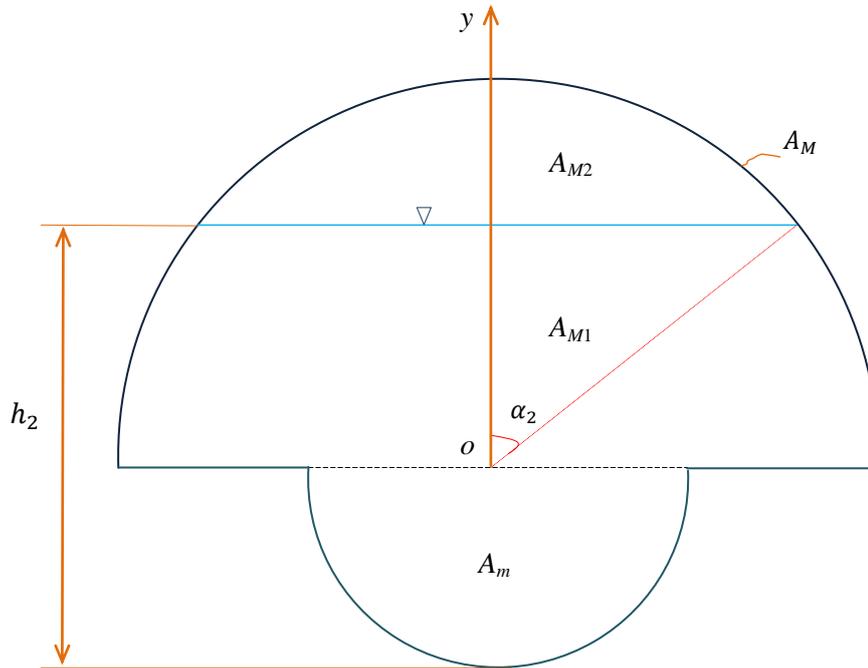


Figure II.5 : Centre de gravité dans le lit majeur

Nous avons :

$$A_{M2} = \frac{D^2}{4} (\alpha_2 - \sin\alpha_2 \cdot \cos\alpha_2),$$

$$y_{M2} = \frac{D \sin\alpha_2 (1 - \cos\alpha_2^2)}{3(\alpha_2 - \sin\alpha_2 \cos\alpha_2)}$$

$$A_M = \frac{\pi D^2}{8}, \quad y_M = \frac{2D}{3\pi}$$

$$A_{M1} = A_M - A_{M2} = \frac{D^2}{4} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 + \sin\alpha_2 \cos\alpha_2 \right),$$

La section relative est :

$$A_{M1}^* = \frac{1}{4} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 + \sin\alpha_2 \cos\alpha_2 \right) \quad (\text{II.5})$$

$$y_{M1} = \frac{A_M y_M - A_{M2} y_{M2}}{A_{M1}}$$

$$\alpha_2 = a \cos \left(\frac{h_{M1}}{D/2} \right) = a \cos \left(\frac{2 h_{M1}}{D} \right) = a \cos(2 h_{M1}^*),$$

$$h_{M1}^* = \frac{h_{M1}}{D} = \frac{h_2 - d/2}{D} = \frac{h_2}{D} - \frac{1}{2} \frac{d}{D} = h_2^* - \frac{2}{\beta}$$

Où $\beta = \frac{D}{d}$ est le rapport d'élargissement.

Par suite :

$$y_{M1} = \frac{A_M y_M - A_{M2} y_{M2}}{A_{M1}} = \frac{\frac{\pi D^2}{8} \cdot \frac{2D}{3\pi} - \frac{D^2}{4} (\alpha_2 - \sin\alpha_2 \cos\alpha_2) \cdot \frac{D \sin\alpha_2 (1 - \cos\alpha_2^2)}{3(\alpha_2 - \sin\alpha_2 \cos\alpha_2)}}{\frac{D^2}{4} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 + \sin\alpha_2 \cos\alpha_2 \right)}$$

$$y_{M1} = \frac{D(1 - \sin\alpha_2(1 - \cos\alpha_2^2))}{3 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 + \sin\alpha_2 \cos\alpha_2 \right)}$$

La profondeur du centre de gravité est :

$$\bar{h}_{M1} = h_{M1} - y_{M1}$$

$$\bar{h}_{M1}^* = \frac{\bar{h}_{M1}}{D} = \frac{h_{M1} - y_{M1}}{D} = \frac{h_{M1}}{D} - \frac{(1 - \sin\alpha_2(1 - \cos\alpha_2^2))}{3 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 + \sin\alpha_2 \cos\alpha_2 \right)}$$

$$= \frac{h_{M1}}{D} - \frac{(1 - \sin\alpha_2^3)}{3 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 + \sin\alpha_2 \cos\alpha_2 \right)}$$

$$\bar{h}_{M1}^* = \frac{1}{2} \cos\alpha_2 - \frac{(1 - \sin\alpha_2^3)}{3 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 + \sin\alpha_2 \cos\alpha_2 \right)} \quad (\text{II.6})$$

Notons que $h_{M1} = h_2 - d/2$. Où h_2 est la deuxième hauteur conjuguée du ressaut.

Sur le tableau (II.2) sont dressées quelques valeurs de A_{M1}^* et \bar{h}_{M1}^* en fonction de h_{M1}^* , et implicitement en fonction de α_2 , calculées respectivement par les relations (II.5) et (II.6).

Tableau II.2 : Caractéristiques relatives de la section aval

| h_{M1}^* | α_2 | \bar{h}_{M1}^* | A_{M1}^* |
|------------|------------|------------------|------------|
| 0,01 | 1,5508 | 0,0050 | 0,0100 |
| 0,02 | 1,5308 | 0,0100 | 0,0200 |
| 0,10 | 1,3694 | 0,0502 | 0,0993 |
| 0,20 | 1,1593 | 0,1014 | 0,1945 |
| 0,30 | 0,9273 | 0,1552 | 0,2809 |
| 0,40 | 0,6435 | 0,2143 | 0,3518 |
| 0,50 | 0,0000 | 0,2878 | 0,3927 |

A partir des valeurs de ce tableau nous avons tracé la variation de A_{M1}^* en fonction de h_{M1}^* , représentée sur la figure (II.6), et la variation de \bar{h}_{M1}^* en fonction de h_{M1}^* , représentée sur la figure (II.7).

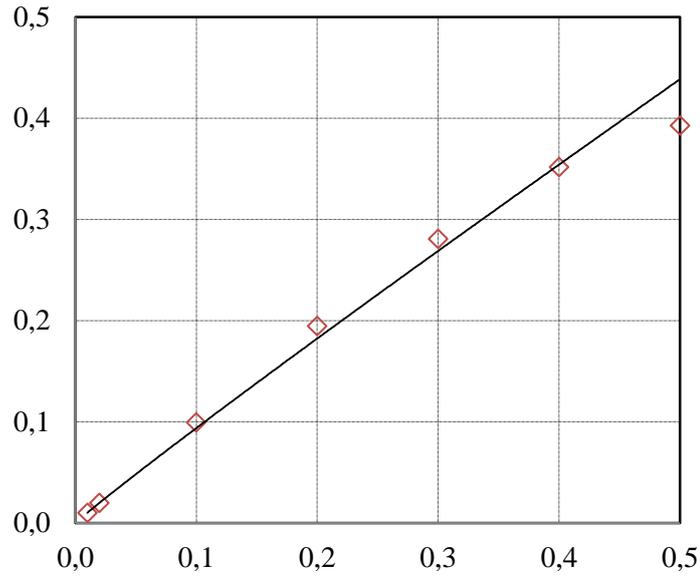


Figure II.6 : Variation de A_{M1}^* en fonction de h_{M1}^*

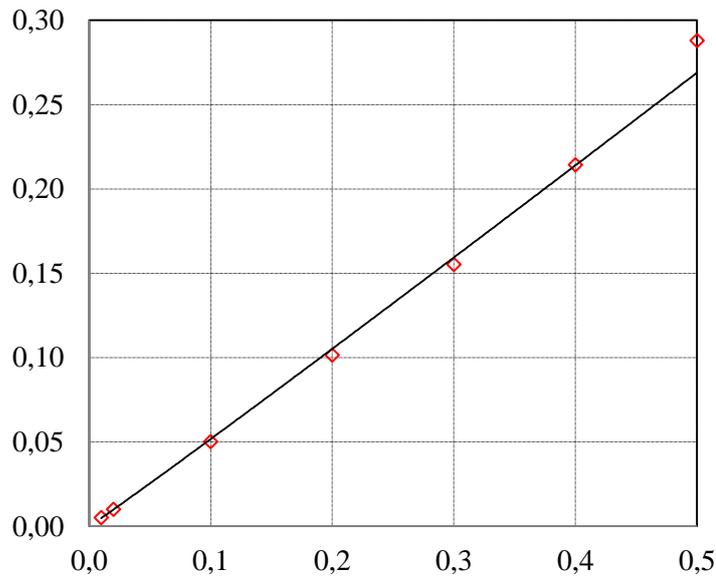


Figure II.7 : Variation de $\overline{h_{M1}}^*$ en fonction de h_{M1}^*

La corrélation par la méthode des moindres carrée a permis de proposer les deux relations approchées suivantes :

$$A_{M1}^* = 0,851(h_{M1}^*)^{0,9572} \quad (\text{II.7})$$

Avec un coefficient de corrélation $R = 0,9982$

$$\overline{h_{M1}}^* = 0,547(h_{M1}^*)^{1,0241} \quad (\text{II.8})$$

Avec un coefficient de corrélation $R = 0,9994$

I.5. Conclusion

Le canal circulaire avec banquettes est constitué d'un lit mineur de forme demi-circulaire surmonté d'un lit majeur de même forme mais de diamètre plus grand.

La profondeur du centre de gravité du pied du ressaut peut être aisément déterminée connaissant l'angle d'ouverture de la surface libre et le diamètre du lit mineur. La profondeur relative du centre de gravité ainsi que l'aire relative de cette section amont peuvent être déterminés directement, par les relations approchées de type puissance que nous avons proposé, en fonction de la profondeur relative amont. Une comparaison est effectuée avec la relation proposée par *Hager*(1987), pour le calcul de l'aire relative de la section, qui a donné un écart important par rapport aux valeurs exactes.

Pour la section composée de la fin du ressaut, nous avons également utilisé les moments statiques pour le calcul de la profondeur du centre de gravité de la partie de cette section situé dans le lit majeur. Des relations approchées de type puissance sont également proposées, avec un excellent coefficient de corrélation, pour le calcul de la profondeur relative du centre de gravité ainsi que de l'aire relative de cette partie de la section d'aval.

Connaissant la position du centre de gravité et l'aire d'un demi-cercle (représentant le lit mineur), l'application de l'équation de la quantité de mouvement peut être aisément effectuée sans connaître la position du centre de gravité ni l'aire de la section d'aval.

Chapitre II. Equation de la quantité de mouvement (Théorème d'Euler)

II.1. Introduction

Nous avons entamé ce chapitre par la présentation détaillée du théorème d'Euler, appelé également « équation de la quantité de mouvement », appliqué aux solides et aux liquides.

Le théorème est ensuite appliqué, sous quelques hypothèses simplificatrices, au ressaut hydraulique se produisant dans un canal composé de forme circulaire avec banquettes qui sont :

- Distribution uniforme des vitesses au pied et à la fin du ressaut,
- Distribution hydrostatiques des pressions au pied et la fin du ressaut,
- Négligence de la résistance de l'air avec la surface libre,
- Négligence des forces de frottement avec le fond et les parois du canal.

Pour les canaux composés, qui est notre cas, une autre hypothèse simplificatrice est considérée, il s'agit de la négligence de l'interaction entre le lit mineur et le lit majeur. Cette interaction est due au transfert de masse et de la quantité de mouvement au niveau de l'interface entre ces deux lits créant ainsi une turbulence, source de dissipation supplémentaire d'énergie.

L'équation résultante est ensuite représentée sur plusieurs graphiques pour montrer l'influence de chaque variable sur l'autre. L'objectif également de cette représentation graphique est de connaître les valeurs limites du débit relatif ainsi que du rapport d'expansion en fonction des valeurs pratiques du nombre de Froude de l'écoulement incident.

II.2. Présentation du théorème

En hydraulique trois principes de conservation sont appliqués. Le principe de la conservation de l'énergie défini par l'équation de Bernoulli, le principe de conservation de la masse défini par l'équation de continuité ainsi que le principe de conservation de la quantité de mouvement défini par le théorème d'Euler que nous appliquerons ici pour un ressaut hydraulique dans un canal circulaire avec banquettes.

Ce principe peut être développé pour une particule fluide en mouvement pour arriver aux équations générales de mouvement. Il peut aussi être développé pour un volume de contrôle dans un souci de déterminer les forces agissant par le fluide sur les parois ou inversement.

- **Cas d'un solide**

En physique, la quantité de mouvement P est la grandeur physique associée à la vitesse v et à la masse m d'un objet :

$$\vec{P} = m\vec{v} \quad (\text{II.9})$$

S'il y a plusieurs objets, on écrit :

$$\vec{P} = \sum m_i \vec{v}_i \quad (\text{II.10})$$

Le principe fondamental de la dynamique stipule que la dérivée par rapport au temps de la quantité de mouvement (la variation de la quantité de mouvement du système par rapport au temps) est égale à la somme des forces sur le système :

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum \vec{F}_{ext} \quad (\text{II.11})$$

En tenant compte de (II.9), l'équation (II.11) s'écrit :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}_{ext} \quad (\text{II.12})$$

Ou bien tout simplement :

$$m\vec{\gamma} = \sum \vec{F}_{ext} \quad (\text{II.13})$$

- **Cas d'un fluide**

Pour un volume V d'un fluide délimité par une section S , la quantité de mouvement s'écrit :

$$\vec{P} = \int_V \rho \vec{v} dV \quad (\text{II.14})$$

Où : ρ est la densité du fluide ; dV est le volume élémentaire ; $\rho dV = dm$ est la masse élémentaire ; \vec{v} est le vecteur vitesse instantané.

Le principe fondamental de la dynamique nous permet d'écrire :

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{v} dV = \sum \vec{F}_{ext} = \vec{F}_V + \vec{F}_S \quad (\text{II.15})$$

Où : \vec{F}_V et \vec{F}_S sont respectivement les forces de volume et les forces de surface.

En utilisant la relation entre la dérivée particulière et la dérivée locale d'une intégrale de volume, nous obtenons :

$$\int_V \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} dV + \int_S \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \vec{F}_V + \vec{F}_S \quad (\text{II.16})$$

L'équation (II.16) est l'expression du théorème d'Euler appliqué aux fluides.

Ce théorème s'applique en général en considérant les projections des vecteurs (forces et quantité de mouvement) sur les axes ou en prenant les moments de ces vecteurs par rapport à un point, ou une droite, appelé le moment cinétique, comme pour les turbomachines.

Pour un écoulement quasi stationnaire et unidimensionnel, les forces extérieures s'écrivent :

$\vec{F}_V = \int_V \rho \vec{F} dV$ est le poids du fluide. \vec{F} est la force de volume par unité de masse.

$\vec{F}_S = \int_S \vec{\sigma} dS$ est la résultante des force superficielles. $\vec{\sigma}$ est la force superficielle par unité de surface.

Puisque l'écoulement est quasi-stationnaire, $\int_V \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} dV = 0$.

Le théorème d'Euler pour un tube de courant se résume donc :

$$\int_S \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \vec{F}_V + \vec{F}_S \quad (\text{II.17})$$

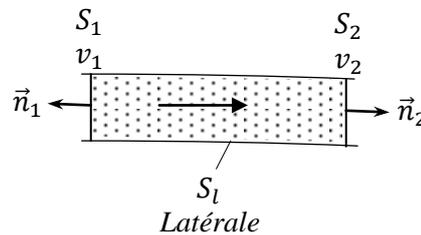


Figure II.8 : Volume de contrôle pour un tube de courant

En subdivisant la section en S_1 , S_2 et S_l , l'équation (II.17) appliquée pour un fluide incompressible ($\rho = \text{constante}$) se résume en :

$$\int_S \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{S_1} \rho \vec{v}_1(\vec{v}_1 \cdot \vec{n}_1) dS + \int_{S_2} \rho \vec{v}_2(\vec{v}_2 \cdot \vec{n}_2) dS + \int_{S_l} \rho \vec{v}_l(\vec{v}_l \cdot \vec{n}_l) dS \quad (\text{II.18})$$

Or : $\vec{v}_1 \cdot \vec{n}_1 = -v_1$, $\vec{v}_2 \cdot \vec{n}_2 = v_2$ et $\vec{v}_l \cdot \vec{n}_l = 0$. L'équation (II.18) devient :

$$\int_S \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{S_2} \rho \vec{v}_2 v_2 dS - \int_{S_1} \rho \vec{v}_1 v_1 dS \quad (\text{II.19})$$

Où : $\rho v ds = dQ$ est le débit élémentaire.

L'intégrale sur toute la section nous donne le débit Q de l'écoulement. La forme intégrale de l'équation (II.19) peut être simplifiée en prenant les vitesses moyennes, U_1 et U_2 , et en corrige les quantités de mouvement par les coefficients de *Boussinesq*, β_1 et β_2 .

En tenant compte de l'équation (II.17) l'équation de la quantité de mouvement s'écrit en définitive :

$$\rho Q(\beta_2 \vec{U}_2 - \beta_1 \vec{U}_1) = \vec{F}_V + \vec{F}_S \quad (\text{II.20})$$

Où \vec{F}_V et \vec{F}_S sont respectivement les forces de volume et les forces de surface. L'équation (II.20) est la forme définitive de l'équation de la quantité de mouvement appliquée à un tube de courant. Les forces de volume, \vec{F}_V , se résume à la force de pesanteur. L'effet de cette force sur le ressaut ne se manifeste que si le fond du canal est de pente non nulle.

II.3. Application du théorème au ressaut hydraulique dans le canal circulaire avec banquettes

Le canal étudié étant horizontal, l'effet des forces de volume (pesanteur) est nul. En négligeant les forces de frottement de l'écoulement avec le fond et les parois du canal composé, la résistance de l'air avec la surface libre ainsi que les pertes au niveau de l'interface entre le lit mineur et le lit majeur, les forces extérieures se réduisent aux seules forces de pression F_1 et F_2 , respectivement, au pied et à la fin du ressaut. L'équation (II.20) se résume alors en :

$$\rho Q(\beta_2 U_2 - \beta_1 U_1) = F_1 - F_2 \quad (\text{II.21})$$

A cause de la forme composée du canal, la distribution des vitesses dans une section transversale n'est jamais uniforme. Le non connaissance de la distribution des vitesses dans les sections transversales amont et aval du ressaut nous oblige pour ce développement théorique à prendre comme hypothèse une distribution uniforme dans les deux sections. Pour l'écoulement torrentiel de l'amont, l'hypothèse de l'uniformité de la vitesse est justifiée par le fait que les coefficients de *Boussinesq* se rapprochent de l'unité pour les grandes valeurs du nombre de Reynolds, tandis qu'à la fin du ressaut, cette hypothèse induit une erreur, accentuée par la forme composée du canal.

Avec $\beta_1 = \beta_2 = 1$, l'équation (II.21) se simplifie en :

$$\rho Q(U_2 - U_1) = F_1 - F_2 \quad (\text{II.22})$$

En tenant compte de l'équation de continuité, $U_1 A_1 = U_2 A_2 = Q$, l'équation (II.22) devient :

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = F_1 - F_2 \quad (\text{II.23})$$

En prenant également comme hypothèse une distribution hydrostatique des pressions, celles-ci peuvent être déterminées tout simplement comme le produit de la pression au centre de gravité de la section transversale par l'aire de celle-ci. Par suite, les forces de pression F_1 et F_2 , au pied et à la fin du ressaut, s'expriment par :

$$F_1 = \bar{P}_1 A_1 = \varpi \bar{h}_1 A_1 \quad (\text{II.24})$$

$$F_2 = \bar{P}_2 A_2 = \varpi \bar{h}_2 A_2 = \varpi (\bar{h}_m A_m + \bar{h}_{M1} A_{M1}) \quad (\text{II.25})$$

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = \varpi \bar{h}_1 A_1 - \varpi (\bar{h}_m A_m + \bar{h}_{M1} A_{M1}) \quad (\text{II.26})$$

Rapportons les caractéristiques du lit mineur à son diamètre d et les caractéristiques du lit majeur à son diamètre D . Les caractéristiques relatives sont désignées par l'astérisque « * ». Par suite :

$$A_2 = D^2 A_2^* = D^2 \left(\frac{A_m^*}{\beta^2} + A_{M1}^* \right) = d^2 (A_m^* + \beta^2 A_{M1}^*)$$

$\beta = \frac{D}{d}$ est le rapport d'expansion.

$$A_1 = d^2 A_1^*$$

$$\bar{h}_1 A_1 = d^3 \bar{h}_1^* A_1^*$$

$$\bar{h}_m A_m = d^3 \bar{h}_m^* A_m^*$$

$$\bar{h}_{M1} A_{M1} = D^3 \bar{h}_{M1}^* A_{M1}^*$$

En tenant compte de ces relations, l'équation (II.26) devient :

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{d^2 (A_m^* + \beta^2 A_{M1}^*)} - \frac{1}{d^2 A_1^*} \right) = \varpi d^3 \bar{h}_1^* A_1^* - \varpi \left(d^3 \bar{h}_m^* A_m^* + D^3 \bar{h}_{M1}^* A_{M1}^* \right) \quad (\text{II.27})$$

$$\frac{Q^2}{g d^5} \left(\frac{1}{(A_m^* + \beta^2 A_{M1}^*)} - \frac{1}{A_1^*} \right) = \bar{h}_1^* A_1^* - \left(\bar{h}_m^* A_m^* + \beta^3 \bar{h}_{M1}^* A_{M1}^* \right) \quad (\text{II.28})$$

$$\text{Où } \bar{h}_m^* = \frac{\frac{2d}{3\pi} + h_{M1}}{d} = \frac{2}{3\pi} + \beta h_{M1}^*$$

Injectons cette expression dans l'équation (II.28)

$$\frac{Q^2}{g d^5} \left(\frac{1}{(A_m^* + \beta^2 A_{M1}^*)} - \frac{1}{A_1^*} \right) = \bar{h}_1^* A_1^* - \left(\left(\frac{2}{3\pi} + \beta h_{M1}^* \right) A_m^* + \beta^3 \bar{h}_{M1}^* A_{M1}^* \right) \quad (\text{II.29})$$

Par analogie à l'étude menée par Achour(2000), posons $Q_d^* = \left(\frac{Q^2}{g d^5} \right)^{1/2}$ défini comme le débit relatif rapporté au diamètre d .

$$Q^{*2} \left(\frac{1}{(A_m^* + \beta^2 A_{M1}^*)} - \frac{1}{A_1^*} \right) = \bar{h}_1^* A_1^* - \left(\left(\frac{2}{3\pi} + \beta h_{M1}^* \right) A_m^* + \beta^3 \bar{h}_{M1}^* A_{M1}^* \right) \quad (\text{II.30})$$

$$Q^{*2} \left(\left[\frac{\pi}{8} + \frac{\beta^2}{4} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 + \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \right) \right]^{-1} - \left[\frac{1}{4} (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) \right]^{-1} \right) =$$

$$\frac{[3 \sin \alpha_1 - 3 \alpha_1 \cos \alpha_1 - \sin \alpha_1^3]}{6 (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1)} \frac{1}{4} (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) - \left(\left(\frac{2}{3\pi} + \beta h_{M1}^* \right) \frac{\pi}{8} + \beta^3 \left(h_{M1}^* - \right. \right.$$

$$\left. \left. \frac{(1 - \sin \alpha_2^3)}{3 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 + \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \right)} \right) \frac{1}{4} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 + \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \right) \right)$$

(II.31)

$$Q^{*2} \left(\left[\frac{\pi}{8} + \frac{\beta^2}{4} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 + \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \right) \right]^{-1} - \left[\frac{1}{4} (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) \right]^{-1} \right) =$$

$$\frac{[3 \sin \alpha_1 - 3 \alpha_1 \cos \alpha_1 - \sin \alpha_1^3]}{24} - \left(\frac{\pi}{8} \left(\frac{2}{3\pi} + \beta h_{M1}^* \right) + \beta^3 \left(\frac{1}{4} h_{M1}^* \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 + \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \right) - \right. \right.$$

$$\left. \left. \frac{(1 - \sin \alpha_2^3)}{12} \right) \right) \quad (\text{II.32})$$

Les angles α_1 et α_2 peuvent être exprimés en fonction respectivement de h_1^* et h_{M1}^* (ou bien h_2^* et β) comme montrer ci-dessous.

$$\alpha_1 = \text{acos} \left(\frac{\frac{d}{2} - h_1}{\frac{d}{2}} \right) = \text{acos} \left(1 - 2 \frac{h_1}{d} \right) = \text{acos}(1 - 2h_1^*)$$

Donc :

$$\cos \alpha_1 = 1 - 2h_1^*$$

$$\sin \alpha_1 = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_1} = \sqrt{1 - (1 - 2h_1^*)^2} = 2\sqrt{h_1^* - h_1^{*2}}$$

$$\alpha_2 = \text{acos} \left(\frac{h_2 - d/2}{D/2} \right) = \text{acos} \left[\left(2h_2^* - \frac{1}{\beta} \right) \right] = \text{acos} \left(\frac{h_{M1}}{D/2} \right) = \text{acos}(2h_{M1}^*)$$

Donc :

$$\cos \alpha_2 = 2h_2^* - \frac{1}{\beta} = 2h_{M1}^*$$

$$\sin \alpha_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_2} = \sqrt{1 - 4h_{M1}^{*2}} = \sqrt{1 - \left(2h_2^* - \frac{1}{\beta} \right)^2}$$

$$h_2^* = \frac{d + h_{M1}}{D} = h_{M1}^* + \frac{1}{2\beta}$$

Le nombre de *Froude* au pied du ressaut est :

$$F_1 = \left(\frac{Q^2 (\partial A_1 / \partial h)}{g A_1^3} \right)^{1/2}$$

$$F_1 = \left(\frac{Q^2 (d \sin \alpha_1)}{g \left(\frac{d^2}{4} (\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) \right)^3} \right)^{1/2} = \left(\frac{Q^2}{g d^5} \right)^{1/2} \left(\frac{64 \sin \alpha_1}{(\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1)^3} \right)^{1/2} \quad (\text{II.33})$$

En injectant le débit relatif rapporté au diamètre d , $Q_d^* = \left(\frac{Q^2}{g d^5} \right)^{1/2}$, le nombre de *Froude* au pied du ressaut s'écrit en définitive en fonction de Q_d^* et h_1^* comme suit:

$$F_1 = Q_d^* \left(\frac{128 \sqrt{h_1^{*2} - h_1^*}}{\left(\cos(1-2h_1^*) - 2(1-2h_1^*) \sqrt{h_1^{*2} - h_1^*} \right)^3} \right)^{1/2} \quad (\text{II.34})$$

Notons que l'équation (II.30) peut être réécrite en tenant compte des relations approchées (II.2), (II.3), (II.7) et (II.8):

$$Q_d^{*2} \left(\frac{1}{\left(\frac{\pi}{8} + \beta^2 [0,851 (h_{M1}^*)^{0,9572}] \right)} - \frac{1}{1,1334 (h_1^*)^{1,46}} \right)$$

$$= [0,421 (h_1^*)^{1,0127}] [1,1334 (h_1^*)^{1,46}]$$

$$- \left(\left[\frac{2}{3\pi} + \beta h_{M1}^* \right] \frac{\pi}{8} + \beta^3 [0,547 (h_{M1}^*)^{1,0241}] [0,851 (h_{M1}^*)^{0,9572}] \right)$$

$$Q_d^{*2} \left(\frac{1}{\left(\frac{\pi}{8} + \beta^2 [0,851 (h_{M1}^*)^{0,9572}] \right)} - \frac{1}{1,1334 (h_1^*)^{1,46}} \right)$$

$$= 0,477161 (h_1^*)^{2,4727} - \left(\left[\frac{2}{3\pi} + \beta h_{M1}^* \right] \frac{\pi}{8} + 0,465497 \beta^3 (h_{M1}^*)^{1,9813} \right)$$

$$Q_d^{*2} = \frac{0,477161 (h_1^*)^{2,4727} - \left(\left[\frac{2}{3\pi} + \beta h_{M1}^* \right] \frac{\pi}{8} + 0,465497 \beta^3 (h_{M1}^*)^{1,9813} \right)}{\left[\frac{\pi}{8} + \beta^2 (0,851 (h_{M1}^*)^{0,9572}) \right]^{-1} - [1,1334 (h_1^*)^{1,46}]^{-1}} \quad (\text{II.35})$$

Cette équation, équivalente à l'équation (II.32), montre bien que l'équation résultante, par application de l'équation de la quantité de mouvement, est une relation fonctionnelle de forme : $\varphi(Q_d^*, h_1^*, h_{M1}^*, \beta) = 0$. Cette relation peut être réécrite également sous forme de $\psi(Q_d^*, h_1^*, h_2^*, \beta) = 0$ ou bien enfin sous forme de $\Gamma(F_1, h_1^*, h_2^*, \beta) = 0$.

II.4. Représentation graphique de l'équation résultante

Pour représenter graphiquement la relation fonctionnelle $(Q_d^*, h_1^*, h_{M1}^*, \beta) = 0$, définie par l'équation (II.32) ci-dessus, nous devons à chaque fois fixer deux paramètres et étudier la variation mutuelle des deux autres.

II.4.1. Variation de Q_d^* en fonction de F_1 pour différents h_1^*

La relation (II.34) montre bien que le rapport entre le nombre de Froude de l'écoulement incident, F_1 , et le débit relatif rapporté au diamètre du lit mineur, Q_d^* , ne dépend que de la première hauteur conjuguée relative du ressaut, h_1^* .

Cette relation est représentée sur la figure (II.9). Cette figure illustre bien cette relation et montre que le débit relatif augmente aussi bien avec le nombre de Froude qu'avec la profondeur relative initiale. A la valeur maximale du nombre de Froude, $F_1 = 10$, permettant d'avoir un ressaut stable, correspond une valeur du débit relatif maximale de $Q_d^* = 2,46 \approx 2,5$. Ces valeurs permettent de déterminer le débit maximal de l'écoulement, que la pompe doit débiter, en fonction de la première hauteur conjuguée du ressaut et du diamètre du lit mineur. Notons que la valeur maximale de la première hauteur conjuguée relative est de $h_1^* = 0,5$ correspondant à un lit mineur plein au pied du ressaut. Pour chaque valeur de h_1^* la figure (II.9) permet de déterminer le débit maximal et le débit relatif maximale correspondant au nombre de Froude maximal.

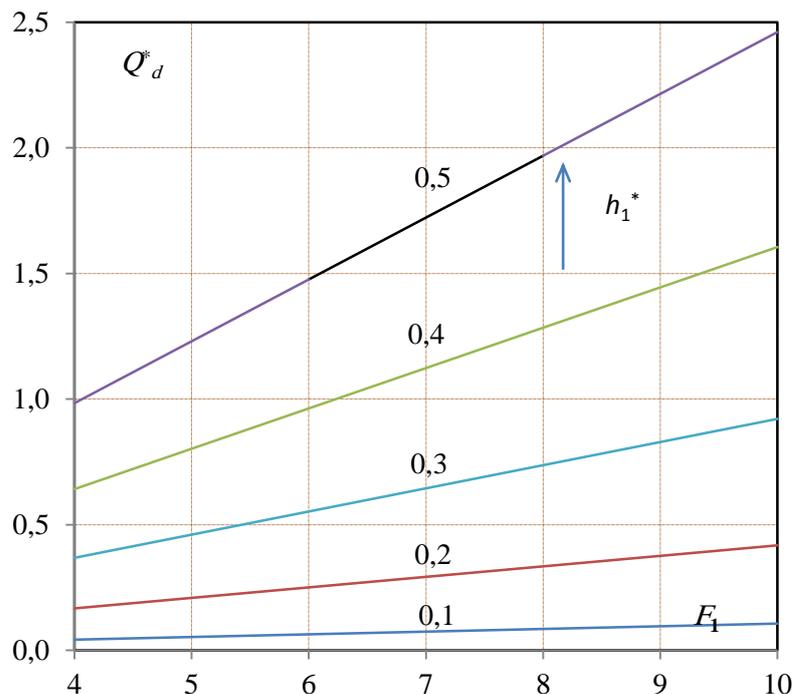
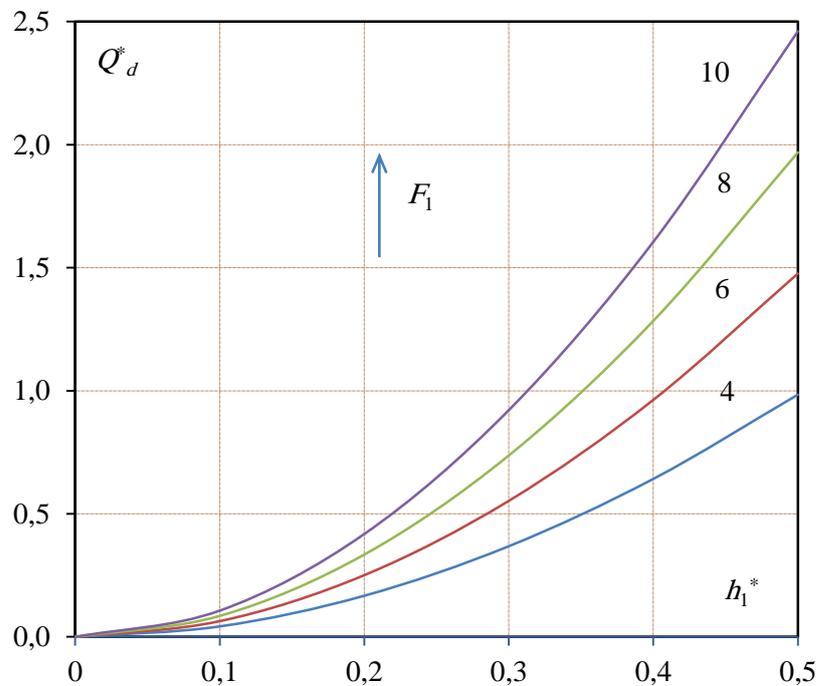


Figure II.9 : Variation de Q_d^* en fonction de F_1 pour différents h_1^* .**II.4.2. Variation de Q_d^* en fonction h_1^* pour différents F_1 .**

La variation du débit relatif rapporté au diamètre du lit mineur, Q_d^* , en fonction de la première hauteur conjuguée relative, h_1^* , pour quatre valeurs du nombre de Froude initial, F_1 , est illustrée sur la figure (II.10).

La figure montre que le débit relatif augmente d'une manière continue avec l'accroissement de la première hauteur conjuguée. Pour un h_1^* donnée, le débit relatif augmente avec l'augmentation du nombre de Froude. La figure permet de déterminer pour chaque valeur de h_1^* , limité à cinq valeurs comme dans la première figure, les valeurs de Q_d^* correspondant à quatre valeurs du nombre de Froude.

Figure II.10: Variation de Q_d^* en fonction h_1^* pour différents F_1 .**II.4.3. Variation de h_2^* en fonction de h_{M1}^* pour différents β**

Sur la figure (II.11) nous avons représenté la variation de la deuxième hauteur conjuguée relative du ressaut, h_2^* , en fonction de hauteur relative aval dans le lit majeur, h_{M1}^* , pour différentes valeurs du taux d'élargissement, β , allant de 1 à 5 avec un pas de 0,5. Les droites en lignes discontinues correspondent aux valeurs médianes de β entre deux valeurs naturelles.

La figure illustre bien que h_2^* croît avec l'accroissement de h_{M1}^* et la diminution de β . Cette figure permet de déterminer la hauteur des voûtes du lit majeur pour une valeur donnée du taux d'élargissement et une hauteur aval fixée.

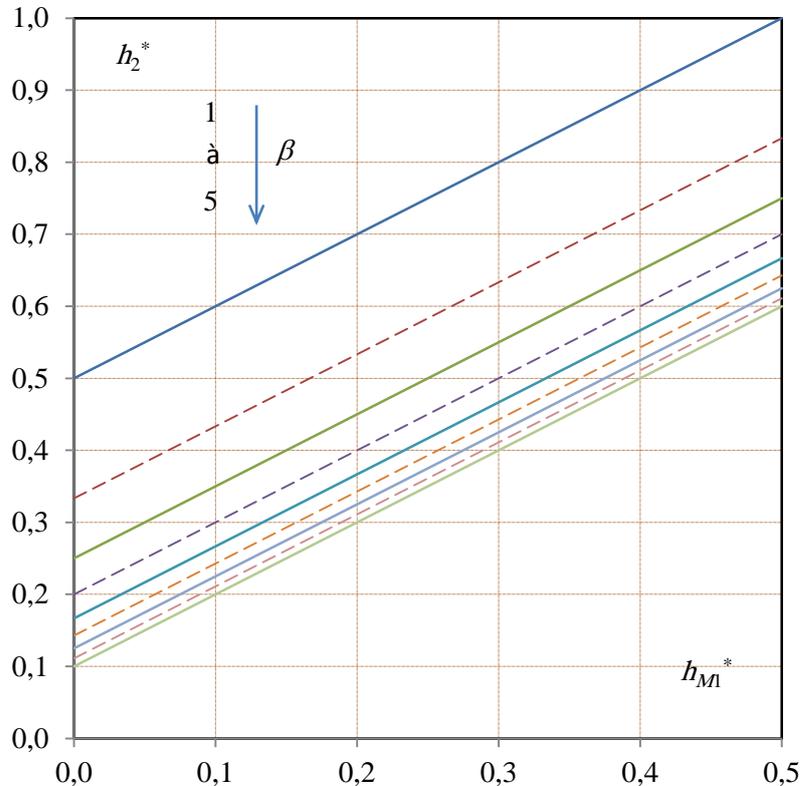


Figure II.11: Variation de h_2^* en fonction de h_{M1}^* pour différents β .

II.4.4. Variation de h_{M1}^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et un β fixé.

La variation de la hauteur relative aval dans le lit majeur, h_{M1}^* en fonction du débit relatif rapporté au diamètre du lit mineur, Q_d^* , pour des valeurs de la première hauteur relative, h_1^* , allant de 0,1 à 0,5, est illustré sur cinq graphiques, correspondant chacun à une valeur fixée du taux d'élargissement, β .

Ces figures montrent d'un côté que h_{M1}^* augmente avec l'augmentation aussi bien de Q_d^* et de h_1^* . En comparant les différentes figures entre elles, on remarque que pour le faisceau de courbes correspondant aux différentes valeurs de h_1^* est inclinée, quand β augmente, vers les grandes valeurs de Q_d^* . La valeur maximale du débit relatif, $Q_d^* = 2,48$ peut-être théoriquement atteinte pour $\beta = 5$ et $h_1^* = 0,5$. Pour ces valeurs correspond $h_{M1}^* = 0,5$, ce qui est pratiquement impossible vu la forme du canal,

l'écoulement doit être à surface libre. Ces figures peuvent servir pour le dimensionnement du bassin de dissipation de forme circulaire avec banquettes.

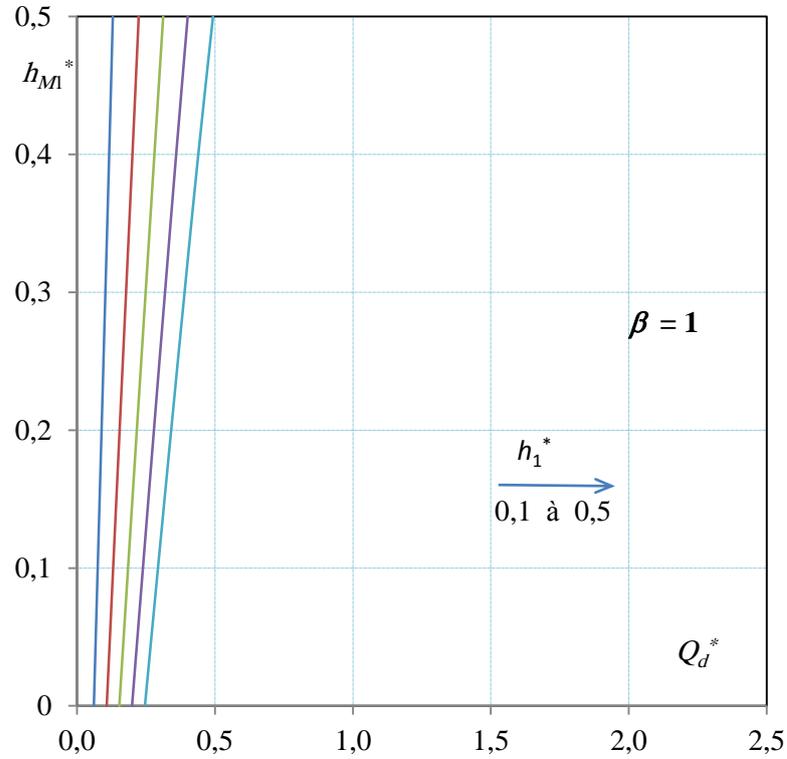


Figure II.12 : Variation de h_{M1}^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 1$.

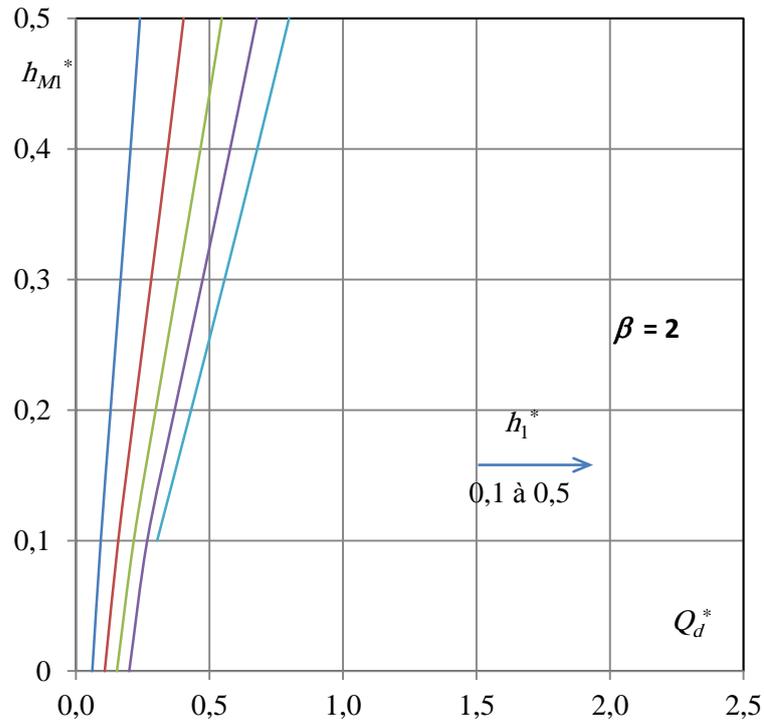


Figure II.13 : Variation de h_{M1}^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 2$.

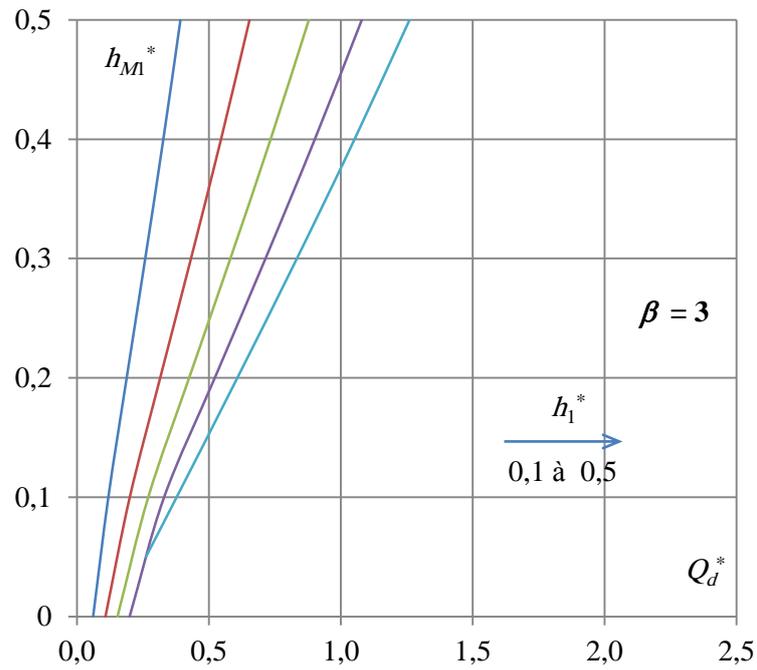


Figure II.14 : Variation de h_{M1}^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 3$.

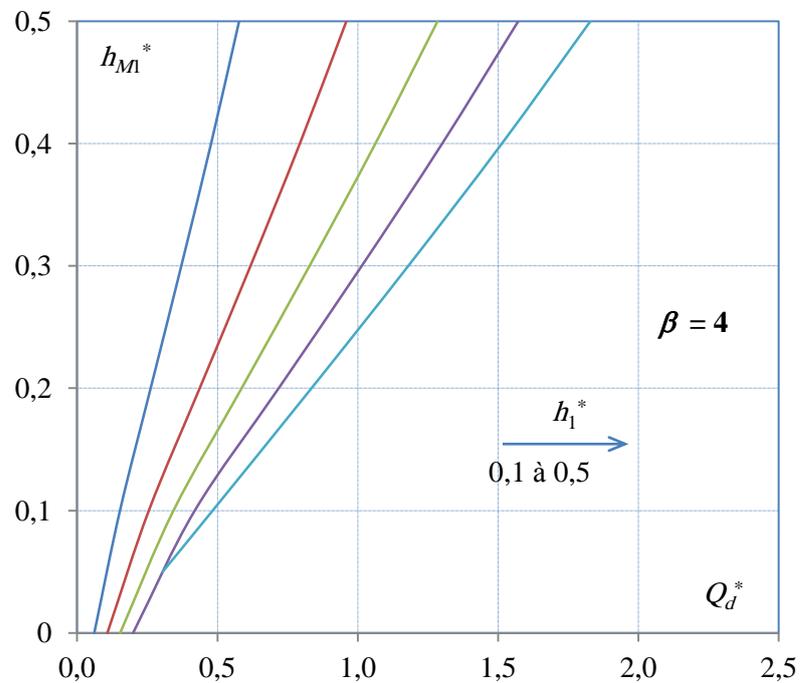


Figure II.15 : Variation de h_{M1}^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 4$.

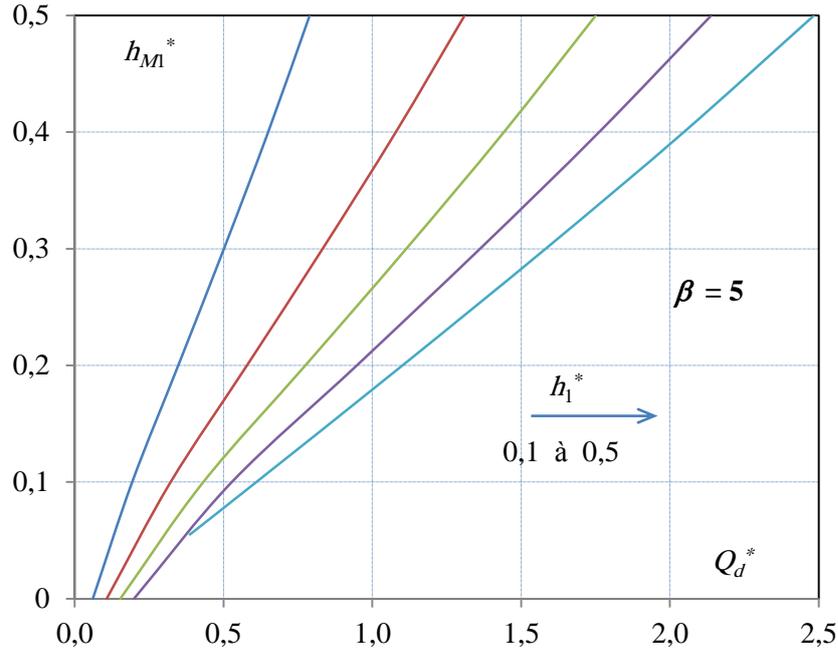


Figure II.16 : Variation de h_{M1}^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 5$.

II.4.5. Variation de h_{M1}^* en fonction de β pour différents F_1 et un h_1^* fixé

Sur la figure (II.17) nous avons représenté la variation de la hauteur relative aval dans le lit majeur, h_{M1}^* , en fonction du taux d'élargissement, β , pour quatre valeurs du nombre de Froude, F_1 , de l'écoulement incident, h_1^* étant fixée à 0,3.

Il est montré sur cette figure que h_{M1}^* croît avec l'accroissement aussi bien de β que de F_1 . Cette figure servirait pour un pré-dimensionnement du canal où se produit l'écoulement brusquement varié.

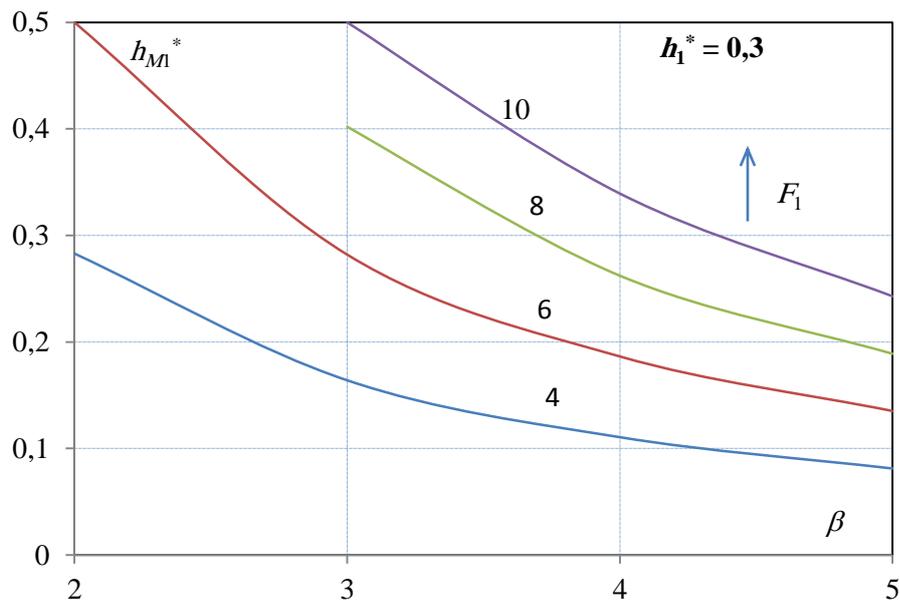


Figure II.17 : Variation de h_{M1}^* en fonction de β pour différents F_1 et un $h_1^* = 0,3$

II.4.6. Variation de h_2^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et un β fixé.

La variation de la deuxième hauteur conjuguée relative, h_2^* , en fonction du débit relatif, Q_d^* , pour cinq valeurs de h_1^* est représentée sur les figures, de (II.18) à (II.22). Chaque figure correspond à une valeurs de β .

Il est illustrer sur toutes ces figures que h_2^* croit avec l'accroissement de Q_d^* et de h_1^* . En comparant les figures, on peut conclure que h_2^* diminue avec β ; ceci à l'inverse du débit relatif qui augmente quant à lui. Toutes ces figures peuvent servir pour déterminer les grandeurs géométriques et hydrauliques de notre dissipateur.

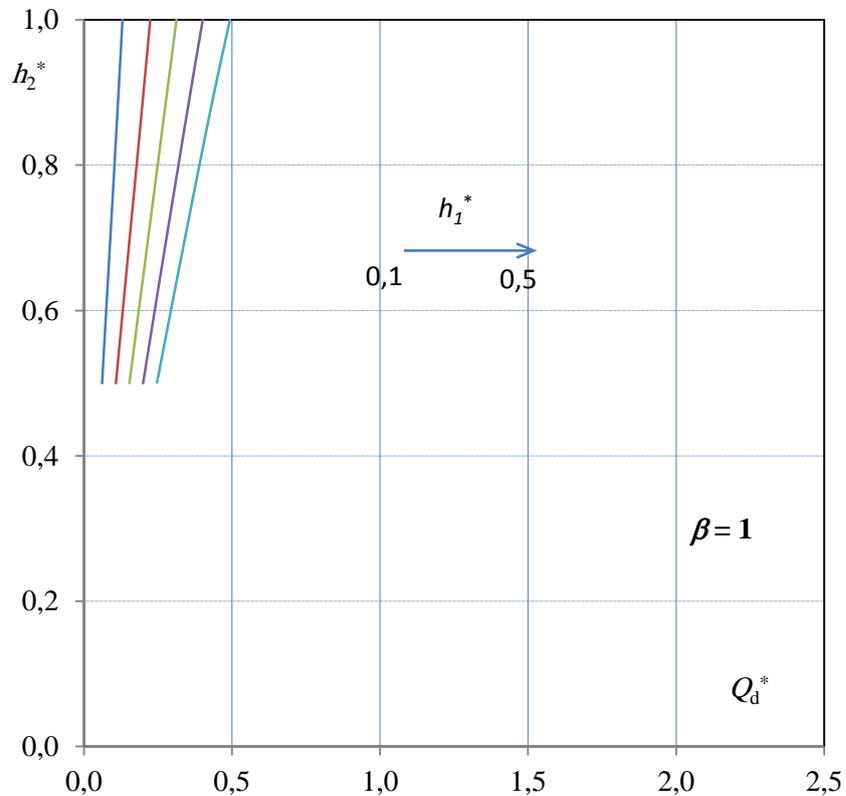


Figure II.18 : Variation de h_2^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 1$

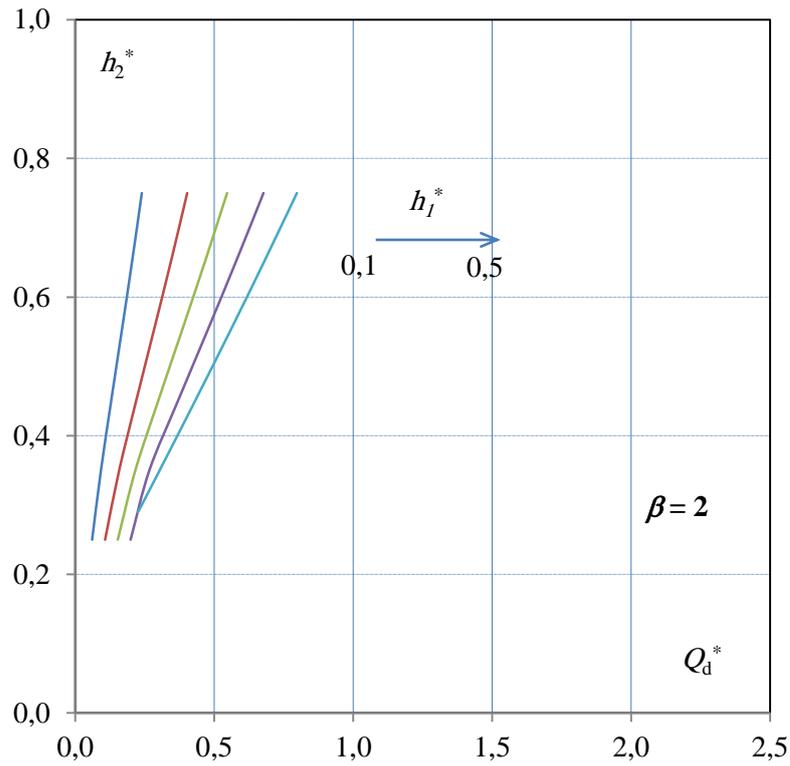


Figure II.19 : Variation de h_2^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 2$

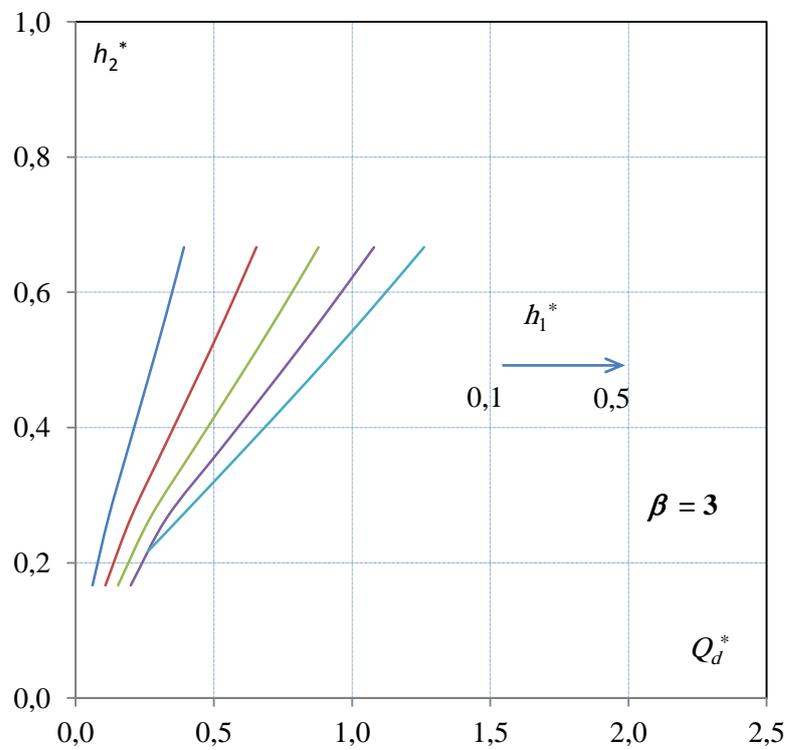


Figure II.20 : Variation de h_2^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 3$

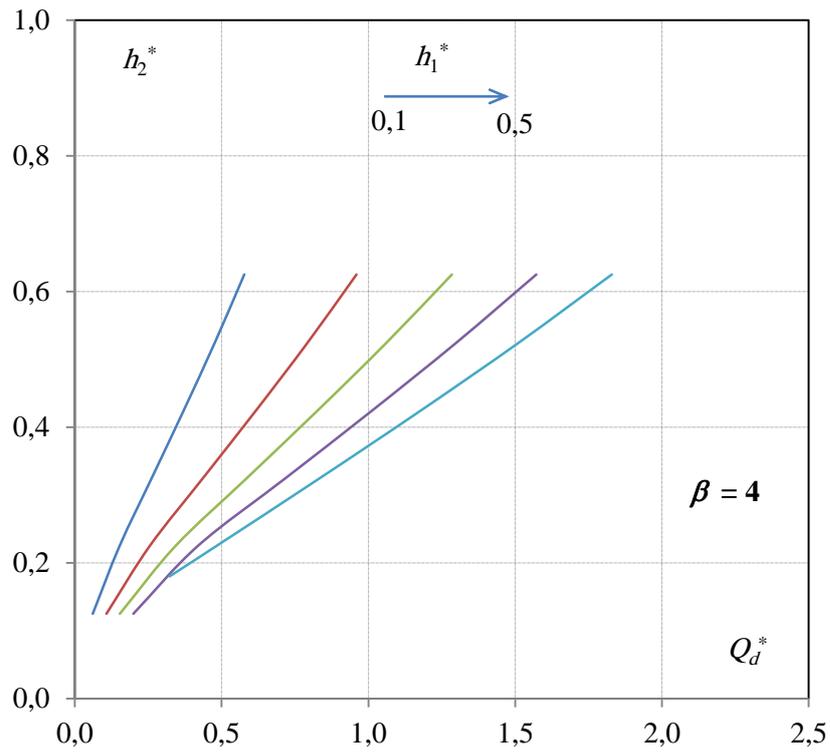


Figure II.21 : Variation de h_2^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 4$

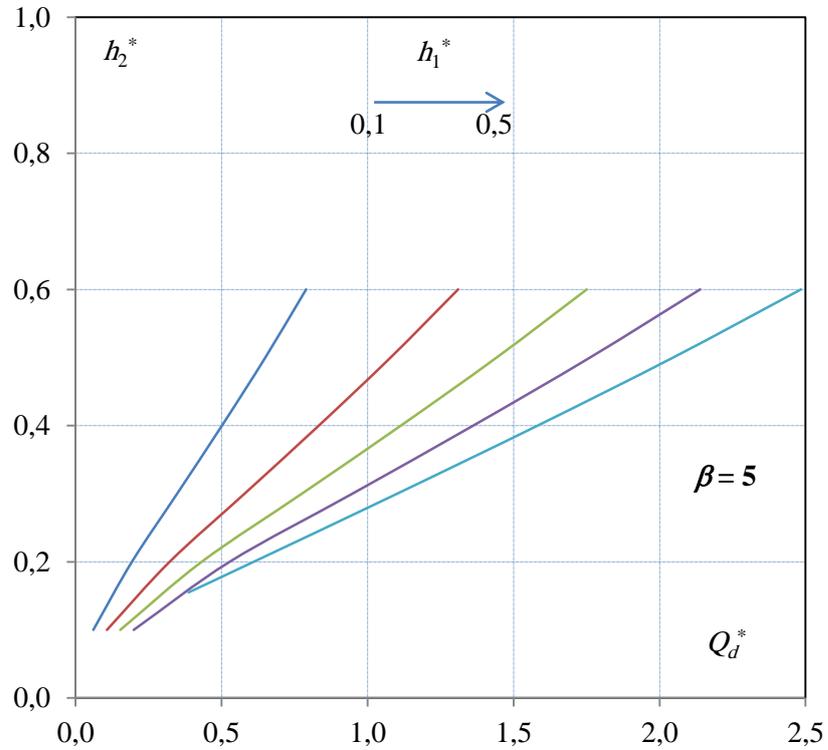


Figure II.22 : Variation de h_2^* en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 5$

II.4.7. Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et un h_{M1}^* fixé

Les figures (II.23) à (II.28) montre la variation de la hauteur relative initiale, h_1^* , en fonction du débit relatif rapporté au diamètre du lit mineur, Q_d^* , pour des valeurs de β allant de 1 à 5. Chacune de ces figures correspond à une valeur de la profondeur relative aval dans le lit majeur, h_{M1}^* .

La figure (II.23) correspond à $h_{M1}^* = 0$. Le ressaut se produit dans ce cas entièrement dans le lit mineur. Autrement dit, il s'agit pas d'un canal composé mais d'un canal simple qui a été suffisamment étudié auparavant par plusieurs chercheurs.

Toutes les autres figures montre que h_1^* augmente avec l'accroissement de Q_d^* et la diminution de β .

Pour $h_{M1}^* = 0,5$, la figure (II.28) montre que le $h_1^* = 0,5$ pour $Q_d^* = 2,48$. Ces valeurs ne sont que théorique, parce qu'en pratique ceci correspond à un écoulement dans le lit majeur limite. Le lit majeur ne peut jamais être plein vu la condition d'une surface qui doit être libre et d'une marge de sécurité fonction des fluctuations de cette surface libre principalement pour le ressaut hydraulique. Ces figures permettent néanmoins de déterminer les dimensions du futur canal à projeter.

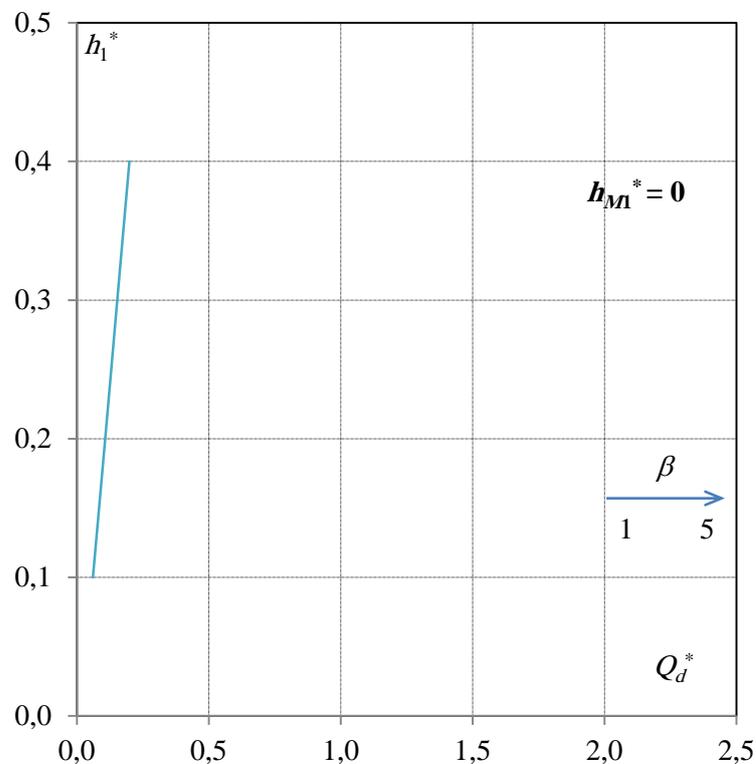


Figure II.23 : Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0$

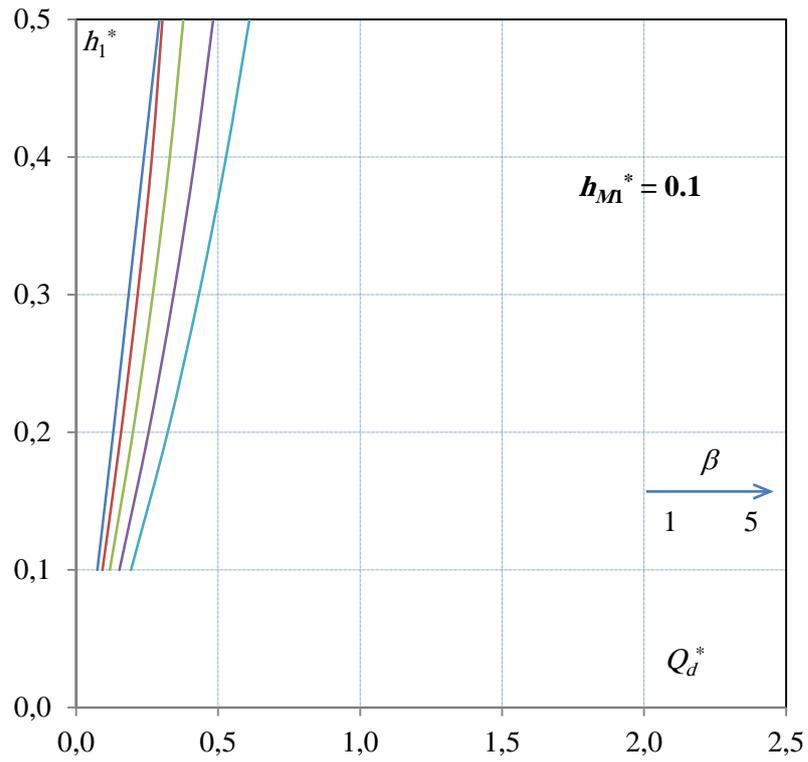


Figure II.24 : Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,1$

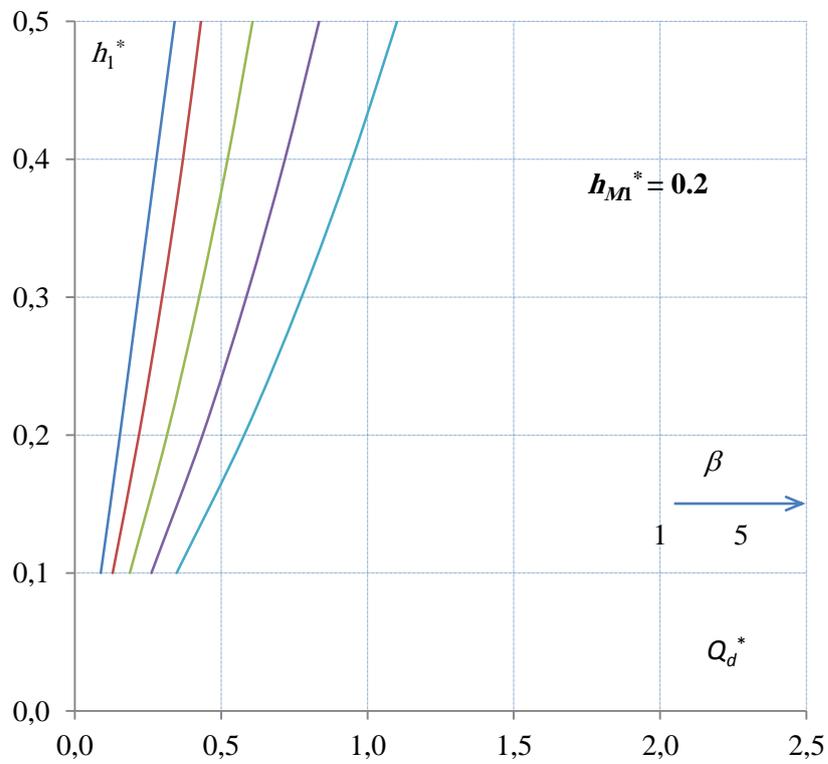


Figure II.25 : Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,2$

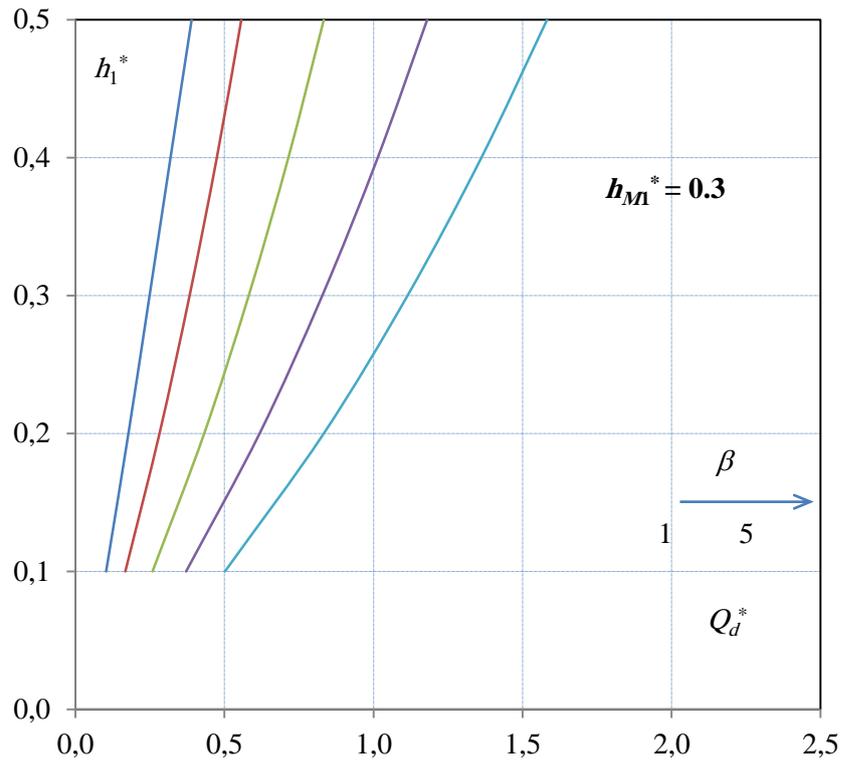


Figure II.26 : Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,3$

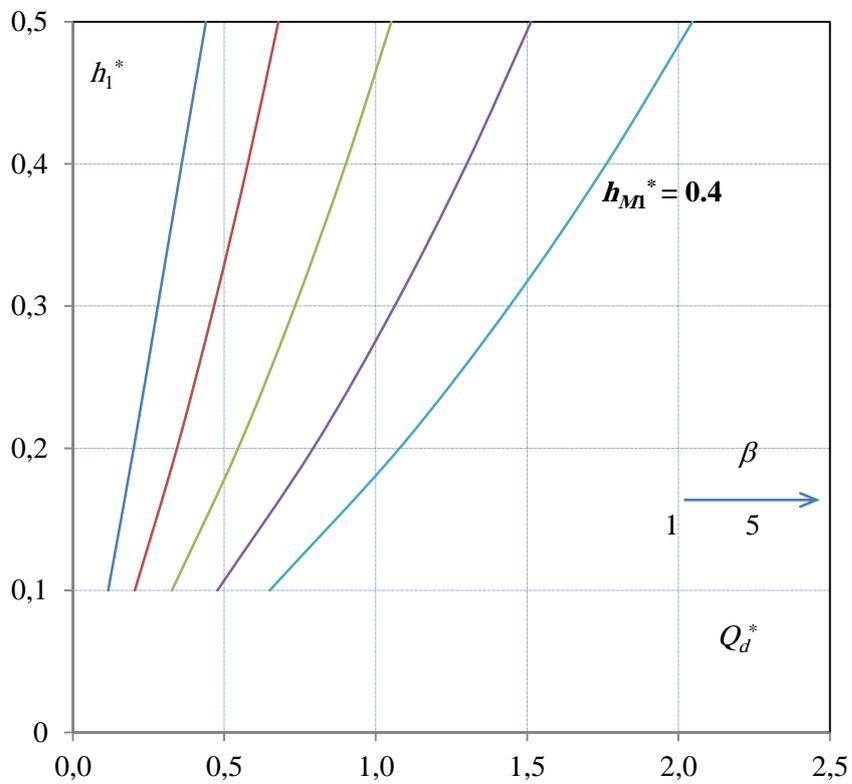


Figure II.27 : Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,4$

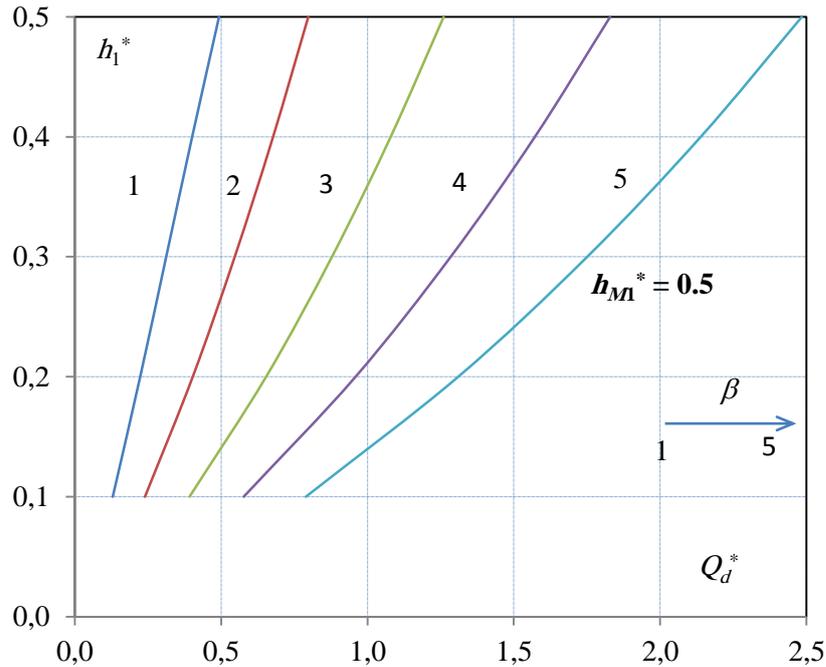


Figure II.28 : Variation de h_1^* en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,5$

II.5. Conclusion

L'application de l'équation de la quantité de mouvement (théorème d'Euler) au ressaut hydraulique se produisant dans un canal circulaire avec banquettes a abouti à une relation liant différentes variables géométriques et hydrauliques. L'équation est présentée en terme adimensionnels afin de lui donner un caractère de validité général.

L'introduction des relations approchées proposées dans le premier chapitre de cette partie a permis de montrer que cette équation résultante est une relation fonctionnelle de forme $\varphi(Q_d^*, h_1^*, h_{M1}^*, \beta) = 0$. Cette relation peut être réécrite également sous forme de $\psi(Q_d^*, h_1^*, h_2^*, \beta) = 0$ ou bien enfin sous forme de $\Gamma(F_1, h_1^*, h_2^*, \beta) = 0$.

La représentation graphique de ces relations fonctionnelles a permis d'illustrer l'effet de chaque variable adimensionnelle sur les autres. Elle a permis surtout de montrer que la valeur maximale du débit relatif rapporté au diamètre du lit mineur est de deux-et-demi, tandis que le taux d'élargissement, celui-ci ne doit pas dépasser une valeur maximale de cinq. Notons que ces valeurs limites correspondent aux valeurs pratiques, comprises entre quatre et dix, du nombre de Froude de l'écoulement incident, permettant d'avoir un ressaut stable dans un canal rectangulaire prismatique. L'expérience a montré que ces valeurs limites du nombre de Froude, permettant d'avoir un ressaut stable, ne varient pas beaucoup avec la forme du canal prismatique.

Chapitre III. Rendement du ressaut

III.1. Introduction

Un dissipateur n'est efficace que si son rendement est important (se rapproche de 1). Le rendement du ressaut est défini comme l'énergie dissipée rapportée à l'énergie totale au pied de celui-ci.

Nous avons déterminé dans ce chapitre la relation adimensionnelle donnant le rendement de ce dissipateur d'énergie. Cette relation est ensuite représentée sur un graphique.

III.2. Equation adimensionnelle du rendement

D'après la définition donnée dans l'introduction de ce chapitre, le rendement, η , s'écrit :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (\text{II.36})$$

Où :

H_1 : Énergie totale au pied du ressaut

H_2 : Énergie totale à la fin du ressaut.

En supposant une distribution uniforme pour les vitesses au pied et à la fin du ressaut, es énergies totales s'écrivent :

$$H_1 = h_1 + \frac{v_1^2}{2g}$$

$$H_2 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

L'équation de continuité permis d'écrire que : $v_1 = \frac{Q}{A_1}$ et $v_2 = \frac{Q}{A_2}$; par suite :

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \quad (\text{II.37})$$

$$H_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad (\text{II.38})$$

Injectons les équations (II.37) et (II.38) dans l'équation (II.36) :

$$\eta = 1 - \frac{H_2}{H_1} = 1 - \frac{h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}}{h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2}} \quad (\text{II.39})$$

Rappelons les caractéristiques relatives utilisées dans l'application de l'équation de la quantité de mouvement :

- La deuxième hauteur conjuguée du ressaut :

$$h_2 = h_m + h_{M1} = \frac{d}{2} + h_{M1}$$

- L'aire de la section aval du ressaut :

$$A_2 = D^2 A_2^* = D^2 \left(\frac{A_m^*}{\beta^2} + A_{M1}^* \right) = d^2 \left(\frac{\pi}{8} + \beta^2 A_{M1}^* \right)$$

- L'aire de la section amont du ressaut

$$A_1 = d^2 A_1^*$$

- Le rapport d'expansion :

$$\beta = \frac{D}{d}$$

- Le débit relatif rapporté au diamètre du lit mineur

$$Q_d^* = \left(\frac{Q^2}{gd^5} \right)^{1/2}$$

Développons l'équation (II.39) en tenant compte de toutes ces équations :

$$\eta = 1 - \frac{\frac{d}{2} + h_{M1} + \frac{Q^2}{2g[d^2(\pi/8 + \beta^2 A_{M1}^*)]^2}}{h_1 + \frac{Q^2}{2g(d^2 A_1^*)^2}}$$

$$\eta = 1 - \frac{\frac{1}{2} + \frac{h_{M1}}{d} + \frac{Q^2}{2gd^5(\pi/8 + \beta^2 A_{M1}^*)^2}}{\frac{h_1}{d} + \frac{Q^2}{2gd^5 A_1^{*2}}}$$

$$\eta = 1 - \frac{\frac{1}{2} + \beta h_{M1}^* + \frac{Q_d^{*2}}{2(\pi/8 + \beta^2 A_{M1}^*)^2}}{h_1^* + \frac{Q_d^{*2}}{2A_1^{*2}}} \quad \text{(II.40)}$$

C'est l'équation donnant le rendement du ressaut. Celle-ci peut être écrite en injectant les relations approchées proposées au premier chapitre de cette partie. L'équation devient :

$$\eta = 1 - \frac{\frac{1}{2} + \beta h_{M1}^* + \frac{Q_d^{*2}}{2[\pi/8 + \beta^2(0,851(h_{M1}^*)^{0,9572})]^2}}{h_1^* + \frac{Q_d^{*2}}{2(1,1334(h_1^*)^{1,46})^{*2}}}$$

$$\eta = 1 - \frac{\frac{1}{2} + \beta h_{M1}^* + \frac{Q_d^{*2}}{2(\pi/8 + 0,851 \beta^2 (h_{M1}^*)^{0,9572})^2}}{h_1^* + \frac{Q_d^{*2}}{2,5692 h_1^{*2,92}}} \quad (\text{II.41})$$

L'équation (II.41) montre bien que la relation fonctionnelle donnant le rendement est de forme $(\eta, Q_d^*, h_1^*, h_{M1}^*, \beta) = 0$.

III.3. Représentation graphique

Le rendement n'est pas une variable dans l'équation régissant le ressaut issue de l'équation de la quantité de mouvement, mais c'est un résultat dépendant de quatre variables comme mentionner ci-dessus.

III.3.1. Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et un β fixé.

La variation du rendement, η , en fonction du débit relatif, Q_d^* , pour cinq différentes valeurs de la hauteur relative initiale du ressaut, h_1^* , est représentée sur les figures (II.29) à (II.33). Chaque figure correspond à une valeur connue du taux d'élargissement β .

Ces figures montrent que les meilleurs dissipateurs correspondent aux plus faibles h_1^* , et aux plus grands β . Ces figures permettent de faire le choix des dimensions du canal et du ressaut servant de dissipateurs d'énergie comme à l'aval des évacuateurs de crues.

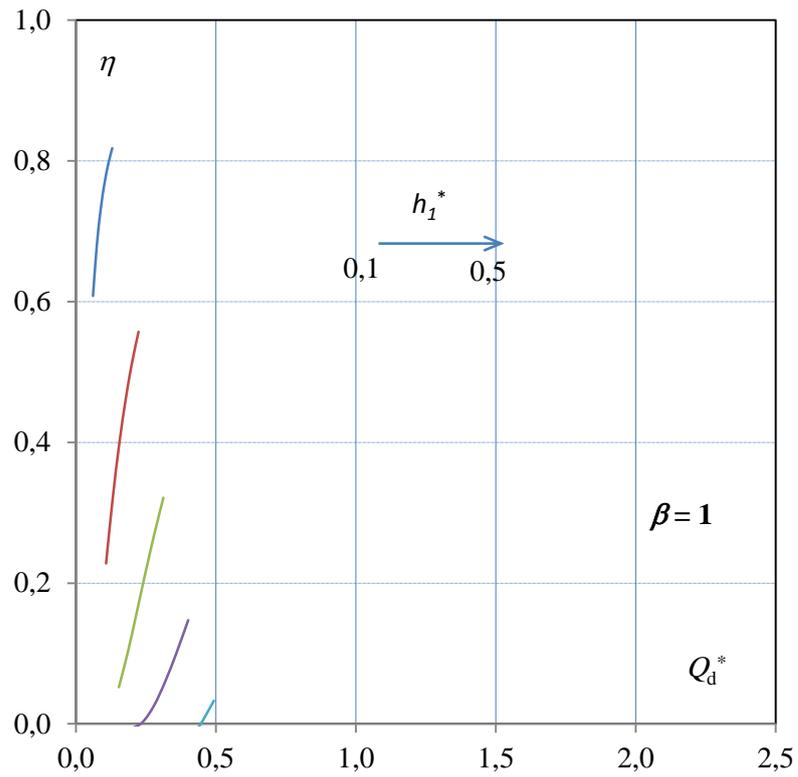


Figure II.29 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 1$

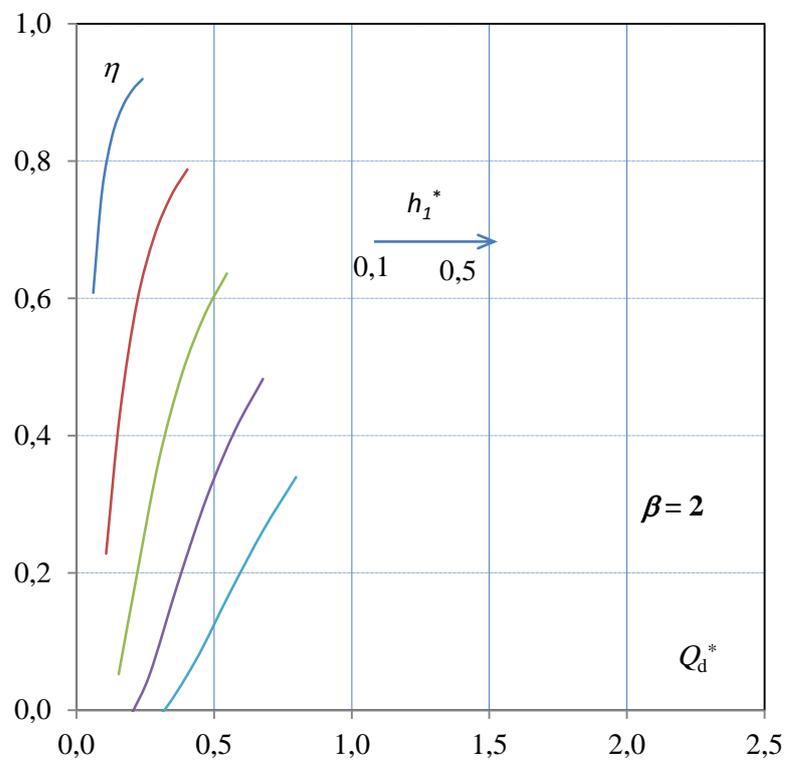


Figure II.30 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 2$

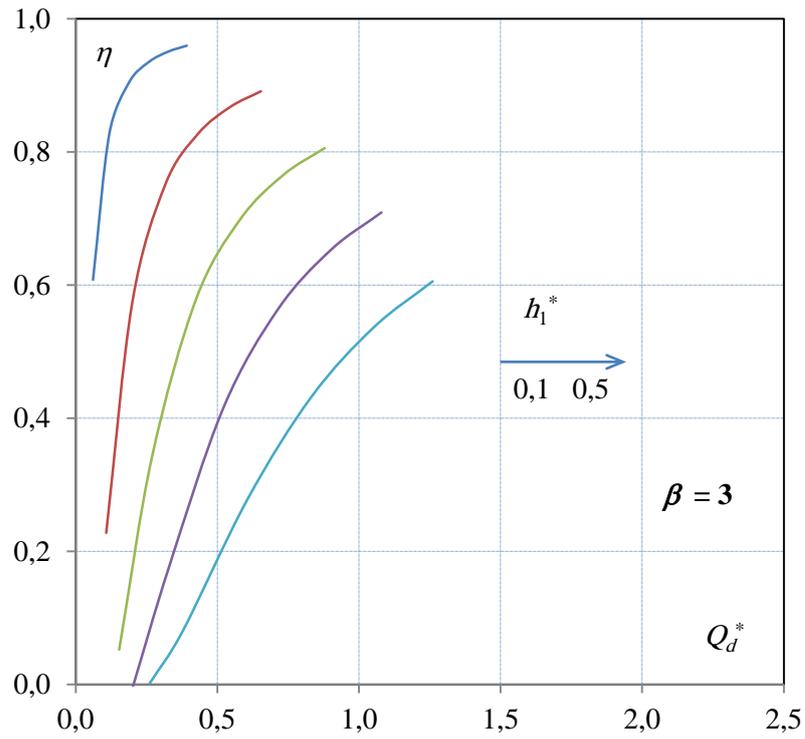


Figure II.31 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 3$

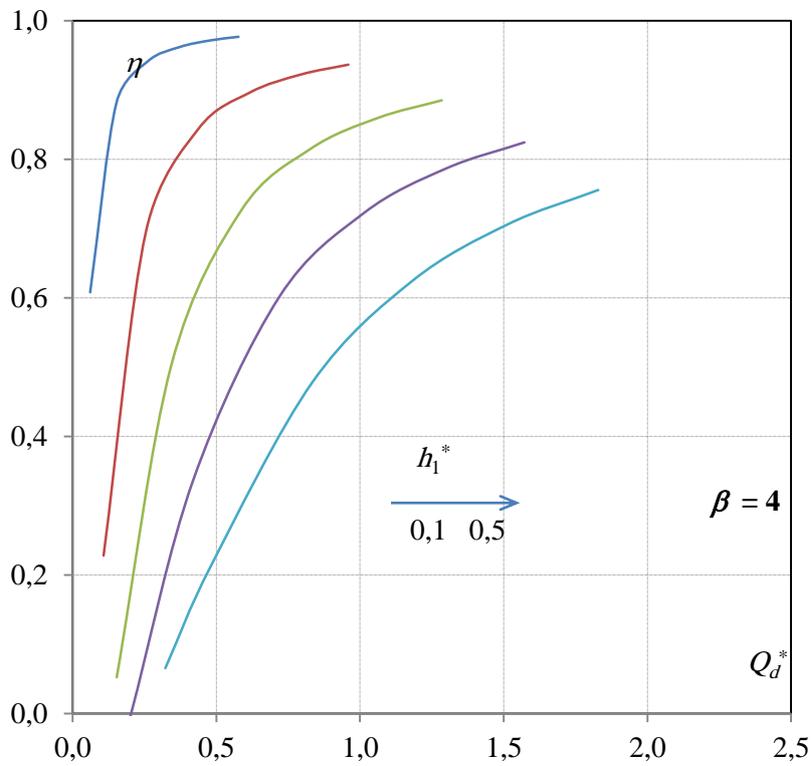


Figure II.32 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 4$

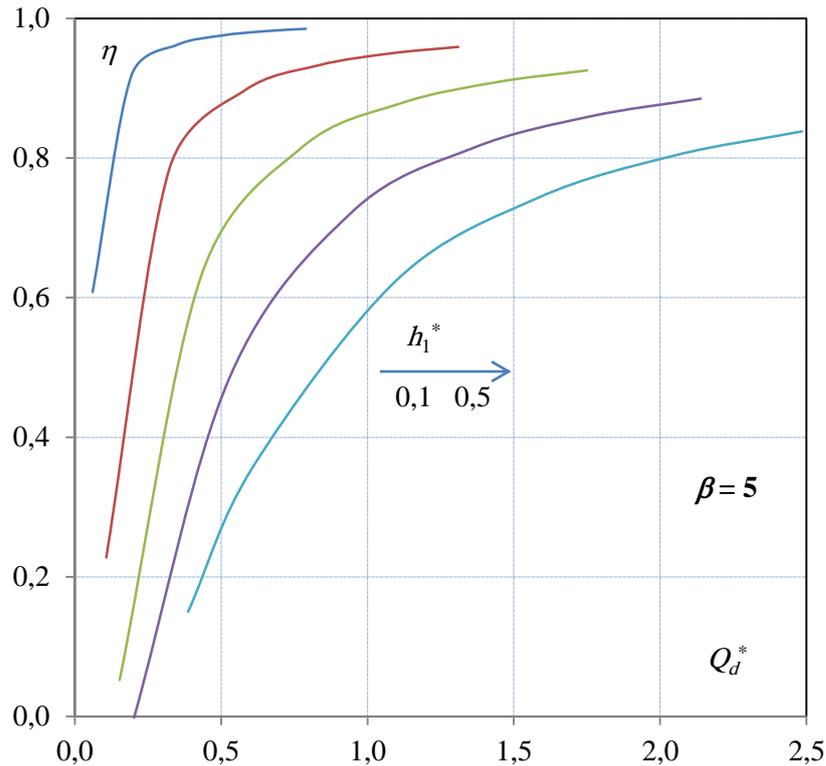


Figure II.33 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents h_1^* et $\beta = 5$

III.3.2. Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et h_{M1}^* fixé.

Les figures (II.34) à (II.39) illustrent la variation du rendement, η , en fonction du débit relatif, Q_d^* , pour des valeurs de β variant de 1 à 5. Chaque figure correspond à une valeur de la profondeur relative aval dans le lit majeur, h_{M1}^* , connue. Connaissant ces trois variables, Q_d^* , β et h_{M1}^* , la quatrième, h_1^* , étant unique, en vertu de l'équation (II.35) issue de l'application du théorème d'Euler.

La figure (II.34) montre le rendement dans un canal demi-circulaire prismatique. Le rendement diminue quand le débit relatif augmente. Pour des valeurs positive de β , le rendement est plus important pour de fortes valeurs de β . Les plus fortes valeurs de η correspondent aux plus fortes valeurs de h_{M1}^* et de β comme illustrer sur la figure (II.39).

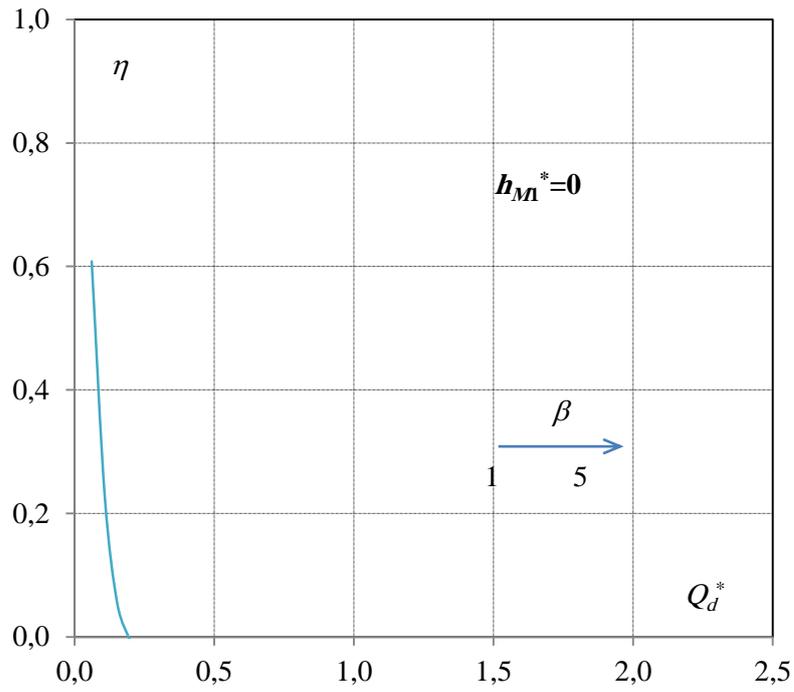


Figure II.34 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0$

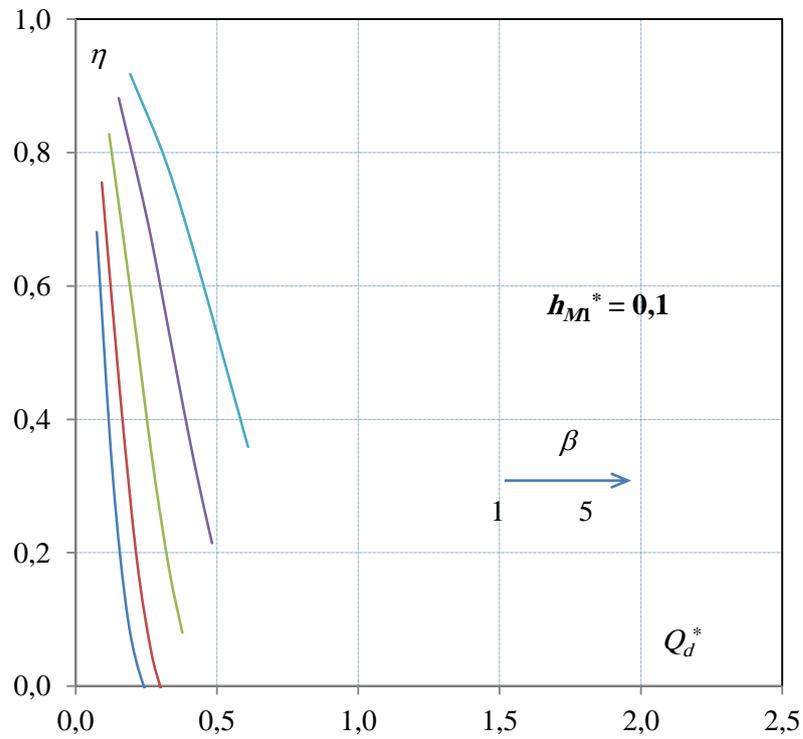


Figure II.35 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,1$

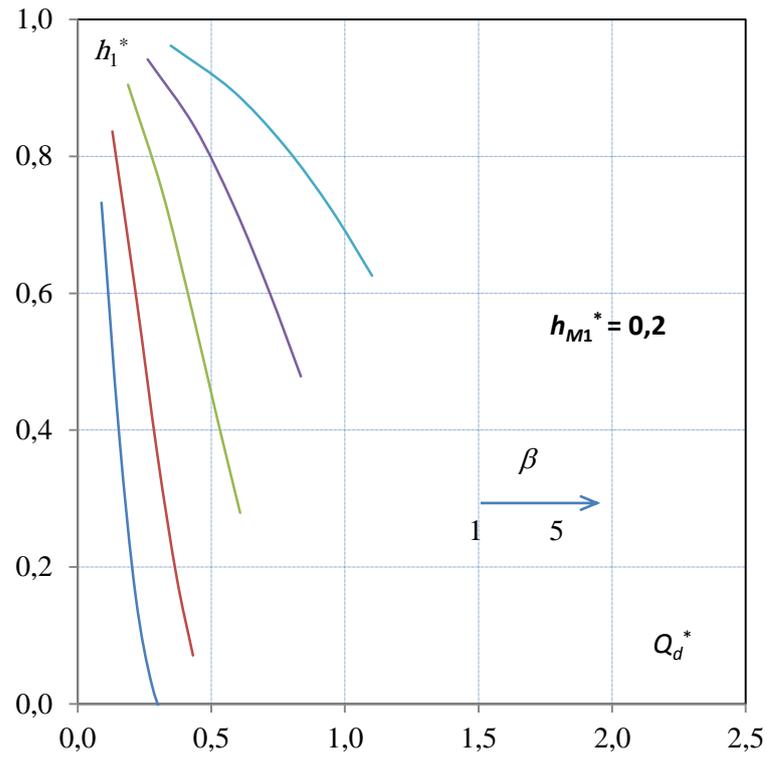


Figure II.36 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,2$

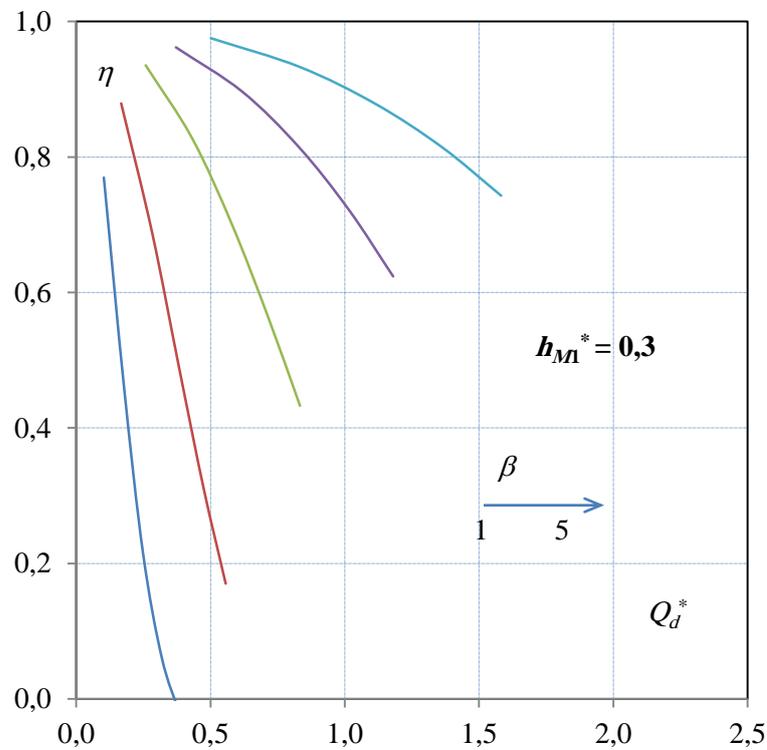


Figure II.37 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,3$

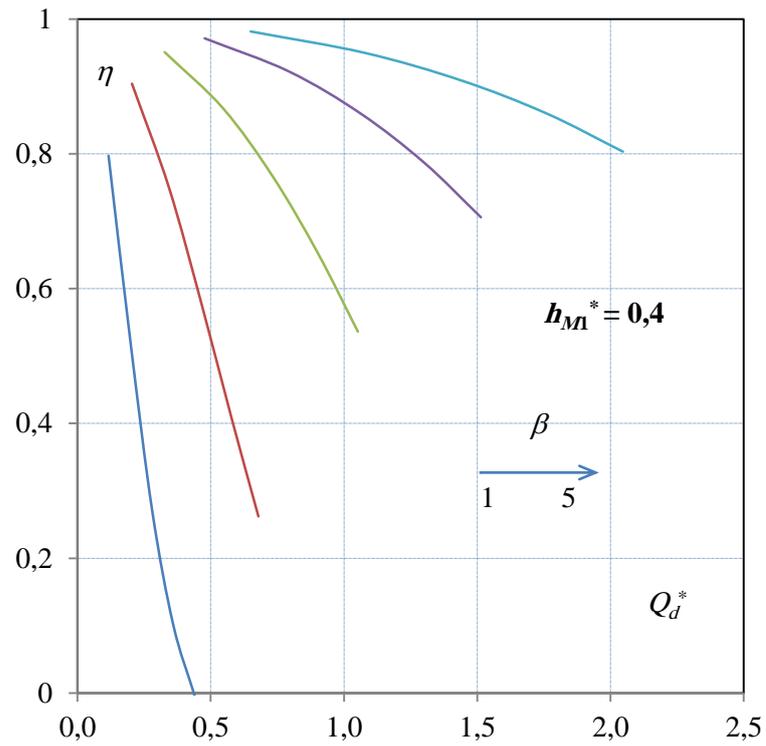


Figure II.38 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,4$

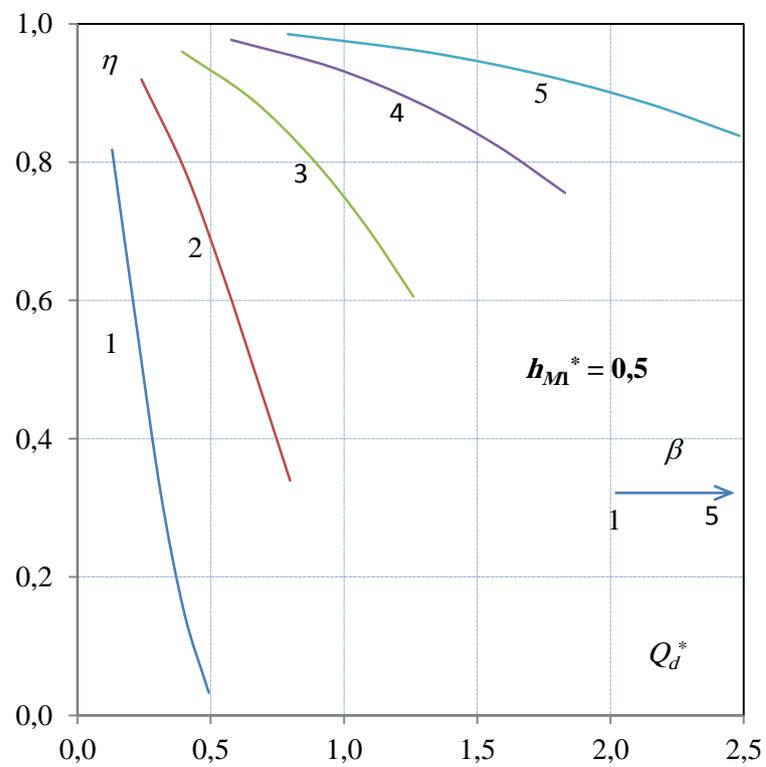


Figure II.39 : Variation de η en fonction de Q_d^* pour différents β et $h_{M1}^* = 0,5$

III.3.3. Variation de η en fonction de β , pour différents F_1 et un h_1^* fixé.

Pour une valeurs de la première hauteur relative h_1^* telle que $h_1^* = 0,3$, nous avons représenté sur la figure (II.40) la variation du rendement, η , en fonction du taux d'élargissement, β , pour des valeurs du nombre de Froude, F_1 , de l'écoulement incident allant de 4 à 10 avec un pas de 2.

Le rendement, η , croît avec β et avec F_1 . La valeur maximale du rendement est de 0,85 correspondant à $F_1 = 10$ et $\beta = 5$. La valeur réelle du rendement dépasserait nécessairement cette valeur. Rappelant que toutes les forces de frottement, sources de perte d'énergie, ont été négligées dans nos développements théoriques.

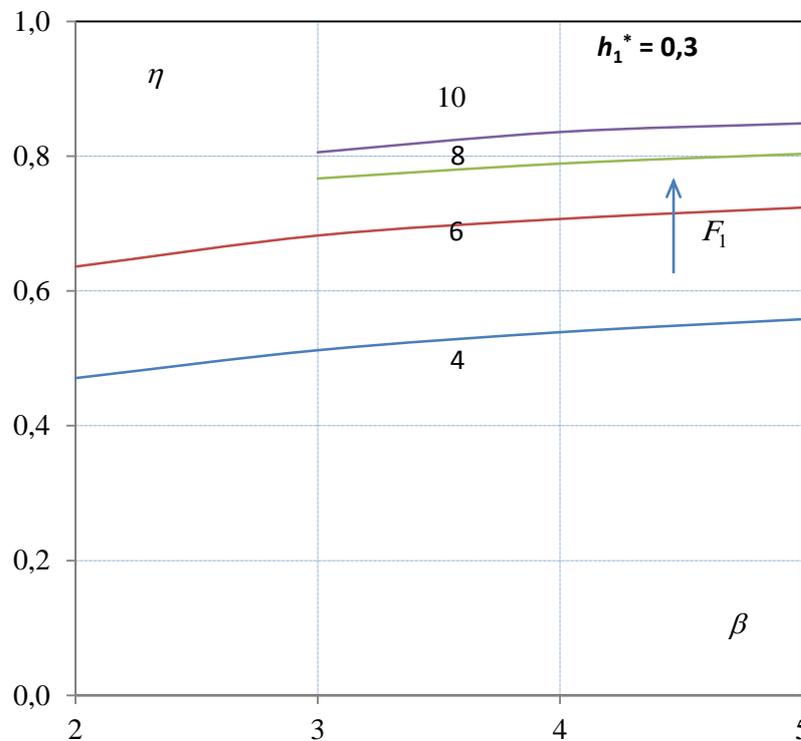


Figure II.40 : Variation de η en fonction de β pour différents F_1 et $h_1^* = 0,3$

III.4. Conclusion

Nous avons établi dans ce chapitre l'équation adimensionnelle donnant le rendement du ressaut en canal circulaire avec banquettes. La relation résultante est de forme $(\eta, Q_d^*, h_1^*, h_{M1}^*, \beta) = 0$.

Pour tracer les graphiques du rendement, on fixe à chaque fois deux variables et on fait varier la troisième. Pour ce qui est de la quatrième variable, celle-ci varie aléatoirement dans sa gamme pratique.

Pour une valeur de β donnée, le rendement augmente avec l'accroissement de Q_d^* et la diminution de h_1^* . La limite supérieure du débit relatif pratique augmente avec l'augmentation du rapport d'élargissement.

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

Rappelons que notre représentation graphique est approximative du fait qu'on doit prendre, de la même manière que pour l'application de la quantité de mouvement, l'effet de l'interaction entre le lit mineur et le lit majeur.

Chapitre IV. Proposition d'un protocole expérimental

IV.1. Introduction

L'application de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique, se produisant dans un canal composé de type circulaire avec banquettes, n'a pas été possible sans les hypothèses simplificatrices, ordinairement considérées pour les canaux simples.

A ce stade de l'étude, des mesures sur modèle réduit au laboratoire sont indispensables afin de justifier ou de corriger l'équation résultant de l'application de la quantité de mouvement et celle du rendement dont les valeurs vont certainement être revues à la hausse.

L'objet de ce chapitre est de proposer justement un protocole expérimental servant pour tenir ces essais. Nous allons proposer un dispositif expérimental avec ses dimensions ainsi qu'un mode expérimental. Les appareils pouvant être utilisés pour les mesures vont être également définis.

Les essais au laboratoire serviront également à mesurer les longueurs caractéristiques (la longueur du ressaut et la longueur du rouleau) ; Les analyses des résultats peuvent aboutir à des relations générales pour leur quantification.

IV.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental que nous proposons pour les essais est représenté schématiquement sur la figure (II.41) ci-dessous. Une pompe aspire l'eau du bassin d'accumulation et la refoule via une conduite vers le canal de mesure. Une vanne de réglage doit être placée après la pompe pour réguler le débit afin d'avoir à chaque fois un ressaut formé dans le canal. Pour mesurer le débit de l'écoulement, nécessaire pour le calcul du nombre de Froude et du débit relatif, un débitmètre, par exemple à diaphragme, est placé après la vanne de réglage et avant l'entrée de cette eau dans le canal de mesure. Le seuil placé à la fin du canal de mesure sert à stabiliser longitudinalement le ressaut et d'avoir son pied localiser au début du canal, et permettre ainsi de prendre des mesures pour un ressaut stable formé entièrement dans le canal transparent. La stabilisation du ressaut peut être également effectuée à l'aide d'une vanne à déplacement verticale qui doit être placée à la fin du canal de restitution. Après ce seuil, un canal, qui peut être de forme rectangulaire, permet de restituer l'eau vers le bassin d'accumulation, formant ainsi une boucle fermée. L'ensemble du bas repose sur le support au sol et l'ensemble d'en haut repose sur le support du canal.

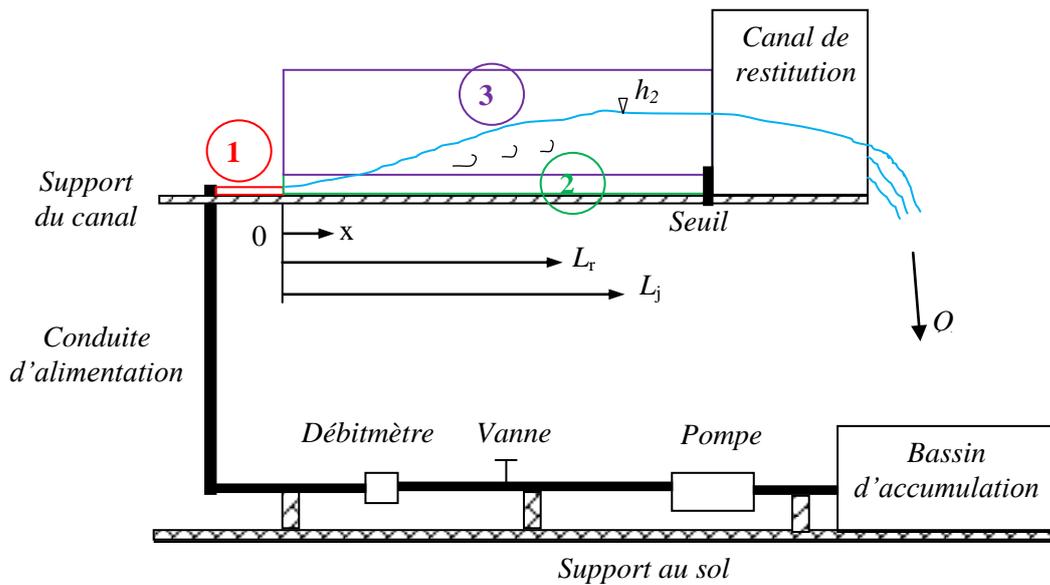


Figure II.41 : Schéma type simplifié du dispositif expérimental

1 : ouverture, 2 : Lit mineur, 3 : Lit majeur

Le canal de mesure est d'une section composée de type circulaire avec banquettes. Il doit être constitué en plexiglas transparent afin de pouvoir visualiser l'écoulement. A cause de la turbulence dans un lit composé, nous proposons une longueur du canal de mesure de 4 m, un peu plus grand que pour l'étude des canaux simples, pour être un peu sûr d'avoir une longueur du ressaut plus petite que la longueur du bassin de dissipation.

Le canal de mesure de section composée est connecté à son extrémité amont à un tronçon de conduite interchangeable, de section formée par un arc de cercle de diamètre identique à celui du lit mineur, directement alimenté par une pompe axiale assurant un débit maximum de 30 l/s. L'écoulement dans ce tronçon de conduite initiale est sous pression pour toute la gamme des débits et des ouvertures utilisées. Le débit maximum demandé est calculé en fonction de la valeur maximale du débit relatif issue de la représentation graphique de l'équation de la quantité de mouvement :

$$Q_{max} = Q_{d^*max} \sqrt{gd^5} = 2,5 \sqrt{9,81 \cdot 0,1^5} = 0,02476 \frac{m^3}{s} \approx 25 \text{ l/s.}$$

L'écoulement incident est donc généré par le tronçon de conduite interchangeable. Puisque le pied du ressaut est localisé juste à la fin de ce tronçon, la profondeur maximale dans la section transversale de ce tronçon correspondrait à la première hauteur conjuguée, h_1 , du ressaut.

Nous proposons des valeurs pour h_1 , autrement dit cinq ouvertures, à savoir $0,1d$; $0,2d$; $0,3d$; $0,4d$ et $0,5d$. Le minimum est de trois ouvertures pour chaque diamètre D (c'est-à-dire pour chaque valeur de β), et dans ce cas nous proposons $0,2d$; $0,3d$; $0,4d$. Les ouvertures choisies correspondent aux valeurs de la profondeur relative initiale, allant de $0,1$ à $0,5$.

Pour ce qui est des dimensions des deux demi-cercles que compose la section droite, on propose de fixer le diamètre du lit mineur du modèle à $d=10cm$. Ce lit mineur doit être muni de banquettes larges, permettant d'avoir le rapport maximal d'élargissement voulu, et fixer l'ensemble d'une manière définitive au support supérieur. Les ouvertures à choisir correspondant à ce diamètre, représentant la première hauteur conjuguée du ressaut, seront de 1 ; 2 ; 3 ; 4 et $5 cm$.

Le lit majeur sera fixé, à l'aide de boulons, d'une manière symétrique sur les parties extérieures des banquettes. Le diamètre du lit majeur dépendrait des valeurs de β donnant les valeurs pratiques du nombre de Froude. La représentation graphique établie au deuxième chapitre de cette partie nous a renseigné que les valeurs de β doivent varier entre 1 et 5 . Ceci fixerait par conséquent les diamètres, D , du lit majeur qui seront donc de 10 , 20 , 30 , 40 et $50 cm$, pour avoir les valeurs de 1 , 2 , 3 , 4 et 5 pour β . Le minimum est de faire des essais pour trois valeurs de β , et dans ce cas nous proposons les valeurs de 2 , 3 et 4 . Notons que les tronçons de conduite générant l'écoulement incident ainsi que les lits majeurs, doivent être préalablement construits avant d'entamer les essais.

IV.3. Procédure expérimentale

Le lit mineur, de diamètre $d=10cm$, avec ses banquettes étant fixé définitivement. On prend un des lits majeurs préalablement construits et on le fixe au-dessus, à l'aide de boulons, pour former ainsi le canal composé de forme circulaire avec banquettes.

On prend un des tronçons de conduite, servant d'ouverture, préalablement construits également, et on le fixe à l'amont du canal composé. Ce tronçon de conduite générant l'écoulement incident est connecté à la conduite d'alimentation et au canal de mesure à l'aide des joints, des boulons et de la silicone, pour assurer une étanchéité parfaite. Une fois que la silicone se tire, pendant quatre à cinq heures, on fait démarrer la pompe puis on ouvre graduellement la vanne de réglage, se trouvant sur la conduite de refoulement, jusqu'à ce que, soit la différence de lecture ΔH des deux ménisques dans les tubes transparents du manomètre différentiel, lié au diaphragme, atteigne la limite pratique

supérieure, correspondant à la valeur maximale du débit relatif donnée par les graphiques théorique. Un petit calcul s'impose ici.

Après deux à trois minute, temps jugé suffisant pour que l'écoulement incident soit permanent, la première hauteur conjuguée du ressaut, h_1 , étant connue, fixée par l'ouverture, on procède à la mesure de:

- La deuxième hauteur conjuguée, h_2 , du ressaut ;
- Les différentes profondeurs d'eau suivant l'axe longitudinal du canal dans des sections distantes successivement de 20 cm l'une par rapport à l'autre, et ce jusqu'à la fin du ressaut ;
- La longueur, L_j , du ressaut ;
- La longueur, L_r , du rouleau ;
- La différence de lecture ΔH entre les deux tubes du manomètre différentiel ;

La fin du rouleau est déterminé par le déplacement d'un bout de tissu sur la surface libre du ressaut, en cherchant la position où le tissu n'est emporté ni à l'aval ni à l'amont, correspondant à une vitesse nulle sur la surface libre. La fin du ressaut quant à elle correspond à la position de la section transversale où la profondeur de l'eau est maximale.

Une fois que ces mesures sont terminées, on diminue le débit, par actionnement de la vanne d'alimentation ; Puis on refait les mêmes mesures. Ainsi de suite, jusqu'à ce que, soit le nombre de *Froude* atteint la valeur de 4, correspondant à la valeur minimale du débit relatif pour cette ouverture. Le strict minimum est de prendre les lectures pour trois valeurs du débit correspondant à trois valeurs du débit relatif ou du nombre de Froude.

Les lectures pour cette ouverture sont terminées, on éteint la pompe et on place la deuxième ouverture, puis, on refait le même travail. Ainsi de suite, jusqu'à ce que tous les tronçons (ouvertures) soit testées. Tout le travail accompli jusqu'à présent correspond à une valeur du taux d'élargissement.

On déboulonne le lit majeur et on place un deuxième donnant ainsi une autre valeur pour le taux d'élargissement. Le travail expliqué ci-dessus sera refait pour ce nouveau diamètre du lit majeur. Ainsi de suite jusqu'à tester tous les lits majeurs préparés. Rappelant que pour pouvoir traiter les résultats expérimentaux, trois mesures sont requises pour chaque série d'essai. Tous les résultats doivent être soigneusement consignés dans les tableaux pour leur traitement.

IV.4. Traitement des résultats expérimentaux

Le traitement des résultats permet de justifier, de corriger ou même d'infirmer l'équation adimensionnelle issue de l'application de l'équation de la quantité de mouvement ainsi que l'équation, adimensionnelle également, donnant le rendement du ressaut.

Le traitement des mesures correspondant aux longueurs caractéristiques peut aboutir à des relations approché pour leur quantification.

Les différentes profondeurs d'eau suivant l'axe longitudinal du canal peuvent servir à trouver l'équation adimensionnelle du profil de la surface libre.

IV.5. Appareillage de mesure

L'étude du phénomène du ressaut hydraulique nécessite un appareillage simple ; Un ruban métallique gradué pour la mesure des distances linéaires comme les longueurs caractéristiques du ressaut. Un débitmètre, comme le débitmètre à diaphragme, pour la mesure des débits de l'écoulement et enfin un limnimètre pour la mesure des niveaux de la surface de l'eau, comme la deuxième hauteur conjuguée du ressaut.

IV.5.1 : Débitmètre à diaphragme

Le débitmètre à diaphragme est un dispositif destiné à la mesure des débits dans les conduites en charge. La mesure se fait par différence de pressions, comme dans le cas aussi du débitmètre de venturi. Le liquide en écoulement, franchit un étranglement dans une conduite, comme l'indique la figure (II.42). Il se produit alors, dans cet étranglement, une chute de pression, liée à la vitesse de l'écoulement et, par conséquent, au débit.

Considérons :

- v_1' la vitesse dans la section maximum à l'amont de l'étranglement ;
- v_2' la vitesse dans la section minimum à l'aval de l'étranglement ;
- ρ_1' la masse volumique du liquide dans la section maximum à l'amont de l'étranglement ;
- ρ_2' la masse volumique du liquide dans la section minimum à l'aval de l'étranglement ;
- $A = \pi D^2 / 4$ l'aire de la section de la canalisation ;
- $A_m = \pi d^2 / 4$ l'air de la section minimum de l'étranglement ;
- C_c le coefficient de contraction ;
- $d^* = (d/D)^2$ est le rapport des diamètres.

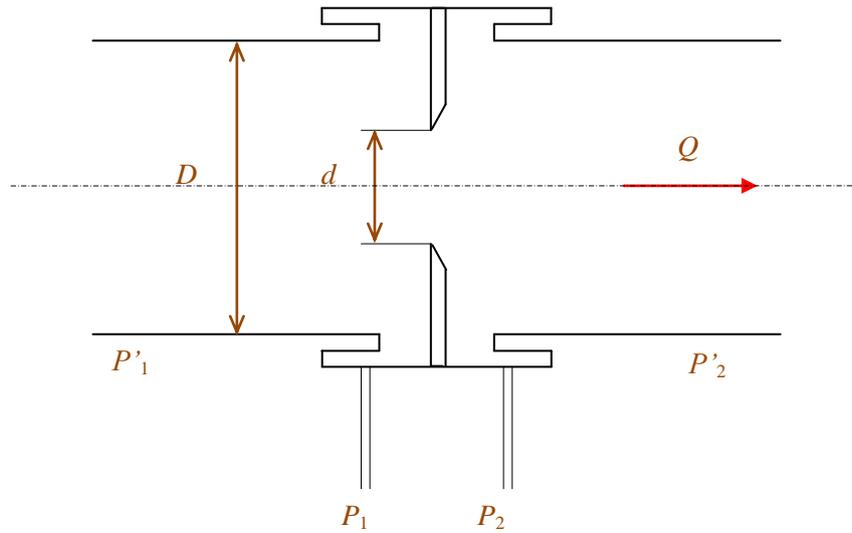


Figure II.42: Coupe longitudinale du débitmètre à diaphragme

Le théorème de *Bernoulli* permet d'écrire, en tenant compte de l'invariabilité de la densité $\rho'_1 = \rho'_2$ (milieu incompressible), que

$$v'_2{}^2 - v'_1{}^2 = 2(P'_1 - P'_2)/\rho \quad (\text{II.42})$$

De plus, nous pouvons écrire que

$$v'_1 A = v'_2 C_c A_m$$

Ainsi

$$v'_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - C_c^2 d^2}} \sqrt{\frac{2(P'_1 - P'_2)}{\rho'_1}}$$

Si l'on désigne par ζ le coefficient tenant compte des pertes par frottement, le débit volume est alors :

$$Q = \frac{C_c \zeta}{\sqrt{1 - C_c^2 d^2}} \sqrt{\frac{2(P'_1 - P'_2)}{\rho'_1}} A_m \quad (\text{II.43})$$

La relation précédente s'écrit plus simplement:

$$Q = C_c A_m \sqrt{\frac{2(P'_1 - P'_2)}{\rho'_1}} \quad (\text{II.44})$$

Ou bien

$$Q = C_d \sqrt{2g} A_m \sqrt{\Delta h} \quad (\text{II.45})$$

$$\Delta h = \frac{P'_1 - P'_2}{\varpi} \quad (\text{II.46})$$

$\varpi = \rho'g$ est le poids spécifique du liquide en écoulement.

Pratiquement, on mesure, non pas P'_1 et P'_2 , mais, les pressions P_1 et P_2 immédiatement avant et après l'étranglement. Le paramètre C_d désigne le coefficient de débit, dépendant du taux d'élargissement D/d , du nombre de *Reynolds* ainsi que des caractéristiques de la canalisation et de l'organe d'étranglement.

Le nombre de *Reynolds* R s'exprime, pour une conduite circulaire entièrement occupée par le liquide en écoulement, par la relation $R = 4Q/(\pi D\nu)$; D est le diamètre de la conduite et ν la viscosité cinématique du liquide ($\nu \approx 10^{-6} m^2/s$). Le débitmètre à diaphragme doit être étalonné avant son utilisation.

La quantité $(P'_1 - P'_2)/\varpi$ représente, en fait, la différence de côtes Δh des deux ménisques dans les tubes manométriques, reliés aux deux prises de pression sortant du diaphragme.

Ces considérations montrent que pour un diaphragme donné, le débit volume Q peut s'écrire $= a(\Delta h)^b$, où a et b sont des constantes, en notant que cette dernière est théoriquement égale à 0,5. A chaque débit volume Q passant par le diaphragme correspond une différence de côte Δh . L'expérimentation consisterait à déterminer les valeurs pratiques des constantes a et b . Les débits volumes Q peuvent être mesurés par un déversoir à échancrure triangulaire, sans contraction latérale et d'un angle d'ouverture de 90° . Les couples de valeurs $(Q, \Delta h)$, obtenus, feront l'objet d'un ajustement puissance par la méthode des moindres carrés non linéaires.

IV.5.2 : Limmètre à vernier

Comme nous l'avons souligné dans l'introduction, les profondeurs de la surface libre sont évaluées à l'aide d'un limmètre à vernier à double précision (figure II.43).

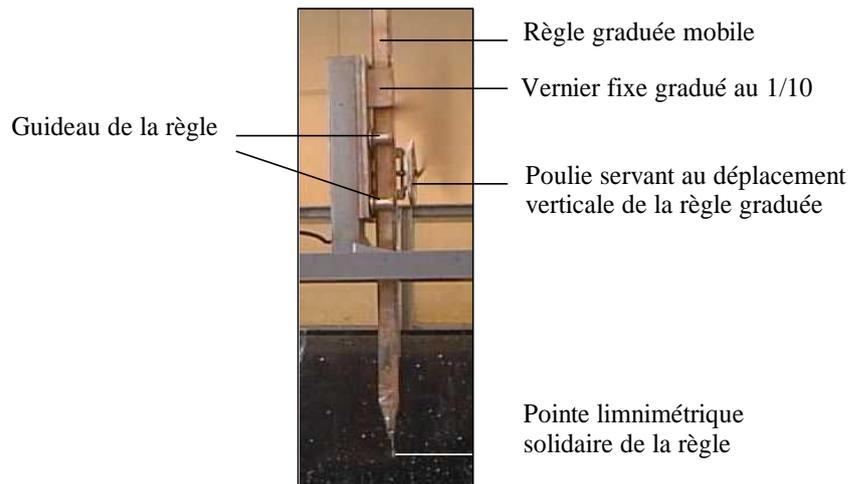


Figure II.43: Photographie du limnimètre à vernier

L'instrument est formé d'une règle métallique profilée en « U » 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.

Par manipulation d'une poulie, la pointe limnimétrique est abaissée jusqu'au fond du canal. Dans cette position, nous procédons à la lecture de la graduation sur la règle, coïncidant avec l'origine 0 du vernier ; cette graduation correspond alors au « zéro » du limnimètre. Nous soulevons maintenant la pointe limnimétrique, toujours par manipulation de la poulie, jusqu'à effleurement de la surface libre, et nous prenons la lecture sur la règle coïncidant avec le zéro du vernier. La profondeur de la surface libre en cette position est alors la différence entre ces deux lectures (celle du fond, représentant l'origine, et celle de la surface).

Le vernier est gradué en 50 parties égales et à chaque millimètre de la règle correspond une graduation de $49/50$ de mm sur le vernier. L'erreur absolue commise sur la lecture est donc de $(1 - 49/50) = 0,02\text{mm}$. Il faut cependant signaler que cette erreur absolue est liée à l'emploi de l'appareil, et ne correspond nullement à l'erreur commise sur la lecture de la profondeur dans le canal de mesure. Celle-ci est en effet beaucoup plus importante en raison des fluctuations parfois relativement grandes de la surface libre du liquide en écoulement.

La lecture sur le limnimètre s'effectue en deux étapes : on procède d'abord à la lecture de la graduation sur la règle, située immédiatement en haut du zéro du vernier, puis

on effectue la lecture du nombre de cinquantièmes en face de la division qui coïncide ou qui est la plus rapprochée d'une division de la règle.

IV.6. Conclusion

Un dispositif expérimental permettant de mener les essais sur le ressaut hydraulique en canal composé de forme circulaire avec banquettes étant proposé et expliqué dans ce chapitre. Toutes les dimensions du modèle à tester ont été proposées. Les appareils à utiliser dans les essais ont été également présentés.

Des techniques sont proposées pour la construction du canal de mesure afin de faciliter l'expérimentation et d'économiser du matériel. L'écoulement incident est généré par un tronçon de conduite dont la hauteur maximale de sa section transversale correspond à la première hauteur conjuguée du ressaut ayant son pied juste après ce tronçon.

Le traitement des mesures expérimentales permettra de vérifier l'équation de la quantité de mouvement, de quantifier les longueurs caractéristiques et de tracer le profil de la surface libre. Signalant que les lois de similitude n'exigent, pour que deux ressaut soit similaire, que l'égalité des nombres de Froude entre le modèle et le prototype ; Dans ces conditions, toute combinaison adimensionnelles du modèle est identique à la même combinaison du prototype.

Afin de comprendre le comportement exact de l'écoulement dans le corps du ressaut, spécialement dans l'interface entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures de vitesses sont nécessaire autour et dans cet interface ; C'est un travail délicat et long.

Conclusion à la deuxième partie

La forme du canal composé de type circulaire avec banquettes est présentée en détail dans le premier chapitre de cette deuxième partie. Les relations permettant de déterminer la position du centre de gravité et l'aire de la section transversale, nécessaire pour l'application de l'équation de la quantité de mouvement, sont déterminées. Des relations approchées simples de type puissance sont même proposées pour leur quantification.

L'application de l'équation de la quantité de mouvement (théorème d'Euler) a abouti à une relation liant différentes variables géométriques du canal et hydrauliques du ressaut. L'équation est présentée en terme adimensionnels afin de lui donner un caractère de validité général.

Cette équation résultante est une relation fonctionnelle de forme $\varphi(Q_d^*, h_1^*, h_{M1}^*, \beta) = 0$. Cette relation peut être réécrite également sous forme de $\psi(Q_d^*, h_1^*, h_2^*, \beta) = 0$ ou bien enfin sous forme de $\Gamma(F_1, h_1^*, h_2^*, \beta) = 0$.

La représentation graphique a bien expliqué les relations existantes entre les différents variables adimensionnelles de cette équation. Elle a permis surtout de montrer que la valeur maximale du débit relatif rapporté au diamètre du lit mineur est de deux-et-demi, tandis que le taux d'élargissement, celui-ci ne doit pas dépasser une valeur maximale de cinq.

La relation donnant le rendement du ressaut est une relation fonctionnelle de forme $\eta(Q_d^*, h_1^*, h_{M1}^*, \beta) = 0$. La représentation graphique a montré que pour une valeur de β donnée, le rendement augmente avec l'accroissement de Q_d^* et la diminution de h_1^* .

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons proposé en détail tout le Protocole expérimental. Le dispositif, le modèle réduit avec ses dimensions, la procédure des essais ainsi que les résultats attendus sont expliquées minutieusement. Les lois de similitude n'exigent que l'égalité des nombres de Froude entre le modèle et le prototype.

Afin de comprendre le comportement exact de l'écoulement dans le corps du ressaut, spécialement dans l'interface entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures de vitesses sont nécessaire autour et dans cet interface ; C'est un travail délicat et long.

CONCLUSION GENERALE

Le ressaut hydraulique se produisant dans un bassin de dissipation de forme composé, de type circulaire avec banquettes, est étudié en détail dans ce mémoire. L'objectif était de déterminer l'équation générale le régissant ainsi que son rendement permettant ainsi de dimensionner le bassin de dissipation appelé à abriter le ressaut hydraulique dont le débit de son écoulement incident est connu.

La première partie de ce mémoire a permis de passer en revue les principales études inhérentes à notre sujet de recherche.

L'étude de *Achour* (2000) ayant examiné, de point de vue théorique et expérimentale, le ressaut hydraulique à écoulement amont non développé et évoluant dans une galerie horizontale circulaire brusquement élargie, nous a été d'un grand support pour la détermination des caractéristiques géométriques d'une section circulaire. Elle nous a donné également l'idée de l'introduction, dans nos développements, du débit relatif rapporté au diamètre d'une section circulaire. En outre, les longueurs caractéristiques sont trouvées comparables à celles du ressaut évoluant dans une conduite circulaire dépourvue d'élargissement.

Les travaux ayant pour objet les écoulements uniforme et non uniforme en lits composés, prismatique et non prismatique, ont permis de mettre en évidence l'interaction entre le lit mineur et le lit majeur. Cette interaction se manifeste par un transfert de quantité de mouvement entre les deux lits associé à la formation de structures turbulentes aux interfaces les séparant. Dissipant une partie de l'énergie de l'écoulement, cette interaction modifie la capacité d'écoulement des deux lits et celle du lit composé. L'exploitation des écoulements non uniformes en lit composé avec variation continue de la largeur du lit majeur n'a été que partielle : les angles de non prismaticité étudiés sont compris entre 0 et 22°. Il serait intéressant de pousser l'analyse à des conditions d'écoulements plus rapidement variées. L'influence sur ces écoulements d'une différence de rugosité significative entre lit mineur et lit majeur n'a pas été analysée. Des travaux complémentaires sur l'influence de la condition limite aval en hauteur, nous semblent également nécessaires. Pour les variations discontinues de largeur du lit majeur, un travail important reste à faire au niveau de la compréhension des écoulements profonds; pour ces écoulements, l'importance des transferts turbulents et la dispersion des vitesses sur la verticale risquent de complexifier grandement les phénomènes physiques en jeu.

Dans son étude sur le ressaut hydraulique dans un canal composé droit, *khattaoui* (2012) a proposé une expression pour une force de résistance liée à la forme composé 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.

La deuxième partie de ce mémoire comporte notre propre contribution consistant à étudier le ressaut hydraulique dans un canal circulaire avec banquettes.

Le canal circulaire avec banquettes est composé d'un lit mineur de section demi-circulaire surmonté d'un lit majeur de section également demi-circulaire mais de diamètre plus grand. La géométrie de ce canal est présentée en détails et des relations exactes et approchées, pour le calcul de la section et du centre de gravité, ont été présentées.

L'équation de la quantité de mouvement est appliquée, néanmoins aucune forme de la force de résistance n'est proposée. La géométrie compliquée du canal et l'inexistence de travaux portant sur notre thème a rendu cette tâche impossible théoriquement.

L'équation résultante de l'application du théorème de la quantité de mouvement (théorème d'Euler), liant les différentes variables géométriques et hydrauliques, est présentée en terme adimensionnels afin de lui donner un caractère de validité général. L'introduction des relations approchées proposées a permis de montrer que cette équation résultantes est une relation fonctionnelle de forme $\varphi(Q_d^*, h_1^*, h_{M1}^*, \beta) = 0$. Cette relation peut être réécrite également sous forme de $\psi(Q_d^*, h_1^*, h_2^*, \beta) = 0$ ou bien enfin sous forme de $\Gamma(F_1, h_1^*, h_2^*, \beta) = 0$.

La représentation graphique de l'équation résultante a permis d'illustrer l'effet de chaque variable adimensionnelle. Elle a permis surtout de montrer que la valeur maximale du débit relatif rapporté au diamètre du lit mineur est de deux-et-demi, tandis que le taux d'élargissement, celui-ci ne doit pas dépasser une valeur maximale de cinq. Notons que ces valeurs limites correspondent aux valeurs pratiques, comprises entre quatre et dix, du nombre de *Froude* de l'écoulement incident, permettant d'avoir un ressaut stable dans un canal rectangulaire prismatique. L'expérience a montré que ces valeurs limites du nombre de *Froude*, permettant d'avoir un ressaut stable, ne varient pas beaucoup avec la forme du canal prismatique.

Concernant le rendement, la relation fonctionnelle résultante est de forme $(\eta, Q_d^*, h_1^*, h_{M1}^*, \beta) = 0$. La représentation graphique de cette relation a permis de conclure, entre autres, que pour une valeur du taux d'élargissement, β , donnée, le rendement augmente avec l'accroissement de Q_d^* et la diminution de h_1^* . La limite supérieure du débit relatif pratique augmente avec l'augmentation du rapport d'élargissement. Pour une valeur de h_{M1}^* donnée, le rendement croit avec l'accroissement de β et la diminution du débit relatif.

Le travail demandé initialement s'arrête ici. Cependant, nous avons continué par proposer une étude expérimentale servant de complément pour notre étude théorique. Cette étude expérimentale peut être entreprise dans le cadre d'une thèse de doctorat. Le dispositif expérimental, la procédure expérimentale ainsi que les dimensions du modèle réduit sont présentées en détails. Les appareils à utiliser dans les essais ont été également présentés. Des techniques sont proposées pour la construction du canal de mesure afin de faciliter l'expérimentation et d'économiser du matériel. L'analyse des mesures permettra de vérifier l'équation de la quantité de mouvement, de quantifier les longueurs caractéristiques et de tracer le profil de la surface libre. Rappelons que l'égalité des nombres de Froude entre le modèle et le prototype est l'unique condition de similitude.

Afin de comprendre le comportement exact de l'écoulement dans le corps du ressaut, spécialement dans l'interface entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures de vitesses sont nécessaire autour et dans cet interface ; C'est un travail délicat et long.

Une fois le comportement du ressaut est compris, nous recommandons d'étudier sa compacité. Celle-ci permettrait de déterminer la position d'un seuil, assurant le contrôle du ressaut, pour avoir simultanément une dissipation importante et une longueur minimale du bassin. Autrement dit, il s'agit de déterminer le bassin de dissipation technico-économique.

Le même travail entrepris dans ce mémoire peut être également réalisé sur les autres formes de canaux composés. Néanmoins des essais doivent être réalisés à chaque fois. La finalité est d'arriver à déterminer la forme du bassin de dissipation le plus rentable et le plus économique.

BIBLIOGRAPHIE

Achour, B., (2000), Ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, JHR, 38(4), 307-311.

Bousmar, D., (2002), Flow modelling in compound channels / Momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains, Ph-D thesis, Université catholique de Louvain, Faculté des Sciences Appliquées.

Bousmar, D., Rivière, N., Proust, S., Paquier, A., Morel, R., and Zech, Y., (2005), Upstream discharge distribution in compound-channel flumes, J.H.Eng, ASCE, 131(5), 408-412.

Hager, W.H., Bremen, R., (1989), Classical Hydraulic Jump : Sequent depths, J.H.R., 27(5), 565-585.

Hager, W.H., Sinniger, R., (1989), Construction hydraulique, Ecoulement stationnaire, Edition suisse romande.

Hager, W.H., Hydraulic jump in U-shaped channel, Journal of Hydraulic Engineering, 115 (5): 667–675, 1989.

Khattaoui, M., (2007), contribution à l'étude des écoulements brusquement variés à faible nombre de Froude, thèse de doctorat, université Med Khider de Biskra, décembre, 2007, Algérie.

Khattaoui M., Achour, B., (2012), Ressaut hydraulique en lit composé droit, J.H.Eng, LJEE N°20. Juin 2012

Knight D.W., Demetriou J.D.,(1983), Flood plain and main channel interaction, J. Hydraul. Eng

Knight D.W., Shiono K.,(1990). Turbulence measurements in shear layer region of a compound channel, J.Hydraul.

Kunstatsky, J., Vyborá, P., Die Tiefen des Wassersprunges mit freiem Wasserspiegel im Kreisrunden Querschnitt, Vodohospodarsky Casopis. Cislo 1, 1966.

Lane, E.W., Kindsvater, C.E., Hydraulic jump in enclosed conduits, Engineering News-Records: 121 (26), 1938.

Muto, Y., Shiono, K., Imamoto, H., Ishigati, T., (1998), Three-dimensional structure flow in meandering channels for overbank flow, J. Hydroscience and Hydr. Engrg.

Myers W.R.C (1978). Momentum transfer in compound channel, International association for hydraulic research.

Naot, D., Nezu, I., and Nakagawa, H., (1993), Calculation of Compound-Open-Channel Flow, J.H.E., Asce, 119(12), 1418-1426

Proust, S., (2005), Ecoulements non-uniformes en lit composé : effets de variations de largeur du lit majeur, Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, spécialité : mécanique des fluides, INSA de Lyon, Lyon.

Rajaratnam, N., (1964), Discussion, Proc. ASCE, J.H.D., 90(4), 341-350.

Rajaratnam, N., (1967), Hydraulic jumps, Advances in Hydrosience, 4, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York.

Rajaratnam, N., Subramania, K., (1967), Flow equation for the sluice gate, Proc. ASCE, J. Irrigation and Drainage Division, 93, IR3, 167-186.

Rajaratnam, N., Discussion of [2], J. Hyd. Div., ASCE, 90 (4): 341–350, 1964.

Rajaratnam, N., Hydraulic jump in horizontal conduits, Water Power, 17: 80–83, 1965.

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(7), 793-802.

Silvester, R., Hydraulic jump in all shapes of horizontal channels, Proc. ASCE, J. Hyd. Div., 90, (HY1): 23–55, 1964.

Shiono, K., Knight, D. W., (1990), Two dimensional analytical solution for a compound channel, Proc., 3rd Int. Symp. on refined flow modeling and turbulence measurements, Tokyo, Japan, 591-599.

Tominaga A., et al.(1989). Three dimensional turbulent structure in straight open channel flows. J.hydraul. Eng

Tominaga A., Nezu I., (1991). Turbulent structure in compound open channel flows.

J.hydraul. Eng