

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger
Département Hydraulique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

THESE DE MAGISTER

Présentée par :

MASMOUDI Rachid

Ingénieur en hydraulique
Diplômé de l'E.N.P.

**Contribution à l'étude du ressaut hydraulique
dans un canal de section droite triangulaire**

Soutenue le 26 octobre 1995 devant le jury:

Président	A. KETTAB	Professeur
Examineurs	M. BOUHADEF M. BERKANI	Professeur Chargé de cours
Rapporteur	B. ACHOUR	Chargé de cours
Invités	Y. MOULOUDI S. BENMAMAR	Maître-assistant Maître-assistant

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger
Département Hydraulique



THESE DE MAGISTER

Présentée par :

MASMOUDI Rachid

Ingénieur en hydraulique
Diplômé de l'E.N.P.

**Contribution à l'étude du ressaut hydraulique
dans un canal de section droite triangulaire**

Soutenue le 26 octobre 1995 devant le jury:

Président	A. KETTAB	Professeur
Examineurs	M. BOUHADEF M. BERKANI	Professeur Chargé de cours
Rapporteur	B. ACHOUR	Chargé de cours
Invités	Y. MOULOUDI S. BENMAMAR	Maître-assistant Maître-assistant

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur A. KETTAB professeur à l'école nationale polytechnique d'Alger de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

De même, je tiens à remercier Monsieur M. BOUHADEF professeur à l'U.S.T.H.B. et Monsieur M. BERKANI chargé de cours et chef du département hydraulique à l'E.N.P. d'avoir voulu examiner ce travail et de participer au jury de cette thèse.

Mes plus vifs remerciements sont adressés à Monsieur B. ACHOUR chargé de cours au centre universitaire Mohamed Khider de BISKRA et Directeur de cette thèse qui m'a initié patiemment dans la pratique de la recherche et a contribué grandement à mener à terme ce travail par ses encouragements et son aide cordiale malgré ses nombreuses occupations.

Je remercie chaleureusement Monsieur Y. MOULOUDI et Mademoiselle S. BENMAMAR d'avoir accepté de participer au jury de ma soutenance.

J'exprime mes profonds remerciements à toute l'équipe de l'institut d'hydraulique et des techniciens de laboratoire , en particulier N. BERRETMA et A. MOKHTARI.

Que tous ceux, collègues et amis, qui nous ont soutenu et encouragé le long de nos efforts pour réaliser ce travail trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE.....	1
PREMIERE PARTIE: ETUDE DU RESSAUT HYDRAULIQUE	
CLASSIQUE	7
I-1 Introduction	7
I-2 Rappel historique sur l'évolution de la description du ressaut hydraulique.....	7
I-3 Caractéristiques du ressaut hydraulique classique.....	30
I-3-1 Cas du canal trapézoïdal.....	30
I-3-1-1 Configuration de l'écoulement dans un canal trapézoïdal.....	30
I-3-1-2 Rapport des hauteurs conjuguées.....	32
I-3-1-3 Longueur du rouleau.....	34
I-3-1-4 Rendement du ressaut.....	36
I-3-2 Cas du canal rectangulaire.....	37
I-3-2-1 Longueur du rouleau.....	37
I-3-2-2 Rapport des hauteurs conjuguées.....	41
I-3-2-3 Longueur du ressaut.....	46
I-4 Conclusion.....	47
DEUXIEME PARTIE: ETUDE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS	
UN CANAL SEMI- TRIANGULAIRE.....	48
II-1 Introduction.....	48
II-2 Rapport des hauteurs conjuguées	49
II-3 Equation modifiée de la quantité de mouvement	51
II-4 Longueurs caractéristiques du ressaut	54
II-4-1 Longueur du rouleau.....	54
II-4-2 Longueur du ressaut.....	56
II-5 Profil de surface généralisé.....	57
II-6 Rendement du ressaut.....	58
II-7 Conclusion.....	60

TROISIEME PARTIE: ETUDE EXPERIMENTALE.....	61
III-1 Introduction.....	61
III-2 Description des installations.....	62
III-2-1 Réservoir d'alimentation.....	62
III-2-2 Canal de mesures	63
III-2-3 Bassin d'accumulation.....	63
III-2-4 Débitmètre.....	64
III-2-5 Limnimètres.....	65
III-3 Description du déroulement des essais.....	66
III-4 Détermination expérimentale des caractéristiques du ressaut dans un canal triangulaire symétrique.....	67
III-4-1 Vérification de l'équation de la quantité de mouvement	67
III-4-2 Détermination expérimentale des longueurs du rouleau et du ressaut	70
III-4-2-1 Longueur du rouleau	70
III-4-2-2 Longueur du ressaut	72
III-4-3 Profil de surface généralisé.....	74
III-4-4 Détermination expérimentale du rendement du ressaut.....	75
III-5 Conclusion.....	77
CONCLUSION GENERALE.....	79
Annexe.....	80

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

De nombreuses structures hydrauliques telles que les évacuateurs de crues de surface ou en puits ont pour rôle d'évacuer l'eau et la restituer plus à l'aval dans le cours d'eau. Cette évacuation d'eau se traduit, dans la majeure partie des cas, par la transformation de l'énergie potentielle emmagasinée par la retenue en une forte énergie cinétique à l'amont de l'ouvrage de restitution. Les forces tractrices engendrées, proportionnelles au carré de la vitesse, peuvent sérieusement menacer l'ouvrage par leur caractère fortement érosif et il est alors souvent question de dissiper, dans la plus grande proportion possible, cette énergie cinétique.

A l'entrée de l'ouvrage de restitution, l'écoulement est en régime torrentiel caractérisé par un nombre de Froude supérieur à l'unité. Le principe de la dissipation consiste à transformer ce régime torrentiel en un régime fluvial, caractérisé par de faibles vitesses à l'aval de l'ouvrage appelé dissipateur d'énergie. Un ressaut hydraulique prend alors naissance sur toute la longueur du bassin de dissipation, de forme souvent rectangulaire et muni parfois d'obstacles tels que des chicanes, des seuils continus ou dentés... placés dans le sens de la largeur.

A ce sujet, PETERKA [3] a élaboré un excellent ouvrage relatant les divers types de bassins de dissipation rencontrés dans la pratique de l'ingénieur hydraulicien. Plus récemment encore, NANDANA et AYED [25] améliorent les performances du bassin d'amortissement type III suivant la classification de l'U.S.B.R et fournissent une nouvelle méthode de dimensionnement. Le bassin testé, dit type III modifié, comporte une rangée supplémentaire de seuils dentés et la distribution des vitesses dans l'écoulement fluvial à l'aval du ressaut se voit ainsi améliorée.

Le ressaut prenant naissance dans un bassin muni d'un ou plusieurs seuils, continus ou dentés, est dit forcé par opposition au ressaut classique formé sur un radier dépourvu d'obstacle.

Les caractéristiques principales d'un ressaut classique ou forcé sont: le rendement représentant le rapport de la perte de charge qu'ils occasionnent à la charge initiale dans leur section amont, leur longueur ainsi que leurs hauteurs conjuguées amont et aval.

Du point de vue quantitatif, les caractéristiques du ressaut dépendent essentiellement de la géométrie du bassin amortisseur, du nombre de Froude caractérisant l'écoulement amont ainsi que la hauteur relative s/h_1 pour le cas du ressaut forcé; s et h_1 représentent respectivement la hauteur géométrique du seuil et la hauteur initiale du ressaut.

Pour des raisons économiques et d'efficacité, le ressaut doit s'étendre sur une moindre longueur et fournir une hauteur finale aval la plus petite possible et dissiper au maximum.

L'étude entreprise par HAGER [38] montre que, pour une même valeur du nombre de Froude amont, le ressaut dans un canal de section triangulaire se caractérise par un rendement plus important et par un plus faible rapport des hauteurs conjuguées que ceux du ressaut dans un canal de section rectangulaire ou trapézoïdale.

La bibliographie montre que l'intérêt des chercheurs s'est porté essentiellement sur le ressaut en canal de section droite rectangulaire; ceci est certainement dû à la forme géométrique simple qui le caractérise. Le développement théorique ainsi que les essais au laboratoire ont d'abord montré que le ressaut est régi par l'équation de la quantité de mouvement, quelle que soit la forme du profil du canal. C'est en d'autres termes la seconde loi de Newton qui est appliquée, énonçant que la variation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut est égale à la résultante des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement.

Hormis quelques études, telles que celle de SMITH [41] pour le ressaut dans une conduite rectangulaire de forte pente, celle de Mc. CORQUODALE [24] pour le ressaut évoluant sur une contre pente ou l'étude de HAGER et KAWAGOSHI [19] pour le ressaut du type B, l'application de l'équation de la quantité de mouvement a concerné essentiellement le ressaut du type A prenant naissance sur un radier de la partie horizontale ou pouvant être considéré comme telle; la composante tangentielle du poids propre de la masse liquide constituant le ressaut, très difficile à évaluer d'un point de vue théorique pour le cas général, n'est plus à prendre en considération. De plus, l'effet des frottements est négligé par rapport à celui dû à la perte de charge occasionnée par le ressaut lui-même.

Les considérations ci-dessus exposées ont mené à l'établissement de l'équation universellement connue de BELANGER [39] permettant le calcul explicite du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont de celui-ci.

HAGER et WANOSCHEK [12] montrent alors que, pour les nombres de Froude supérieurs à 3 ($F_1 > 3$), le rapport Y est directement proportionnel à F_1 ($Y \sim F_1$).

Le ressaut hydraulique est aussi caractérisé par deux principales grandeurs géométriques. La première, notée L_r , est la longueur du rouleau tandis que la seconde, notée L_j , est la longueur du ressaut. A la surface du ressaut apparaît un rouleau, dit d'ailleurs de surface, formant un tourbillon d'eau et d'air qui s'étend justement sur la longueur L_r . Plus à l'aval du rouleau de surface, l'écoulement tend à devenir parallèle au fond du canal et la répartition des vitesses est pratiquement uniforme. Cette section de l'écoulement, de profondeur h_2 , se situe par définition à la distance L_j du début du ressaut.

Aucun développement théorique n'a pu mener à l'établissement d'une relation permettant d'évaluer L_r et L_j ; seuls les essais au laboratoire ont permis leur quantification. C'est ainsi que des études relativement récentes [5,12,15] ont pu proposer des relations adimensionnelles au calcul de la longueur relative L_r/h_1 , où h_1 est la hauteur initiale du ressaut. Les résultats expérimentaux ont connu que la longueur relative L_r/h_1 ne dépend que du nombre de Froude F_1 et du rapport d'aspect b/h_1 où b est la largeur du canal rectangulaire.

PETERKA est l'un des premiers auteurs à avoir proposé une relation simple au calcul de la longueur relative L_j/h_1 ; cette relation montre que L_j/h_1 ne dépend que du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut. En ce qui concerne la longueur relative L_j/h_2 , l'auteur montre que les points expérimentaux se répartissent autour de la valeur moyenne 6 ($L_j/h_2 = 6$) pour une large gamme des nombres de Froude F_1 . Ce résultat est encore admis et largement appliqué de nos jours.

Les mesures expérimentales obtenues par BAKHMETEFF et MATZKE [2] ont surtout permis de conclure, à travers la courbe du profil de surface adimensionnel du ressaut type A, que ce dernier se localise à l'aval pour $x/L_r \sim 1.4$; x est la coordonnée longitudinale comptée à partir du début du ressaut.

Les travaux entrepris sur le ressaut de type A ont également concerné la répartition des vitesses à l'intérieur de la masse liquide en mouvement. A ce sujet, nous pouvons citer les travaux de RAJARATNAM [40] qui montre que dans une section donnée le maximum u_m de la vitesse s'obtient pour $z/\delta_1 = 0.18$ où z est la coordonnée verticale et δ_1 la position du point pour lequel $u = u_m/2$; z et δ_1 sont comptés à partir du fond du canal.

Pour une section verticale arbitrairement choisie, une relation simple est proposée liant la variable adimensionnelle δ_1/h_1 à x/h_1 telle que $x/h_1 \leq 30$. Pour $x=0$, correspondant au début du ressaut, δ_1/h_1 prend la valeur égale à l'unité.

Une distinction doit être faite entre les vitesses positives, notées u_m , comptées dans la direction de l'écoulement et les vitesses "négatives", notées u_s , comptées dans le sens inverse à l'écoulement en raison de la présence du rouleau de surface.

HAGER (1991) propose des relations intéressantes montrant la variation des vitesses relatives U_m et U_s en fonction de la position relative x/L_r de la section considérée. Les vitesses relatives U_m et U_s sont par définition $U_m = (u_m - V_2)/(V_1 - V_2)$ et $U_s = u_s/V_2$, V_1 et V_2 étant les vitesses moyennes de l'écoulement à l'amont et l'aval du ressaut. Les relations proposées sont applicables dans une large gamme de x/L_r ($0.05 < x/L_r < 1.5$).

Le ressaut hydraulique a été également examiné et testé dans d'autres formes de canaux tels que le profil en U [13], le profil trapézoïdal [38] et le profil triangulaire [12].

L'étude du ressaut dans le profil en U, formé à sa base par un demi cercle de diamètre D surmonté de deux parois verticales, a montré un comportement tantôt similaire à celui du ressaut dans une conduite circulaire pour les faibles valeurs de la hauteur relative initiale h_1/D ($h_1/D < 0.5$), tantôt similaire à celui du ressaut dans un canal rectangulaire pour les fortes valeurs de h_1/D ($h_1/D > 0.5$). Les essais ont montré que les valeurs de la longueur relative L_r/h_2 se répartissaient autour de la valeur moyenne 6 comme dans le cas du ressaut en canal rectangulaire observé par PETERKA.

Les travaux entrepris par SILVESTER (1964) sur le ressaut en canal de section trapézoïdale ont notamment contribué à définir la longueur du ressaut et l'exprimer sous la forme adimensionnelle $L_r/(h_2 - h_1) = 7(1 + 10M)$ avec $M = mh_1/b$ où m est la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal, b la base du trapèze et h_1 la hauteur initiale du ressaut; le paramètre adimensionnel M représente en fait la hauteur relative initiale du ressaut. La relation de SILVESTER montre clairement que la longueur du ressaut est d'autant plus grande que M tend vers l'infini. Les valeurs croissantes de M indiquent un profil trapézoïdal géométriquement rétréci à la base en tendant vers le profil triangulaire ($b \rightarrow 0$). Par contre, les valeurs décroissantes de M aboutissent à des profils trapézoïdaux d'autant plus refermés vers le haut en tendant vers le profil rectangulaire ($M \rightarrow 0$). Ces considérations laissent penser que le ressaut en canal triangulaire devrait s'étendre sur une longueur beaucoup plus grande que son homologue du rectangulaire.

Plus récemment encore WANOSCHEK et HAGER (1991) ont décrit de manière détaillée le comportement du ressaut dans un canal trapézoïdal d'angle d'inclinaison de 45° ($m=1$) et pour des valeurs de $M \leq 0.4$.

Les observations ont révélé l'existence d'un rouleau de fond, jusqu'alors jamais détecté, et ses caractéristiques géométriques telles que sa longueur à la base, sa hauteur ainsi que sa position sont alors définies.

Les essais ont montré que la longueur relative L_j/h_2 du ressaut dépend à la fois de la valeur du nombre de Froude F_1 et de la valeur de la hauteur relative initiale M ; Les courbes de variation de L_j/h_2 , obtenues pour $0.1 \leq M \leq 0.4$, sont comparables à la courbe unique issue des essais de PETERKA pour le ressaut en canal de section droite triangulaire.

Les auteurs ont enfin montré que le ressaut dans le canal trapézoïdal testé devenait trop long et asymétrique au-delà d'une valeur limite du nombre de Froude F_1 . Cette valeur limite, notée F_{1L} , dépend de la hauteur relative initiale M .

Le ressaut évoluant dans un canal de section droite triangulaire n'a pas connu un intérêt aussi grand que celui accordé à son homologue du rectangulaire, bien que le triangle semble être le profil le mieux adapté au rôle de dissipateur.

Les premiers auteurs à avoir étudié ce type de ressaut sont ARGYROPOULOS (1962) et RAJARATNAM (1964). Le premier a mené son expérimentation dans un canal d'angle d'ouverture de 47.3° , tandis que le second teste un canal d'angle d'ouverture de 60° .

Les résultats ont montré, dans leur ensemble, que l'équation de la quantité de mouvement est en règle générale vérifiée bien que certains points de mesure tendent à montrer que les rapports Y des hauteurs conjuguées soient légèrement inférieurs aux valeurs théoriques. Cet écart, estimé à 5%, est également observé à travers l'analyse des résultats obtenus par HAGER et WANOSCHEK (1987) pour le canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° ($m=1$). Deux principales raisons semblent expliquer cette tendance: les pressions ainsi que les vitesses ne sont pas uniformément réparties comme l'avait supposé le développement théorique et l'effet des frottements le long des parois du canal doit être pris en considération. Les auteurs, excluant l'hypothèse de la non uniformité des pressions et des vitesses, modifient l'équation de la quantité de mouvement par introduction de l'effet des frottements jusqu'alors négligés; ceux-ci sont évalués par la formule de BLASIUS.

HAGER et WANOSCHEK décrivent le ressaut comme étant fortement tridimensionnel et essentiellement constitué de quatre zones; ils établissent notamment l'équation adimensionnelle de son profil de surface. En tenant compte des résultats d'ARGYROPOULOS et de RAJARATNAM, les auteurs proposent une relation unique au calcul des longueurs relatives L_r/h_2 et L_j/h_2 du ressaut pour le profil triangulaire, à angle d'inclinaison tel que $0.4 \leq m \leq 1$. Enfin, une étude comparative est effectuée entre les caractéristiques et les performances des ressauts en canal de section triangulaire et rectangulaire.

Il faut cependant signaler la démarche assez particulière entreprise par HAGER et WANOSCHEK lors de l'expérimentation. En effet, disposant d'un canal de section droite rectangulaire, long de 12 m et large de 0.30 m, une paroi inclinée d'un angle de 45° ($m=1$) par rapport à l'horizontale y est insérée. Le profil géométrique obtenu et sur lequel les essais ont été effectués est de forme semi-triangulaire, formé d'une paroi verticale et d'une paroi inclinée. Les résultats expérimentaux issus de ce profil ont été extrapolés au profil triangulaire symétrique.

N'est-il pas légitime de penser que cette extrapolation peut paraître peu fiable en égard à l'influence de la paroi verticale sur les caractéristiques et le comportement du ressaut ? Que deviendraient alors ces caractéristiques dans un canal triangulaire symétrique ? C'est l'un des objectifs que vise la présente étude. Pour atteindre cet objectif, deux étapes ont été nécessaires:

- Une synthèse bibliographique délibérément répartie sur deux chapitres.

Le premier a concerné essentiellement les travaux effectués sur le ressaut de type A en canal de section rectangulaire, tandis que le second passe en revue les quelques approches théoriques et expérimentales sur le ressaut en canal de section droite triangulaire. Notre attention s'est portée particulièrement sur l'étude effectuée par HAGER et WANOSCHEK [12], étroitement liée à la présente recherche.

- Une étude expérimentale qui a permis de quantifier les caractéristiques du ressaut en canal de section triangulaire à angle d'ouverture de 90° ($m=1$).

Chaque série d'essais a été réalisée pour une hauteur initiale constante du ressaut ($h_1 = \text{constante}$), par l'adjonction d'un convergent triangulaire à l'entrée du canal. Cette approche expérimentale, jusqu'alors jamais réalisée, nous a permis d'examiner l'influence de la hauteur initiale h_1 sur les caractéristiques du ressaut, notamment le profil de surface axial.

***ETUDE DU RESSAUT HYDRAULIQUE
CLASSIQUE***

I ETUDE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE

I-1 Introduction

Dans cette partie, un état de connaissance sur le ressaut hydraulique est présenté, dans lequel un rappel historique et une description des méthodes d'approche des caractéristiques du ressaut hydraulique et particulièrement du ressaut classique est abordé. De plus, nous proposons d'effectuer une analyse des caractéristiques du ressaut classique dans des sections couramment utilisées à savoir les sections rectangulaires et trapézoïdales.

I-2 Rappel historique sur l'évolution de la description du ressaut hydraulique

Ce n'est que vers la fin du 15^{ème} siècle que le ressaut a pu attirer l'attention de l'artiste Italien LEONARD DE VINCI (1452-1519), qui attachait la plus grande importance à l'expérience. Ses études ont porté sur la distribution des vitesses dans les tourbillons, le profil des jets libres, la propagation, la réflexion et l'interférence des ondes et le ressaut.

Au cours des trois siècles qui ont suivi, l'hydraulique expérimentale a fait de très grands progrès. L'Italien GIOVANNI BATTISTA VENTURI (1746-1822), qui a effectué de nombreuses expériences sur les ajutages de diverses formes, a pu exploiter la hauteur de la charge du ressaut dans l'irrigation. L'hydraulicien Italien GIORGIO BIDONE (1781-1839) qui a étudié notamment la contraction et la percussion des jets, et le débit des déversoirs, était le premier à analyser le phénomène du ressaut, avec des nombres de Froude relativement faibles.

GIUSEPPE VENTUROLI (1768-1846) a établi l'équation élémentaire du remous pour des canaux rectangulaires.

Dans la première moitié du 19^{ème} siècle JEAN BAPTISTE BELANGER (1789-1874) a établi l'équation élémentaire du remous et a amélioré l'analyse de BIDONE sur le ressaut hydraulique, en introduisant la notion du débit maximal sur un déversoir à large seuil.

Il a utilisé correctement le théorème de la quantité de mouvement et a obtenu la relation suivante:

$$Y = h_2/h_1 = [(1 + 8 F1^2)^{1/2} - 1]/2 \quad (01)$$

PIERRE VAUTHIER (1784-1847), a complété l'analyse de BELANGER sur le remous et le ressaut, et GASPER-GUSTAVE-CORIOLIS (1792-1843) a introduit dans l'analyse de BELANGER et VAUTHIER le coefficient α , tenant compte de l'inégale répartition des vitesses dans la section transversale du courant.

$$\alpha = 1/(\bar{v}^3 \Omega) \int V^3 d\omega \quad (02)$$

D'autre part, J.A.CHARLES BRESSE (1822-1883) a établi pour la première fois, les caractéristiques du ressaut hydraulique déduites du théorème de la quantité de mouvement.

Vers la fin du 19^{ème} siècle, MERRIMAN (1848-1925), suite à des essais au laboratoire a donné une formule empirique simple pour calculer la hauteur conjuguée.

En grande Bretagne, GIBSON [8] a créé son laboratoire d'hydraulique à Manchester et a réalisé des essais avec un nombre de Froude égal à 8.6 et a confirmé la validité de l'équation de BELANGER en appliquant le théorème de la quantité de mouvement pour déterminer les hauteurs conjuguées. Il a introduit un facteur de correction de non uniformité de la distribution des vitesses.

L'utilisation de l'équation d'énergie dans l'analyse du ressaut hydraulique a été proposée par KININSON [20] au début du 20^{ème} siècle, et a présenté sur un diagramme en termes adimensionnels, le rapport des hauteurs conjuguées en fonction de nombre de Froude.

Ce type de diagramme est toujours utilisé grâce au caractère d'universalité des termes sans dimension.

En 1927, SAFRANEZ [33] a employé les diagrammes adimensionnels pour représenter les résultats des différentes recherches expérimentales. Il a tenté d'établir des relations entre les propriétés du ressaut d'une part, la dissipation d'énergie et la longueur du ressaut d'autre part; le domaine des nombres de Froude s'étend de 1.72 jusqu'à 19.1 [34]. Il est arrivé à formuler l'équation empirique suivante [35]:

$$L_r = 4.5 h_2 \quad (03)$$

BAKHMETEFF et MATZKE [2] ont introduit un facteur cinétique d'écoulement, correspondant au carré du nombre de Froude; leurs essais sur modèle réduit d'un canal ont donné des profils de surface adimensionnels du ressaut alors que les caractéristiques de celui-ci n'ont pas été analysées.

Les essais de BAKHMETEFF et MATZKE ont permis d'aboutir à la relation:

$$\bar{y} = \text{Tanh} (1.5 X) \quad (04)$$

où $X = x/L_r$ est la coordonnée longitudinale rapportée à la longueur du rouleau, $y = (h-h_1)/(h_2-h_1)$ est la coordonnée verticale. Il est à rappeler que h_1 et h_2 sont les hauteurs conjuguées du ressaut.

Il faut également noter que la position aval du ressaut correspond à la valeur $X=1.4$.

Une revue bibliographique est publiée par CITRINI [6] en 1939 dans laquelle il récapitule et critique les expériences réalisées jusqu'alors. Son but était de faire le point sur les connaissances du phénomène du ressaut en faisant les observations suivantes:

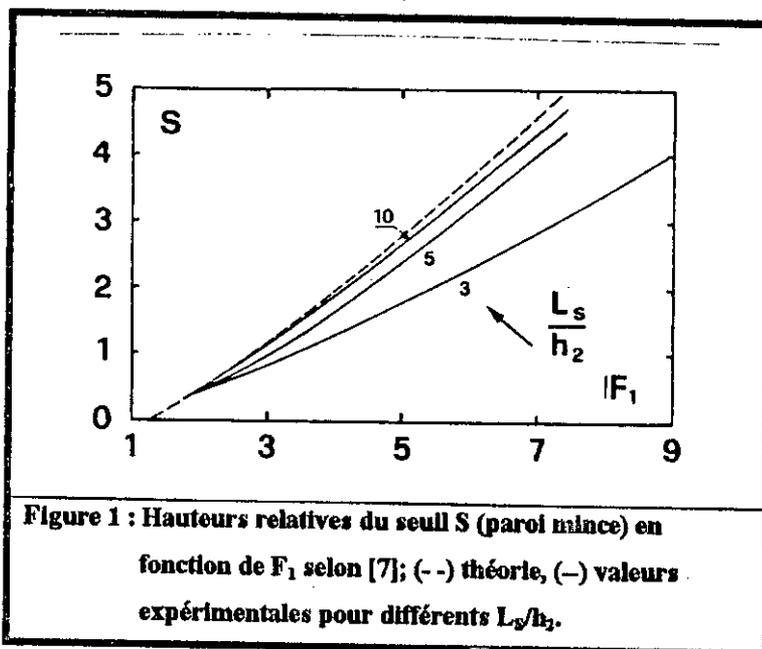
- le principe de la quantité du mouvement est définitivement acquis, pour déterminer les hauteurs conjuguées.
- aucune approche analytique ne s'est vérifiée pour le calcul de la longueur du rouleau souvent préférée à la longueur du ressaut difficilement déterminable. Les formules empiriques basées sur l'expérimentation viennent alors combler cette lacune.

- le concept de dissipation d'énergie a fait son apparition mais néanmoins, les solutions théoriques déjà existantes pour sa quantification n'étaient pas exploitées.

En 1950 FORSTER et SKRINDE [7], ont étudié le seuil à paroi mince pour contrôler le ressaut et fixer sa position dans le canal. Partant de l'hypothèse que le niveau aval d'eau n'a aucune influence sur la formation du ressaut et que le seuil fonctionne comme un déversoir, ils ont développé une équation intrinsèque pour déterminer les hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude amont et de la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$.

Ils ont établi un diagramme exprimant les hauteurs relatives du seuil en fonction du nombre de Froude pour différents rapports L_s/h_2 (L_s étant la distance entre le pied du ressaut et le seuil) en considérant une répartition hydrostatique des pressions et une distribution uniforme des vitesses.

Le diagramme de FORSTER-SKRINDE (figure1) a fait constater que les points expérimentaux s'approchent de la courbe théorique au fur et à mesure que le ressaut est long. Toutefois, dans cette étude l'analyse de l'écoulement interne du ressaut et les principes de dimensionnement ont fait défaut.



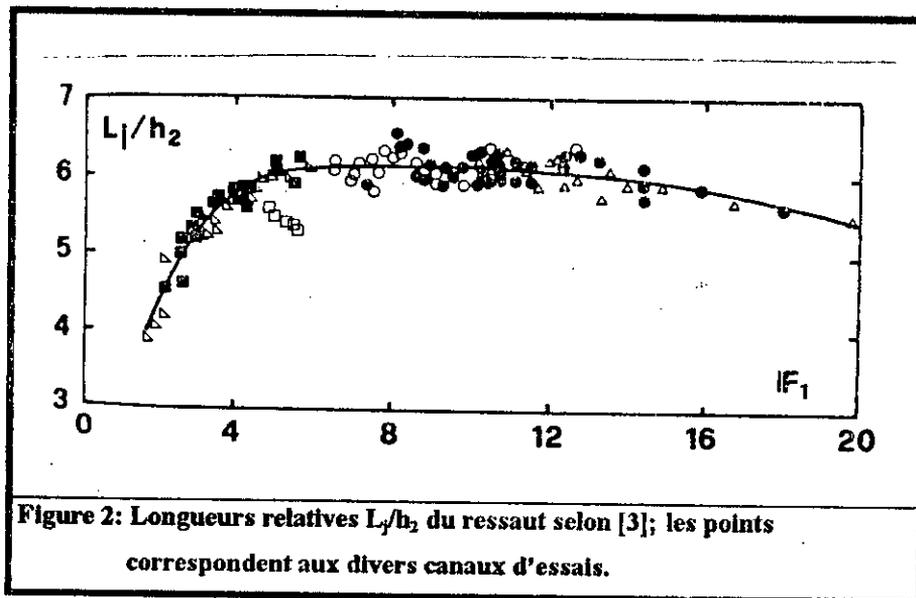
L'hypothèse de l'uniformité des vitesses a été infirmée par WEAVER, après des essais avec plusieurs positions du seuil notamment entre le pied du ressaut et la fin du rouleau.

BRADLEY et PETERKA sont arrivés, après un travail impressionnant publié en 1957 [3] à élaborer une courbe moyenne (figure 2) représentant le rapport de la longueur du ressaut et la hauteur conjuguée aval en fonction du nombre de Froude allant de 1 jusqu'à 14.

La figure 2 montre qu'au delà de $F_1 = 3$ (valeur généralement dépassée en pratique) la longueur du ressaut peut être évaluée par:

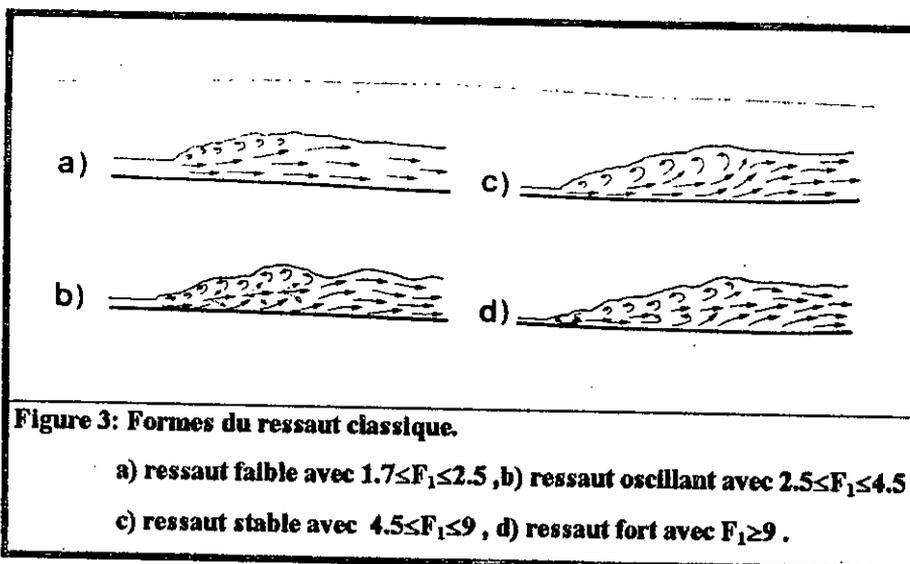
$$L_r = 6h_2 \quad (05)$$

C'est cette dernière relation qui fait définitivement l'unanimité parmi les chercheurs.



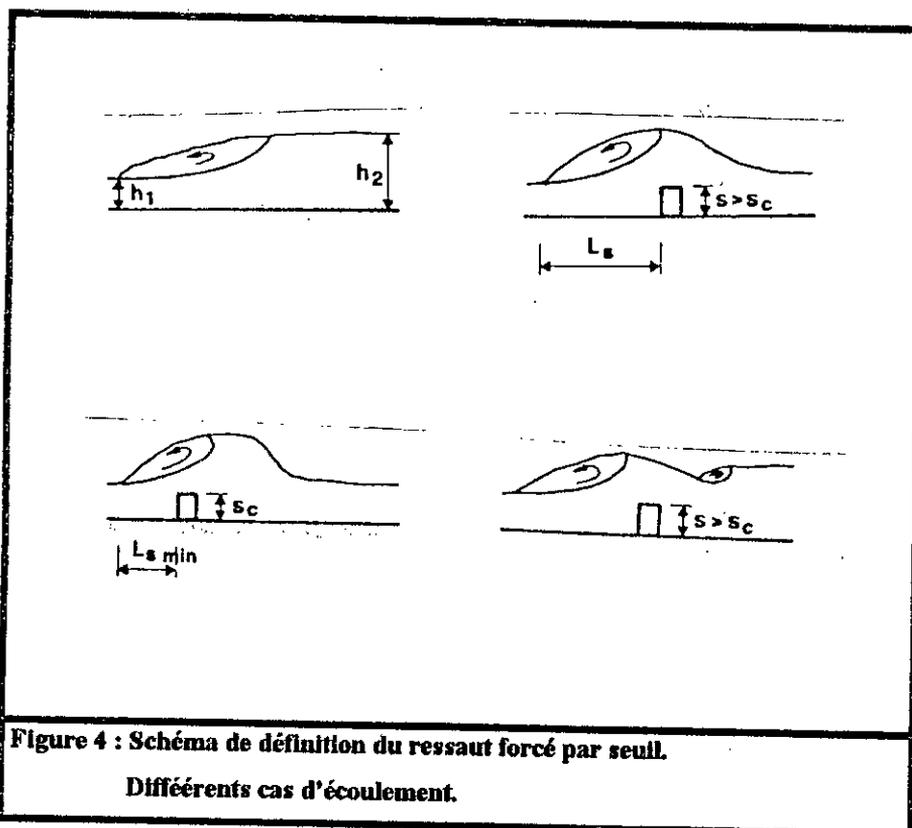
Quatre formes de ressaut étaient distinguées et sont représentées sur la figure 3:

Etude du ressaut hydraulique classique



Selon RAND [29] en 1957, un ressaut forcé par seuil peut se distinguer par la position du seuil par rapport au pied du ressaut (figure 4):

- 1- position minimale en amont $L_{s,min}$
- 2- position intermédiaire L_s
- 3- position maximale en amont $L_{s,max}$



Quatre types d'écoulements se présentent pour le premier cas, trois types pour le deuxième, et deux types pour le troisième. Pour décrire tous ces cas, RAND a défini un facteur de position comme suit :

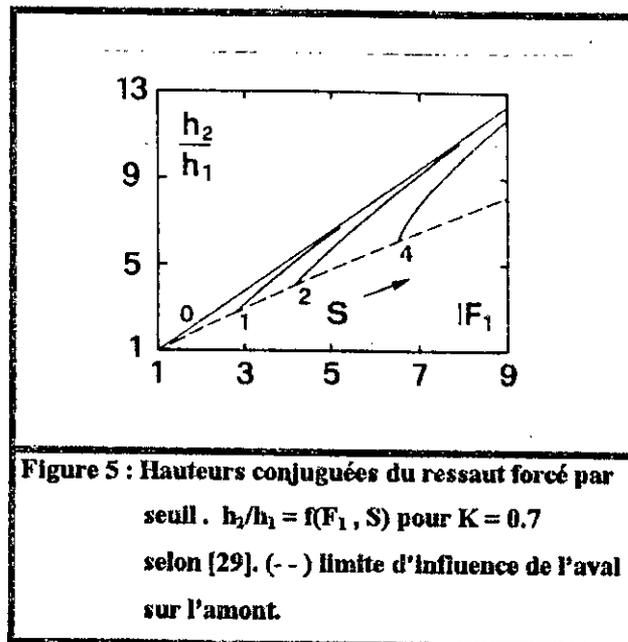
$$K = [(L_s/h_1) - (L_s/h_1)_{\min}] / [(L_s/h_1)_{\max} - (L_s/h_1)_{\min}] \quad (06)$$

K peut varier entre 0, pour le seuil en position minimale, et 1 pour la position maximale.

Dans le même contexte, des diagrammes ont été réalisés, établissant la relation entre le rapport Y des hauteurs conjuguées, amont et aval, et le nombre de froude F_1 pour de différentes valeurs de $S=s/h_1$, et pour cinq valeurs de K.

La figure 5 montre un tel diagramme et fait ressortir que la diminution des hauteurs conjuguées est d'autant plus importante que S est élevé et que l'effet du seuil tend à disparaître lorsque F_1 augmente.

Ces diagrammes permettent de connaître la hauteur du seuil nécessaire pour la formation d'un ressaut préconisé.



CHOW, 1959 dans son livre ``Open-Channel hydraulics`` a fait une représentation du ressaut hydraulique, en faisant appel aux derniers progrès réalisés dans le domaine, mais aucune explication n'a été fournie sur l'écoulement à l'intérieur du ressaut.

En appliquant le théorème de la quantité de mouvement, SILVESTER [36], a déterminé en 1964 les hauteurs conjuguées et l'énergie dissipée pour les ressauts hydrauliques dans les canaux à pente nulle de forme rectangulaire, triangulaire, parabolique, circulaire et trapézoïdale en fonction du nombre de Froude, il s'est avéré que le canal triangulaire présente plus d'efficacité pour un nombre de Froude donné.

MACHA [22] a procédé en 1963 à des mesures des hauteurs conjuguées pour différentes hauteurs de seuil $S \leq 2.5$ (limite pratique), en fonction du nombre de Froude, avec trois positions du seuil par rapport au pied du ressaut en utilisant quatre types de seuil, continus et dentés.

type I : section carrée

type II : section triangulaire, face amont verticale et face aval à 45°

type III : section triangulaire, les deux faces à 45°

type IV : section spéciale, face amont concave et face aval à 45° .

Dans son travail, MACHA a révélé que l'effet du seuil augmente avec le nombre de Froude (figure 7) et que cette tendance est donc, contraire à celle des résultats de RAND.

L'efficacité des seuils continus et leurs capacités à réduire le niveau aval est dans l'ordre d'importance suivant:

1- seuil type IV

2- seuil type I et II

3- seuil type III

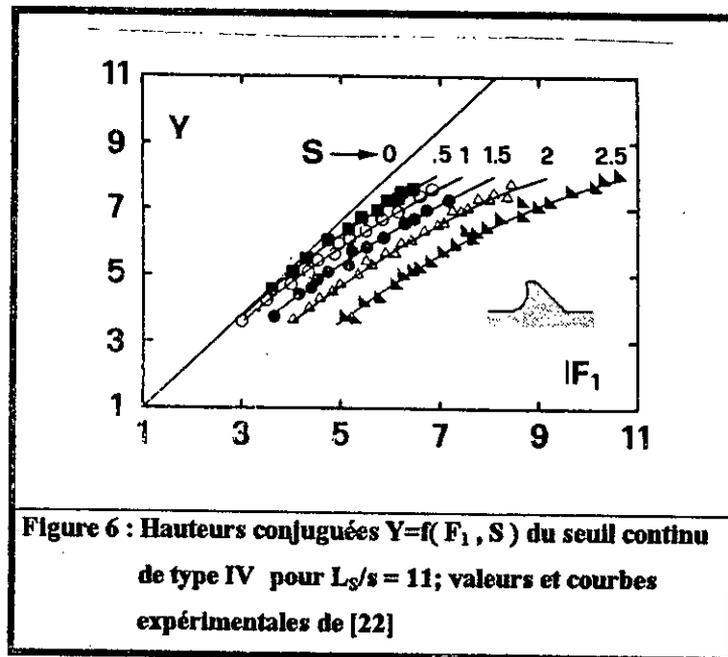
Il a été constaté dans ces travaux que:

- Aucune limite inférieure n'a été donnée pour les différents seuils S .

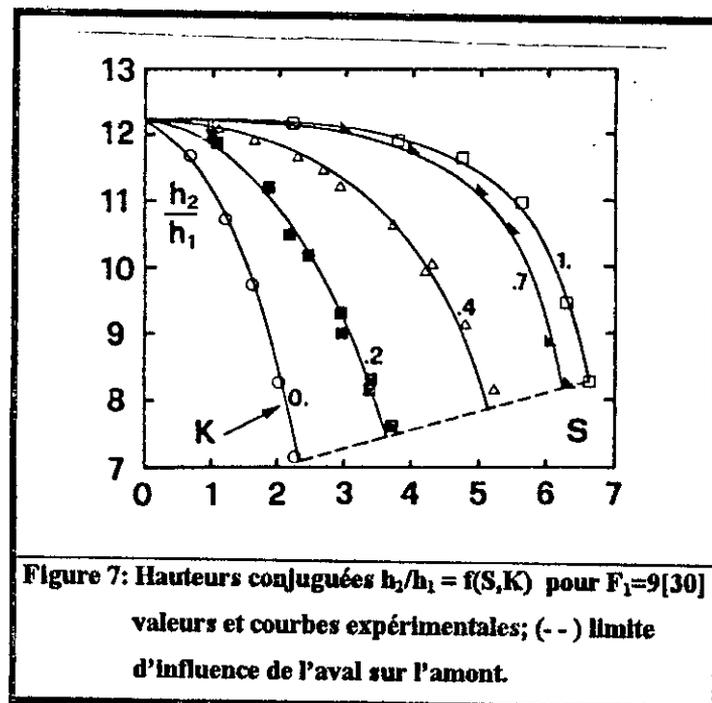
- L'effet du frottement sur la pente du radier entre la vanne et le pied du ressaut est négligé.

- Il n'y a pas de distinction entre les différents types d'écoulement.

(les distances entre le pied du ressaut et le seuil sont imposées) (figure 6).

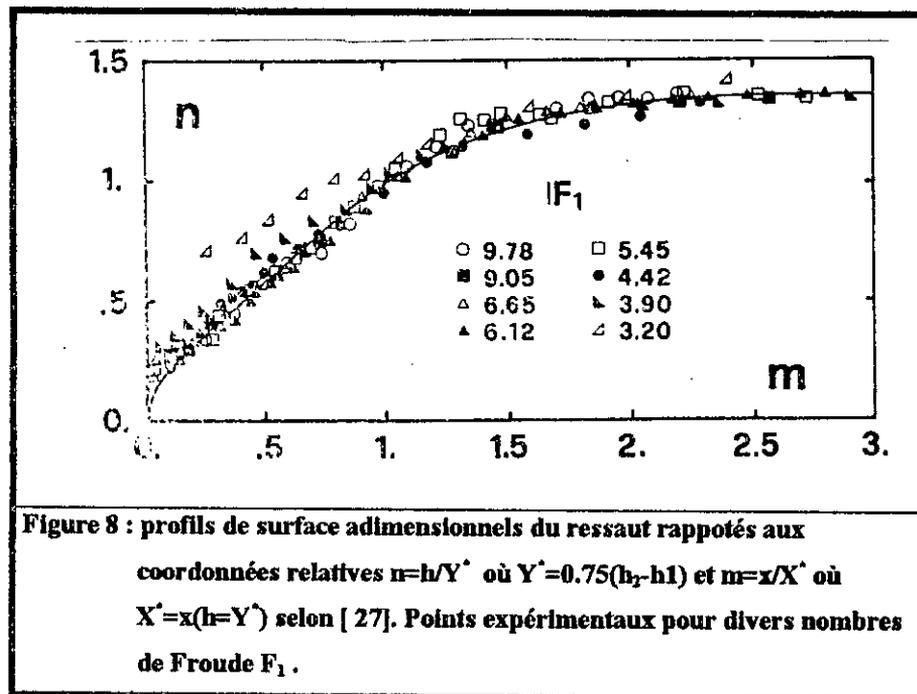


Les diagrammes de ROLAND de 1957 ont été repris par le même auteur en 1965, en réalisant des essais dans un canal avec une vanne plane; le but est d'établir un diagramme qui exprime la relation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$, pour différentes valeurs de K et un nombre de Froude $F_1 = 9$ comme est représenté dans la figure 7:



De nombreux types de ressaut ont fait l'objet d'une analyse par RAJARATNAM en 1967 [26], il s'agissait du ressaut classique, ressaut noyé, ressaut forcé, ressaut sur pente, ressaut préentraîné, ressaut dans des canaux rectangulaires, ressaut dans des conduites, ressaut dans des canaux non prismatiques, ressaut dans des écoulements stratifiés et le ressaut dans les fluides rotationnels.

Une année plus tard, le même auteur a fait une autre analyse des données de plusieurs auteurs concernant, notamment les profils de surface du ressaut [27]. Après plusieurs essais, il est arrivé à représenter la courbe du profil moyen (figure 8):



La période entre 1968 et 1974 a connu plusieurs recherches sur le ressaut hydraulique. En effet, RAJARATNAM a étudié le ressaut dans les canaux rugueux [28] et HERBRAND a montré que l'influence de l'air contenu dans l'écoulement est négligeable sur la formation du ressaut [18] alors que RESCH et LEUTHEUSSER en 1971 [31] et 1972 [32] ont fait des mesures de turbulence et de tension de Reynolds.

Vers la fin de 1974 KHDER et ELANGO [21] ont pris des mesures de pressions dynamiques au fond du bassin d'amortissement .

Le ressaut hydraulique continu de faire l'objet de nombreux travaux de recherches, bien que beaucoup de ses caractéristiques n'ont pas jusqu'alors connues une mise en équation et le sujet du ressaut n'a pas été épuisé.

Au cours de cette dernière décennie, de nombreux travaux ont porté sur le ressaut sous ses aspects les plus divers.

HAGER en 1985 [9], a proposé une analyse du ressaut dans un canal horizontal de section rectangulaire non prismatique, dans laquelle il a présenté des relations des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude et du rapport des largeurs correspondantes (figure 9).

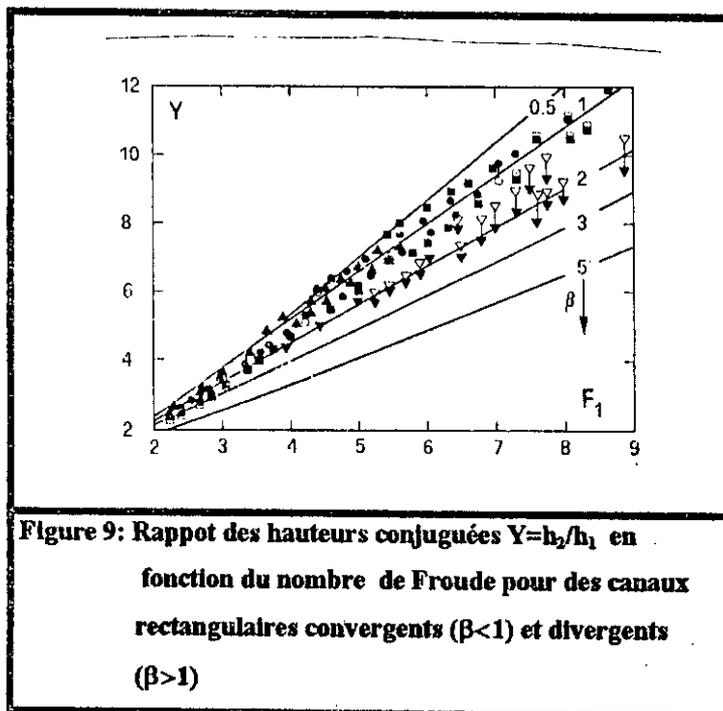


Figure 9: Rapport des hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude pour des canaux rectangulaires convergents ($\beta < 1$) et divergents ($\beta > 1$)

Il faut noter que la dissipation relative d'énergie a fait l'objet d'un travail de laboratoire, dont le résultat était une représentation graphique de la perte de charge relative en fonction du nombre de Froude et du rapport $\beta = b_2/b_1$, ces graphes sont représentés sur la figure 10.

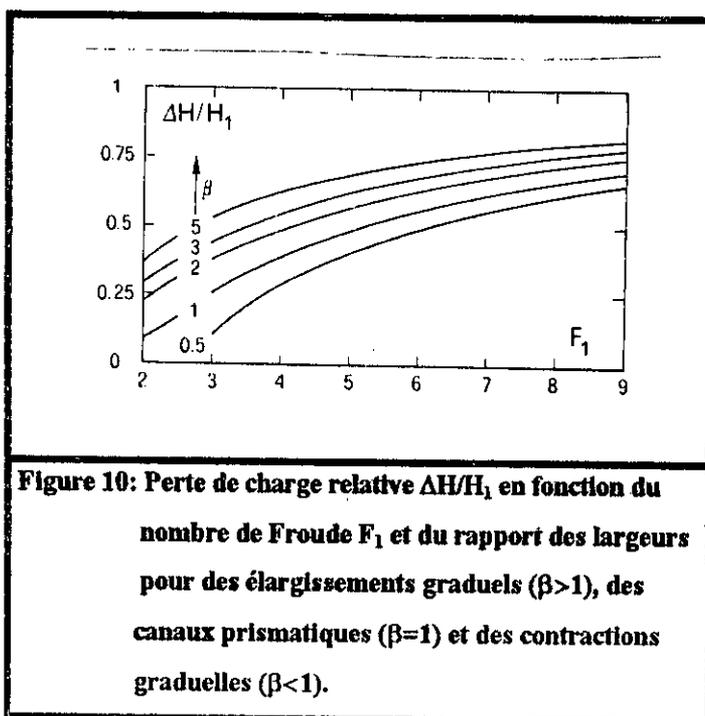


Figure 10: Perte de charge relative $\Delta H/H_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 et du rapport des largeurs pour des élargissements graduels ($\beta > 1$), des canaux prismatiques ($\beta = 1$) et des contractions graduelles ($\beta < 1$).

Dans des travaux relativement récents [10], concernant le ressaut de type A par-dessus des marches positives et négatives (figure 11), HAGER et BRETZ ont examiné les positions extrêmes pour permettre le dimensionnement du bassin amortisseur, en particulier les hauteurs conjuguées et les caractéristiques de la longueur de la formation d'ondes.

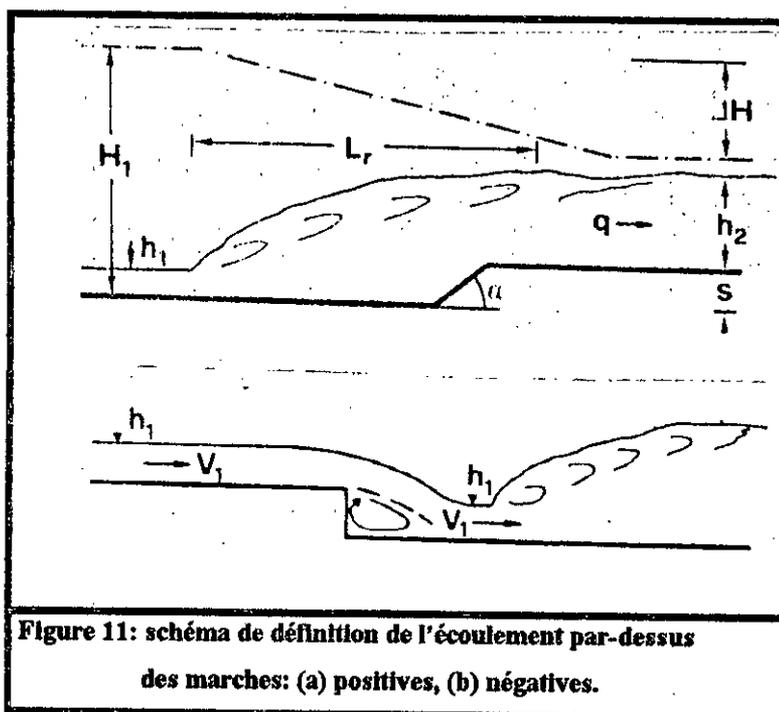
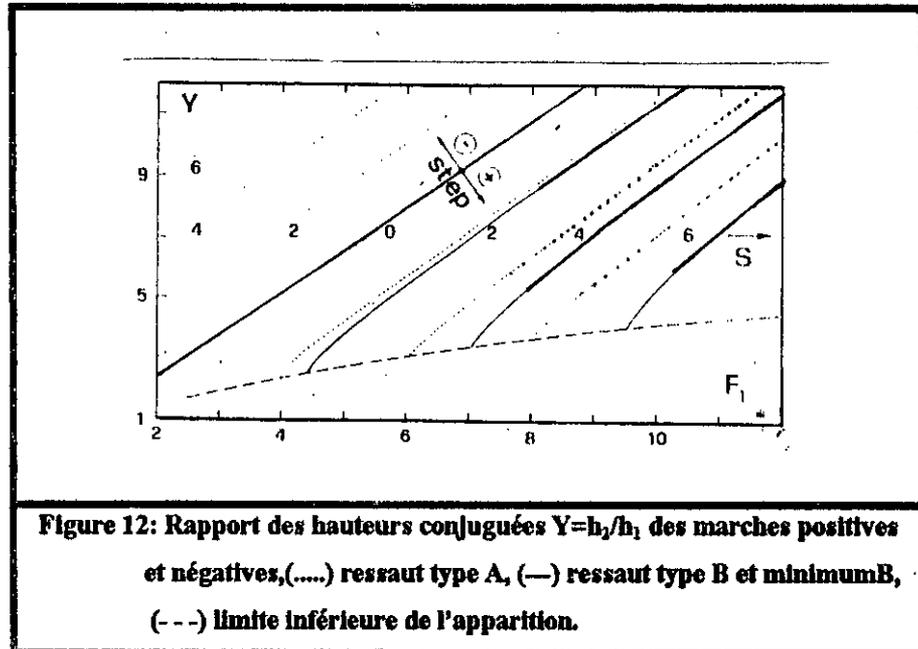


Figure 11: schéma de définition de l'écoulement par-dessus des marches: (a) positives, (b) négatives.

La figure 12 montre la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude pour des marches positives et négatives et pour différentes hauteurs relatives des marches.



Les relations suivantes ont été proposées:

Marche positive:

1) Cas du ressaut type A:

$$F_1^2 = [Y((Y+S)^2 - 1)]/[2(Y-1)] \quad (07)$$

où $Y=h_2/h_1$, $S=s/h_1$ et $F_1^2 = q^2/(gh_1^3)$

2) Cas du ressaut type B:

$$F_1^2 = [Y((Y+S)^2 + S^2 - 1)]/[2(Y-1)] \quad (08)$$

Marche négative:

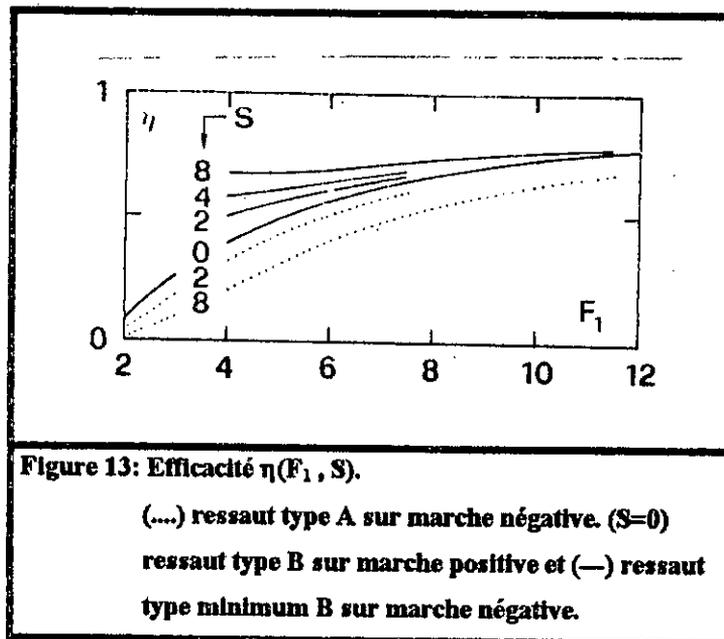
1) Cas du ressaut type A:

$$F_1^2 = [Y((Y-S)^2 - 1)] / [2(Y-1)] \quad (09)$$

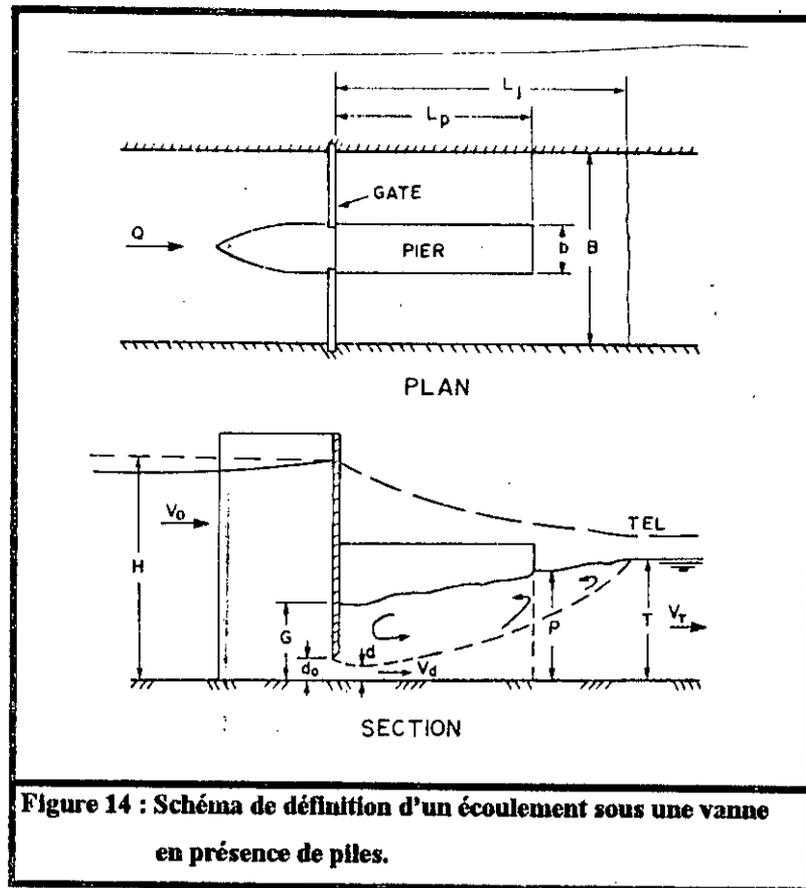
2) Cas du ressaut type B:

$$F_1^2 = [Y(Y-S^2 - 1)] / [2(Y-1)] \quad (10)$$

Le rendement du ressaut dans des marches positives et négatives a été également considéré dans la figure 13:



L'apparition d'un ressaut noyé dans un élargissement brusque [37] a été étudiée par C.D.SMITH en 1989, qui a posé le problème du dimensionnement d'un ouvrage avec une vanne de régulation dans un canal en présence des piles dans l'écoulement (Figure 14):



L'étude du ressaut hydraulique dans un canal profilé en U a été réalisée par HAGER [13]. Le profil étudié est constitué à sa base par un demi-cercle surmonté de deux parois verticales. A partir des résultats expérimentaux, l'auteur est arrivé à établir une relation de la longueur du ressaut presque identique à celle de RAJARATNAM (1967) pour une section rectangulaire (figure 15):

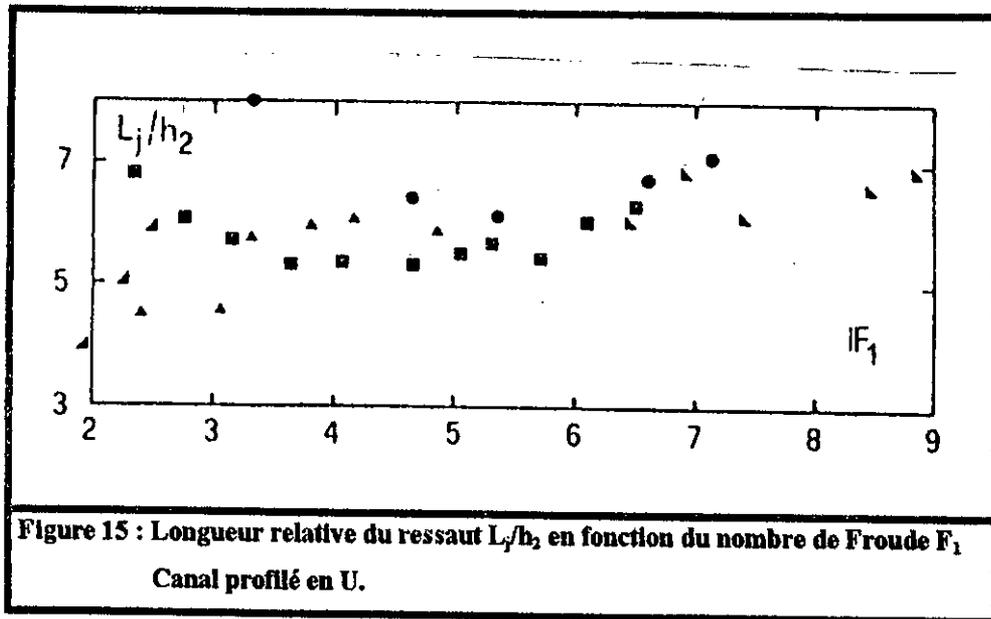


Figure 15 : Longueur relative du ressaut L_j/h_2 en fonction du nombre de Froude F_1
Canal profilé en U.

Cette étude a montré que le ressaut hydraulique dans une section en U se comporte comme:

- dans une section circulaire pour $h_2 < D/2$
- dans une section rectangulaire si le ressaut se produit entre les parois verticales.

La longueur relative du ressaut peut être exprimée par la relation:

$$L_j/h_2 \cong 6 \quad (11)$$

L'étude des hauteurs conjuguées dans le ressaut classique a été proposée par HAGER et BREMEN [14]; cette étude a été consacrée à l'influence des caractéristiques géométriques de l'écoulement, ainsi que le nombre de Reynolds sur les hauteurs conjuguées.

Cette influence est exprimée par la relation suivante:

$$Y = Y_0 [1 - 3.25\omega \cdot \exp(F_1/7) \cdot (\text{Log } R_1^*)^{-3}] \quad (12)$$

où $Y = h_2/h_1$, $Y_0 = h_2/h_1$ pour $\omega = 0$, $\omega = h_1/b$ et R_1^* est le nombre de Reynolds modifié.

Une autre étude, concernant le ressaut classique a été entreprise par HAGER, BREMEN et KAWAGOSHI [15] dans laquelle une attention particulière a été donnée à la longueur du rouleau et du ressaut et des relations pour le dimensionnement ont été proposées, parmi lesquelles, l'expression de la longueur relative du rouleau:

$$\lambda_r = 8 (F_1 - 1.5) \quad (13)$$

pour $2.5 < F_1 < 8$

Par ailleurs, le ressaut de type B dans un canal à pente amont variable et une pente nulle en aval a été examiné par HAGER et KAWAGOSHI [19] (figure 16):

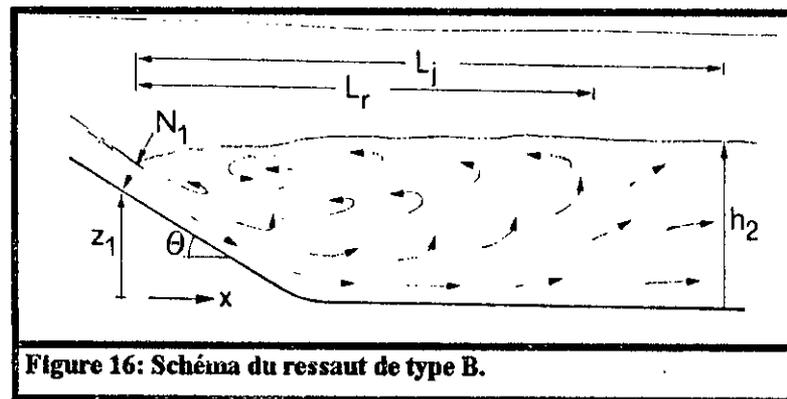


Figure 16: Schéma du ressaut de type B.

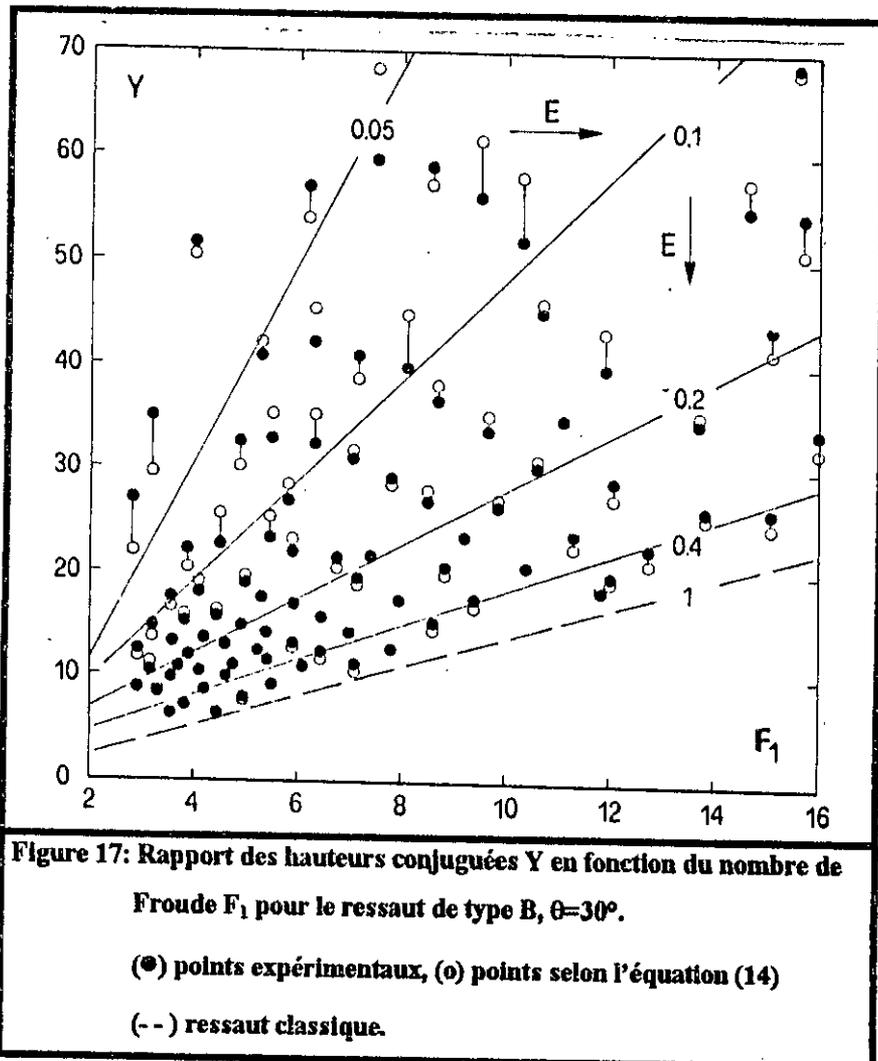
Cette analyse a concerné notamment les hauteurs conjuguées, la longueur du ressaut et la longueur du rouleau ainsi que le champ de vitesse à deux dimensions.

Pour exprimer le rapport des hauteurs conjuguées, HAGER et KAWAGOSHI ont établi la relation suivante:

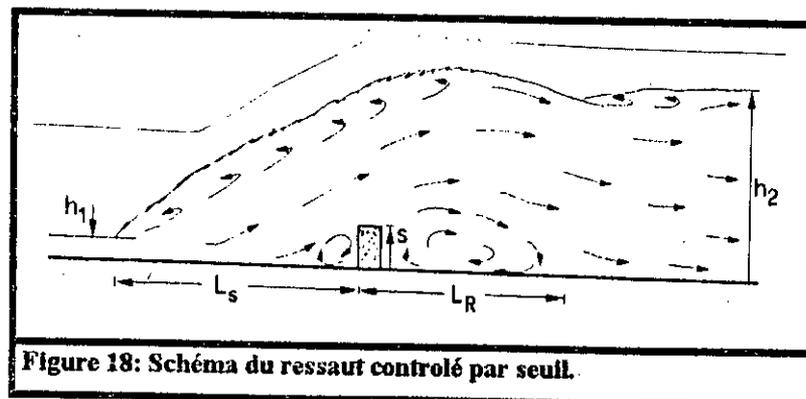
$$Y = 3.75 E^{-0.575} + [\sqrt{2} (F_1 - 3)] / \text{Tanh}(3E) \quad (14)$$

où $E = (h_2 - z_1) / h_2$

La figure 17 représente le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 , d'une part pour le ressaut de type B avec des valeurs expérimentales et des valeurs théoriques selon l'équation (14) et d'autre part pour le ressaut classique ($E=1$).



Nous citons également le récent développement des méthodes d'approche des caractéristiques principales du ressaut hydraulique à travers les travaux présentés par HAGER et DAEI Li en 1992 [16], concernant les dissipateurs d'énergie contrôlés par seuil (Figure 18):



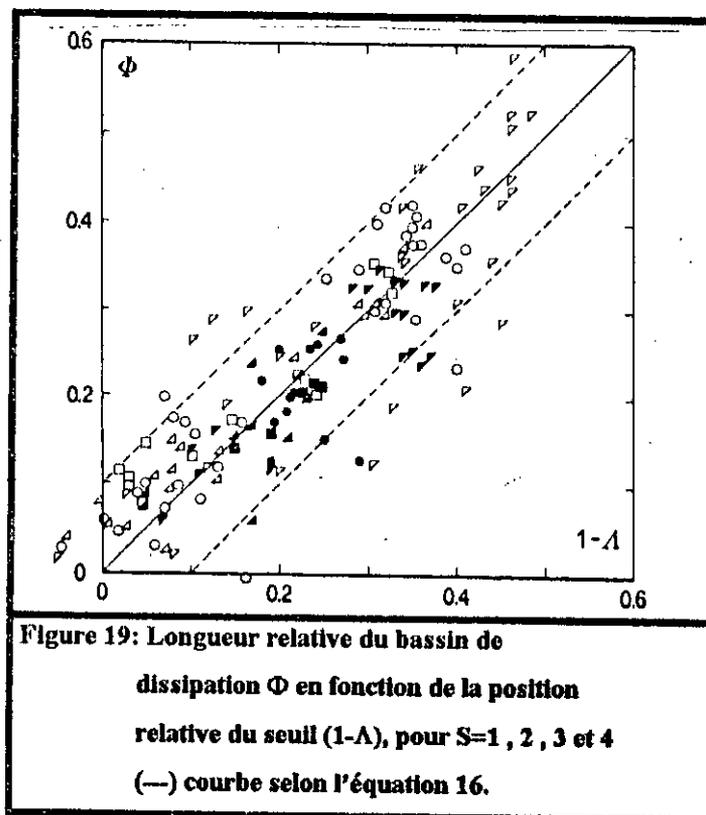
Cette étude a abouti à une équation exprimant la longueur relative du bassin de dissipation par rapport à la longueur du rouleau L_r :

$$\Lambda_B = (4/3) [1 - 0.6 S^{1/3} (1 - \Lambda)] \quad (15)$$

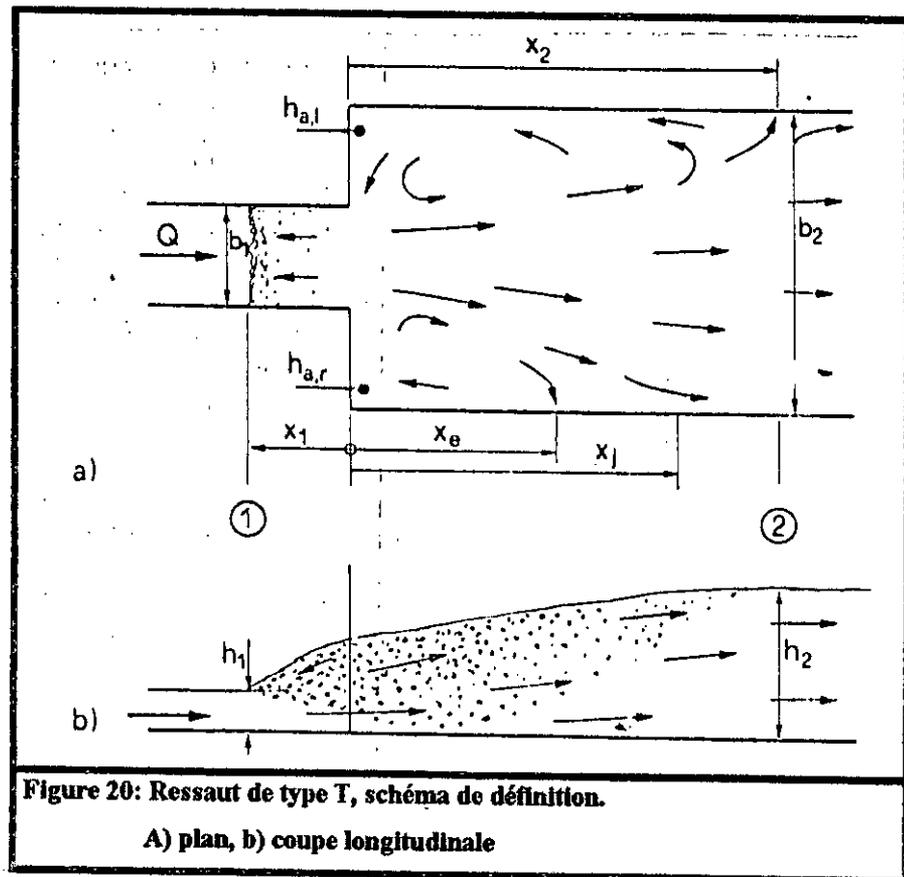
où $S = s/h_1$, $\Lambda = L_r/L_r^*$ et L_r^* est la longueur du rouleau pour un ressaut classique.

La figure 19 représente la variation de la longueur relative du bassin de dissipation Φ en fonction de la position relative du seuil Λ pour les ressauts de type A et B et pour différentes valeurs de S . L'expression de Φ est donnée comme suit:

$$\Phi = [1 - (3/4)\Lambda_B](0.6 S^{1/3})^{-1} \quad (16)$$



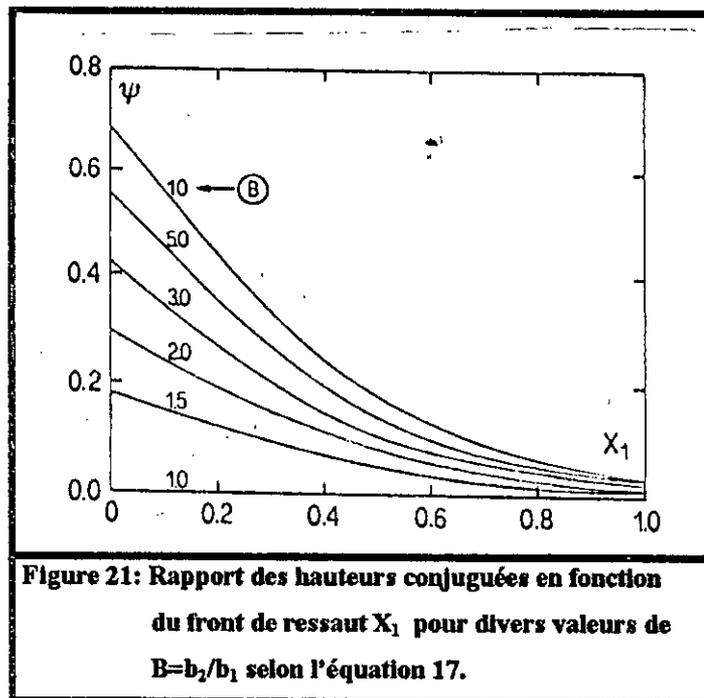
Le ressaut de type T dans un canal avec élargissement brusque a fait l'objet d'une étude proposée en 1993 [4] par HAGER et BREMEN (figure 20).



Dans cette étude, la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du front de ressaut X_1 pour divers élargissements B a été établie. Cette variation est représentée sur la figure 21 pour différentes valeurs de B et selon la relation suivante:

$$\psi = (Y^* - Y)/(Y^* - 1) = (1 - B^{-1/2})[1 - \text{Tanh}(1.9X_1)] \quad (17)$$

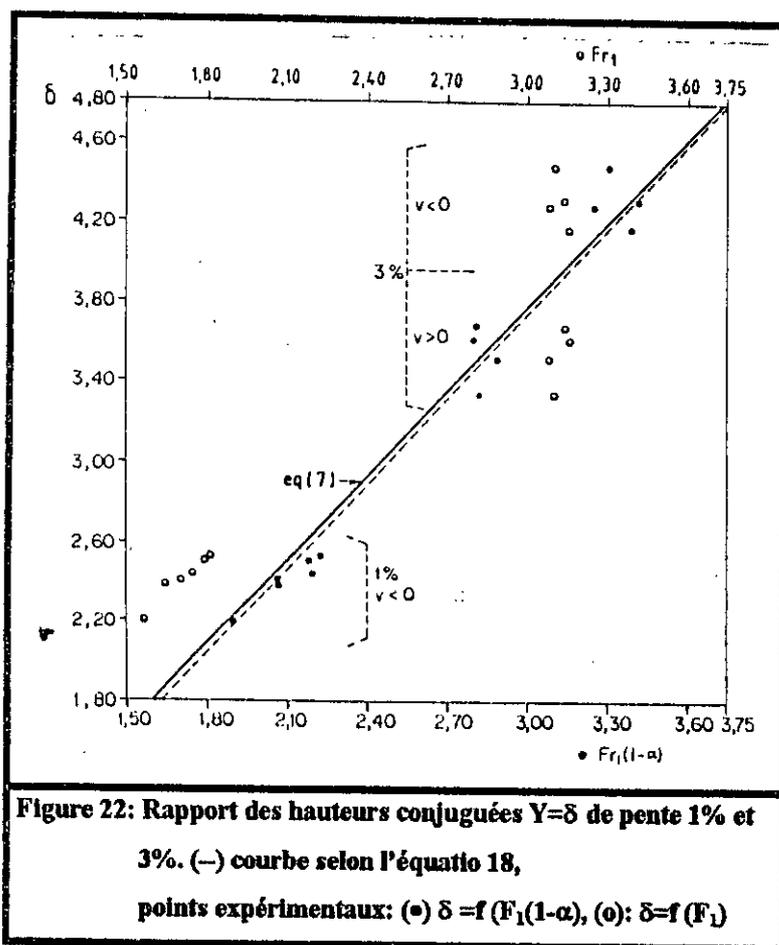
où $X_1 = x_1/L_r^*$, L_r^* et Y^* étant respectivement la longueur du rouleau et le rapport des hauteurs conjuguées pour un ressaut classique.



La cinématique du ressaut mobile présentée par le groupe de chercheurs: Martin VIOE , DOLZ et DEL ESTAL [23]. En 1993, cette dernière étude a été consacrée à analyser les caractéristiques cinématiques de la propagation du ressaut à savoir, la position du ressaut, la vitesse et les hauteurs conjuguées au cours de la propagation vers l'amont ou vers l'aval. L'équation suivante a été déduite:

$$Y = \frac{[(1+8F_1^2(1-\alpha)^2)^{1/2} - 1]}{2} \quad (18)$$

Le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de $F_1(1-\alpha)$ pour des pentes de 1 et 3%, le rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 ainsi que la courbe théorique selon l'équation (18) sont représentés sur la figure 22:



Au cours de l'année 94, une étude du ressaut dans des canaux en contre pente est entreprise par MC.CORQUODALE et M.S.MOHAMED [24] (figure 23). Ce travail, basé sur les résultats expérimentaux, a montré que le ressaut est difficilement établi pour des nombres de Froude inférieurs à 9 et en notant que la profondeur conjuguée de même que la longueur du rouleau sont, dans le cas du ressaut à contre pente, plus faibles que pour le ressaut à fond horizontal de mêmes conditions d'approches.

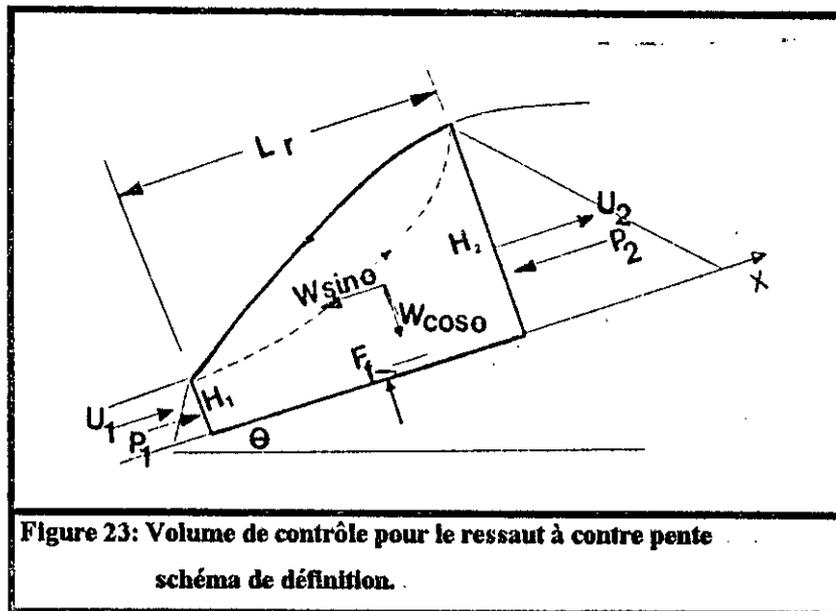


Figure 23: Volume de contrôle pour le ressaut à contre pente
schéma de définition.

Une théorie basée sur la quantité de mouvement est présentée et une relation empirique de la longueur du rouleau est donnée:

$$L_r/H_1 = (C_0 + C_1 \sin\theta + C_2 \sin^2\theta) (F_1 - 2) + D_1 (1 + D_2 \sin^4\theta) \quad (19)$$

où C_0 , C_1 , C_2 , D_1 et D_2 sont des constantes empiriques dont les valeurs sont données en fonction du nombre de Froude F_1 .

$$C_0=7.25 ; C_1=20.8 ; C_2=5 ; D_1=5 ; D_2=50 \quad \text{pour } F_1 < 9$$

$$C_0=7.2 ; C_1=21 ; C_2=19 ; D_1=7.7 ; D_2=175 \quad \text{pour } 9 < F_1 < 13$$

I-3 Caractéristiques du ressaut hydraulique classique

I-3-1 Cas du canal trapézoïdal

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

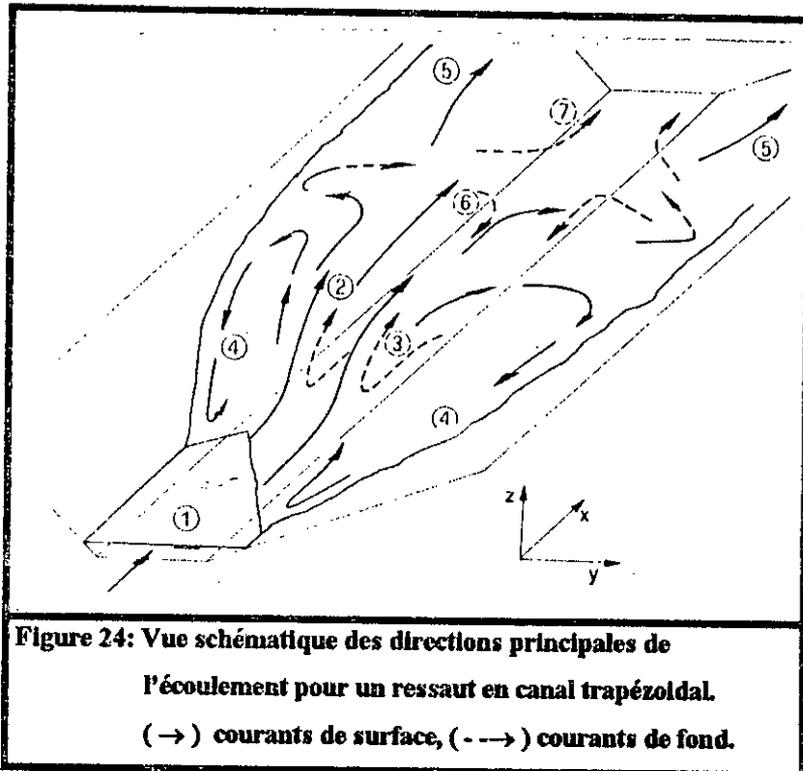
I-3-1-1 Configuration de l'écoulement dans un canal trapézoïdal

Comparé au ressaut hydraulique en canal rectangulaire prismatique, couramment utilisé (ressaut classique), la configuration de l'écoulement pour le ressaut en canal trapézoïdal est relativement différente. Ce ressaut est caractérisé par des vitesses élevées, des jets du fond et un rouleau de surface très étendu.

La figure 24 montre une vue schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut dans un canal trapézoïdal [38].

La vitesse considérable (1), provoque des élévations du courant liquide et forme une zone d'éclaboussement (jaillissement) (2) due à la présence d'une zone de séparation au fond du canal (3). Le flux principal se produit près de la surface de l'eau et diverge progressivement aux cotés des parois; ce phénomène est due à la concentration de l'écoulement au centre de la section et à la pression résultante le long des parois.

Une première partie du courant sur les côtés se produit à l'envers et forme la zone de l'écoulement en retour (4), sur les deux cotés du canal, une deuxième partie du courant reste en surface et se dirige vers l'aval (5). Une troisième partie du courant liquide se manifeste au fond du canal, ce que représente le rouleau du fond (6); ce rouleau reste sans influence sur le courant aval (7).



En effet, le ressaut en canal trapézoïdal engendre l'apparition de différentes zones d'écoulement et la présence du rouleau du fond représente la différence principale avec le ressaut classique.

Le ressaut en canal trapézoïdal [38] est caractérisé également par :

- Des vitesses relativement réduites sur toute la longueur du fond du canal.
- La direction principale du courant s'oriente vers la surface et diverge par la suite aux cotés des parois du canal.
- La vitesse maximale apparaît le long des parois près de la surface libre.

I-3-1-2 Rapport des hauteurs conjuguées

L'aire A de la section mouillée de l'écoulement dans un canal trapézoïdal s'exprime par: $A = bh + mh^2$, où b est la base de la section, h la hauteur d'eau et m la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du trapèze.

Si on considère une distribution uniforme des vitesses et que la pression est hydrostatique dans les sections transversales 1 et 2 de part et d'autre du ressaut, l'application du théorème de la quantité de mouvement donne:

$$bh_1^2/2 + mh_1^3/3 + Q^2/[g(bh_1+mh_1^2)] = bh_2^2/2 + mh_2^3/3 + Q^2/[g(bh_2+mh_2^2)] \quad (20)$$

Avec ,

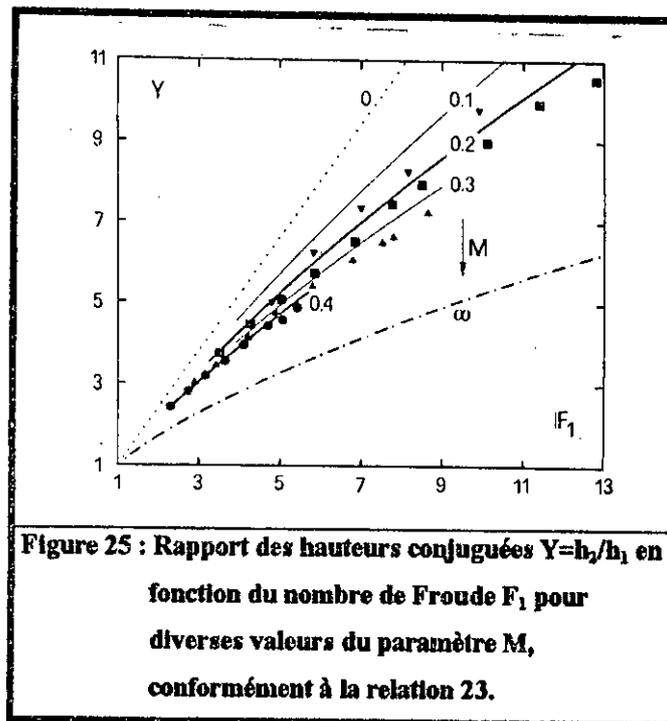
$$F_1^2 = Q(b+2mh_1)/[g(bh_1+mh_1^2)] \quad (21)$$

et $Y = h_2/h_1$, $M = mh_1/b$ (22)

L'équation (20) se transforme en:

$$F_1^2 [1 - (1+M)/Y(1+MY)] = [(1+2M)/2(1+M)^2] [Y^2(1+2MY/3) - (1+2M/3)] \quad (23)$$

La courbe supérieure et la courbe inférieure dans la figure 25 qui correspondent respectivement à la section rectangulaire ($M=0$) et à la section triangulaire ($1/M=0$), peuvent être considérées comme des courbes enveloppes entre lesquelles les courbes des sections trapézoïdales ($M=mh_1/b$) doivent se situer.



Ainsi, pour la section rectangulaire $M=0$, la relation (23) aboutit à l'équation de BELANGER:

$$Y = [(1 + 8F_1^2)^{1/2} - 1] / 2 \quad (01)$$

pour la section triangulaire $1/M=0$, l'équation régissant le ressaut dans un canal triangulaire symétrique est reproduite:

$$F_1^2 = [2Y^2(Y^2 + Y + 1)] / [3(Y - 1)] \quad (24)$$

Pour des nombres de Froude amont $F_1 > 3$, HAGER [12] propose des relations simplifiées aux équations (01) et (24):

$$\begin{aligned}
 Y &= \sqrt{2} F_1 - 1/2 && \text{pour } M=0 \\
 Y &= (3/2 F_1^2 - 1)^{1/3} && \text{pour } 1/M=0
 \end{aligned} \quad (25)$$

On peut noter ainsi que pour le canal rectangulaire $Y \sim F_1$, tandis que pour le canal triangulaire $Y \sim F_1^{2/3}$.

I-3-1-3 Longueur du rouleau

La particularité du ressaut en canal trapézoïdal est l'apparition d'un rouleau de fond pour des nombres de froude $F_1 > 4$ [38].

Les dimensions de ce type de rouleau pourra être données par les grandeurs suivantes:

L_u : distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau du fond;

L_b : longueur du rouleau du fond;

h_b : hauteur maximale du rouleau du fond, (figure 26)

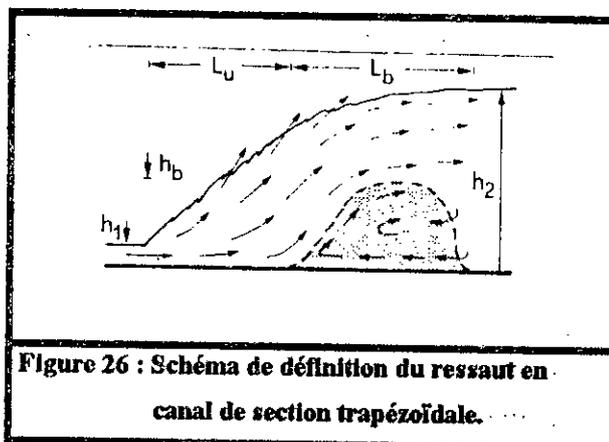


Figure 26 : Schéma de définition du ressaut en canal de section trapézoïdale.

La détermination expérimentale exacte du début et la fin du rouleau du fond est assez délicate à cause de la grande turbulence qui caractérise l'écoulement.

A partir des graphiques de la figure 27, les observations suivantes sont tirées:

- La fourchette des valeurs de λ_u est restreinte, $2 < \lambda_u < 4$;
- Pour F_1 donné, λ_u est directement proportionnelle à M ;
- La valeur de λ_b peut aller jusqu'à 8;
- λ_b est inversement proportionnelle à M ;
- On remarque un maximum pour la fonction $\lambda_b = f(F_1)$;

Etude du ressaut hydraulique classique

- La fin du rouleau de fond ($\lambda_u + \lambda_b$) est indépendante de M et elle augmente avec le nombre de Froude F_1 à un maximum de 10.5 environ;
- La hauteur relative maximale h_b/h_2 du rouleau du fond augmente avec F_1 à une limite supérieure de 0.6 à 0.7;
- Pour F_1 donné, h_b/h_2 augmente avec M .

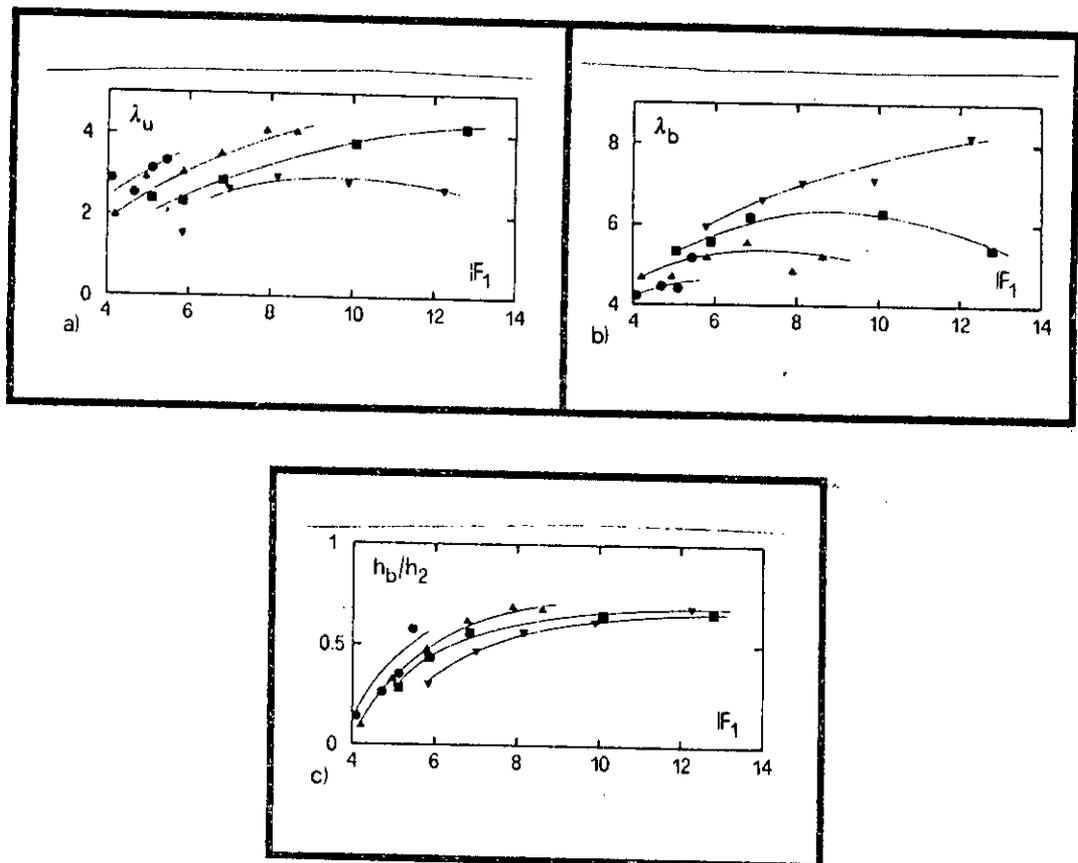


Figure 27: Caractéristiques principales du rouleau du fond: a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximale adimensionnelle h_b/h_2 en fonction de F_1 et de M .

I-3-1-4 Rendement du ressaut hydraulique

Soit la dissipation relative d'énergie:

$$\eta = \Delta H / H_1 \quad (26)$$

avec $H_1 = h_1 + v^2 / 2g \quad (27)$

et $\Delta H = H_1 - H_2 \quad (28)$

En appliquant l'équation de Bernoulli, la dissipation relative d'énergie est aisément déterminée, sera donnée par la relation suivante:

$$\eta = 1 - [Y + F_1^2 / 2Y^2 ((1+M)^3 / ((1+2M)(1+MY)))] / [1 + (F_1^2 / 2) ((1+M) / (1+2M))] \quad (29)$$

La substitution de l'équation (23) dans l'équation (29) donne la fonction:

$$\eta = \eta(F_1, M) \quad (30)$$

Cette fonction est représentée sur la figure 28, et montre que pour $F_1 > 2.5$ [12]:

$$\eta(M=0) < \eta(M) < \eta(M \rightarrow \infty) \quad (31)$$

Ces inégalités montrent que pour un même nombre de Froude, le rendement du ressaut triangulaire est plus élevé que celui du rectangulaire et du trapézoïdal. Comparé au rendement du ressaut rectangulaire, le rendement du ressaut triangulaire est environ 10% plus important.

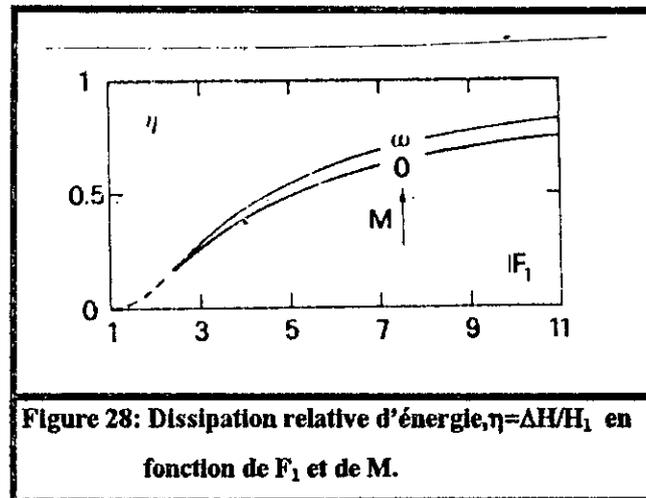


Figure 28: Dissipation relative d'énergie, $\eta = \Delta H / H_1$ en fonction de F_1 et de M .

D'autre part, HAGER et SINNINGER [22] proposent des relations simplifiées de l'équation (29)

$$\eta = (1 - \sqrt{2} / F_1)^2 \quad \text{pour } M=0, \text{ (cas du rectangle)} \quad (32)$$

et

$$\eta = [1 - (12 / F_1^4)^{1/3}]^2 \quad \text{pour } 1/M=0, \text{ (cas du triangle)} \quad (33)$$

I-3-2 Cas du canal rectangulaire

Ce qui reste à résoudre dans l'avenir pour le ressaut hydraulique classique, c'est l'incertitude dans la détermination des caractéristiques de la longueur du ressaut, quoique le rapport des hauteurs conjuguées a été déduit depuis plus d'un siècle.

I-3-2-1 Longueur du rouleau

Les caractéristiques de l'écoulement pour le ressaut classique sont:

$$h_1, F_1 = Q(gb^2h_1^3)^{-1/2}, R_1^* = Q/(bv)^{-1} \text{ et } \omega = h_1/b$$

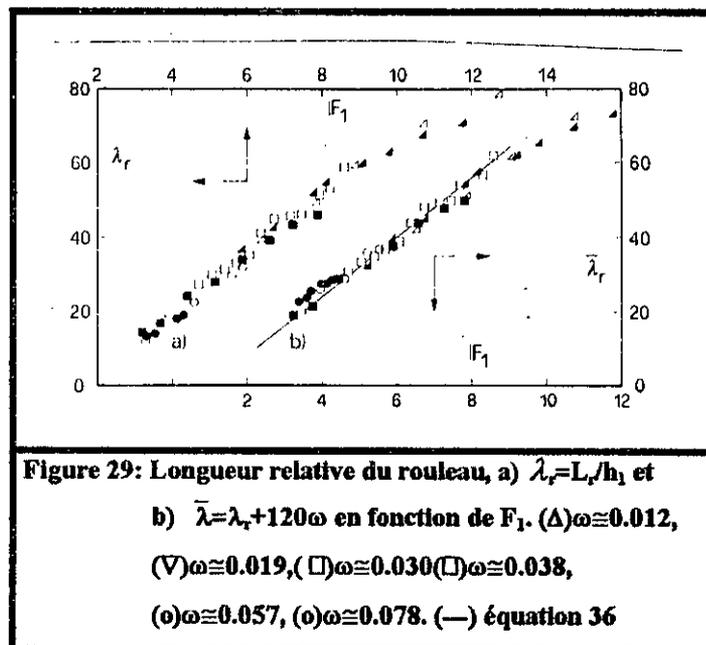
Ces grandeurs représentent respectivement: la hauteur conjuguée amont, le nombre de Froude, le nombre de Reynolds modifié et le rapport d'aspect de l'écoulement.

$$\text{Avec} \quad R_1 = 4/(1+2\omega)R_1^* \quad (34)$$

On a admis une influence de R_1^* et de ω sur la longueur relative du rouleau λ_r , ce qui nous permet d'écrire:

$$\lambda_r = f(F_1, R_1^*, \omega) \quad (35)$$

Par ailleurs la courbe de la figure 29 permet d'observer les phases suivantes:



- Les courbes $\lambda_r(F_1)$, pour chaque valeur de ω commencent presque linéaire, ensuite elles changent de forme avec l'augmentation de F_1 ;
- Pour des nombres de Froude $F_1 < 8$ et quelque soit ω , les courbes $\lambda_r(F_1)$ sont presque identiques avec $d\lambda_r/dF_1 \cong 8$.

- La valeur de $\lambda_r(F_1=1)$ est maximale pour une valeur minimale de ω ;
- Aucun effet systématique de R_1^* sur $\lambda_r(F_1)$.

La valeur de $\lambda_r(F_1=1)$ est évaluée pour tout ω :

soit $\lambda_r(F_1=1) \cong -120\omega$ pour $3 < F_1 < 8$ et $0.015 < \omega < 0.08$;

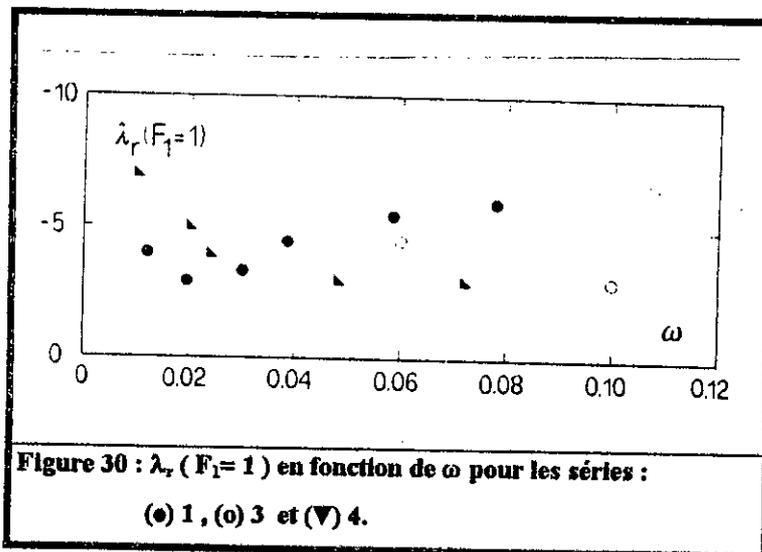
Ainsi, on peut écrire [15]:

$$\lambda_r = 8(F_1 - 1) - 120\omega \quad (36)$$

L'analyse de la fonction $\lambda_r(F_1)$, pour des variations de ω ressort deux étapes:

- 1- l'origine de la droite $\lambda_r(F_1=1)$;
- 2- développement de λ_r pour des grandes valeurs de F_1 .

La figure 30 montre les valeurs à l'origine $\lambda_r(F_1=1) = \lambda_r$, et indique que l'origine λ_{r1} de la courbe $\lambda_r(F_1)$ pour différentes valeurs de ω , varie entre -3 et -6.



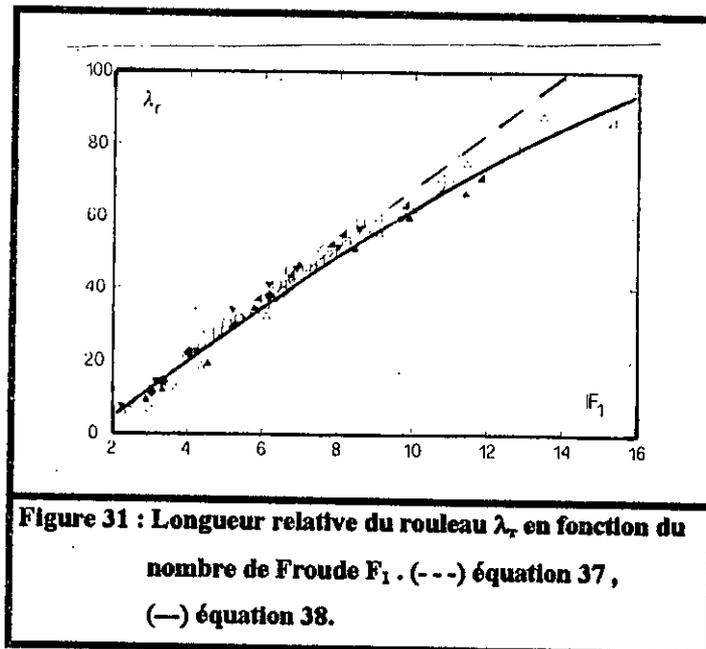
A partir de la courbe moyenne $\lambda_r(F_1)$, l'effet de λ_{r1} est insignifiant, alors on peut écrire [15]:

$$\lambda_r = 8(F_1 - 3/2) \quad 2.5 < F_1 < 8 \quad (37)$$

D'autre part la longueur relative du rouleau peut être exprimée par:

$$\lambda_r = -12 + 160 \tanh(F_1/20) \quad \omega < 0.10 \quad (38)$$

La figure 31 montre que la longueur relative du rouleau λ_r n'est fonction que du nombre de Froude amont F_1 , lorsque ce dernier est assez faible.



Pour des nombres de Froude $F_1 > 8$, les effets du nombre de Reynolds et de la forme $\omega = h_1/b$ deviennent importants.

Les formules de la longueur du rouleau, pour le ressaut classique peuvent être écrites sous la forme suivante: [15]

$$\lambda_r = 6F_1 \quad (\text{SAFRANEZ}) \quad (39)$$

$$\lambda_r = 5.9F_1 \quad (\text{PIETRKOWSKI}) \quad (40)$$

$$\lambda_r = 6.73(F_1 - 1) \quad (\text{NEWNHAN}) \quad (41)$$

I-3-2-2 Hauteurs conjuguées

Une approche s'appuyant sur les résultats expérimentaux conduit à montrer que les hauteurs conjuguées ne dépendent pas seulement du nombre de Froude de l'écoulement incident, mais aussi du nombre de Reynolds et des caractéristiques géométriques de cet écoulement (rapport profondeur-largeur).

HARLEMAN [17] a présenté l'équation suivante pour le rapport des hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$:

$$F_1^2 = 1/2 \{ [(Y(Y+1)(Y-1) + \bar{S})] / [(\beta_1 Y) - (\beta_2 + J)] \} \quad (42)$$

ou β_1 et β_2 sont des coefficients de correction des vitesses des sections de l'amont et de l'aval, J est un paramètre de correction de la turbulence du flux, et \bar{S} peut être donnée par la relation suivante:

$$\bar{S} = 2F_1^2 / (v_1 R_1^*) \int_0^{h_1} (\partial \bar{u} / \partial z)_{z=0} dx \quad (43)$$

\bar{S} est la force de frottement adimensionnelle du fond, v_1 est la vitesse d'écoulement amont, $R_1^* = v_1 h_1 / \nu$ est le nombre de Reynolds modifié, u est la composante longitudinale de la vitesse, x et z sont respectivement les coordonnées longitudinale et verticale à partir du début du fond du canal.

Il a été démontré que le frottement du fond \bar{S} est beaucoup plus important que les termes correctifs, ce qui implique que les corrections de la turbulence du flux tendent à annuler les uns et les autres, ce que simplifie l'analyse.

En effet, et étant donné que $\beta_1 = \beta_2 = 1$ et $J = 0$, l'équation (42) pourra être écrite sous la forme suivante:

$$Y = Y(F_1, R_1^*) \quad (44)$$

HARLEMAN [17] a montré que la courbe moyenne $Y=Y(F_1)$ est plus acceptée, donc, les hauteurs conjuguées dépendent des effets de la gravité et de la viscosité.

D'autre part, l'intégration de la force de cisaillement P_f proposée par RAJARATNAM [26], en considérant que $\varepsilon = P_f (\rho g h_1^2/2)$, où ρ est la masse volumique, g l'accélération de la gravité et h_1 étant la hauteur conjuguée amont de l'écoulement, a vérifié l'équation de HARLEMAN ($Y=Y(F_1)$) et a montré que l'intervention de la forme du canal et de la viscosité du liquide est évitée.

Si on considère un ressaut classique dans un canal prismatique rectangulaire de pente nulle, en supposant une répartition uniforme des vitesses et une pression hydrostatique dans les deux sections transversales amont et aval, on peut écrire la relation suivante:

$$1/2 \rho g b h_1^2 + \rho Q v_1 = 1/2 \rho g Q v_2 + W^* \quad (45)$$

W^* est la force de frottement intégrée le long du canal

avec,
$$Y = h_2/h_1 \quad \text{et} \quad F_1 = Q / (g b^2 h_1^3)^{1/2} \quad (46)$$

on obtient l'équation suivante:

$$1 + 2F_1^2 = Y^2 + 2F_1^2/Y + W \quad (47)$$

où
$$W = 2W^* / (\rho g b h_1^2) \quad (48)$$

W peut être calculée comme suit:

$$W = 2 / (\rho g b h_1^2) \int_0^L \rho g b_s S_f dx \quad (49)$$

L est la longueur du ressaut.

$$\text{Et} \quad S_r = v^2/(2g) f/(4R_h) = 0.2 \zeta v^{1.8} v^{0.2} / [(2g(4R_h)^{1.2}] \quad (50)$$

$$S = s/h_1, \quad R_1^* = Q/(bv) = v_1 h_1 / v \quad \text{et} \quad \omega = h_1 / b.$$

Donc,

$$W = 0.2 \zeta / (2^{1.2}) F_1^2 R_1^{*-1/5} \lambda_r \int_0^1 (1+\omega S)^{1.2} / S^2 dx \quad (51)$$

soit:

$$I = \int_0^1 (1+\omega S)^{1.2} / (S^2) dx \quad (52)$$

une intégrale définie avec $S = 1 + (Y-1)\Sigma$ et $\Sigma = \Sigma(F_1, X)$.

En procédant au changement de dx par dS , le résultat de l'intégration devient une fonction de ω et σ_0 et elle dépend de Y .

Si on admet que l'effet du frottement est du deuxième ordre, les simplifications suivantes peuvent être introduites:

- $\omega \ll 1$, tels que $(1+\omega S)^{1.2} \cong 1 + 1.2\omega S$
- $\tanh^{-1}(x) \cong x$

La première approximation de l'équation 39 ainsi lue:

$$I_1 = \int_0^1 (1 + 1.2\omega S) / (S^2) dx \quad (53)$$

où $S = 1 + \sigma_0(Y-1)x$, avec, $dS = \sigma_0(Y-1)dx$

Après intégration on aura:

$$I_1 = [\sigma_0(Y-1)]^{-1} [1 - 1/((1+\sigma_0(Y-1)) + 1.2 \ln((1+\sigma_0(Y-1)))] \quad (54)$$

Une comparaison entre I et I_1 (tableau 1), pour $\omega=0.1$ et le couple (Y_1, F_1) montre que les déviations sont plus petites que 1 %.

A partir de l'équation (47) et compte tenu de la viscosité, on obtient la relation suivante:

$$1 + 2F_1^2 =$$

$$Y^2 + 2F_1^2/Y + 0.2\zeta/(2^{1.2}) F_1^2 R_1^{*-1/5} \lambda_r 1/(\sigma_0(Y-1)) [(\sigma_0(Y-1)/(1+\sigma_0(Y-1)) + 1.2\omega \ln(1+\sigma_0(Y-1))] \quad (55)$$

Etude du ressaut hydraulique classique

σ_0 est une fonction de F_1 et la fonction (55) est une relation implicite de $Y=Y(F_1, R_1^*, \omega)$.

La figure 32 montre le rapport $\mu=Y/Y^*$ comme une fonction de F_1 pour des différents R_1^* et avec $\zeta =1$.

Pour un nombre de Froude donné, μ diminue avec l'augmentation de ω et la diminution de R_1^* . L'équation (55) relie implicitement les paramètres dominants à savoir $Y=h_2/h_1$, comme une fonction du nombre de Froude F_1 , le nombre de Reynolds modifié $R_1^*=v_1 h_1/\nu$ et le rapport d'aspect de l'écoulement $\omega =h_1/b$.

Tableau 1. Comparaison entre I selon l'équation (52) et I_1 pour $\omega = 0.1$ et divers (F_1, Y)

F_1	4	6	8	10	12
Y	5	7.8	10.5	13	16
I	0.4510	0.3898	0.3771	0.3898	0.4053
I_1	0.4498	0.3878	0.3760	0.3886	0.4041

Etude du ressaut hydraulique classique

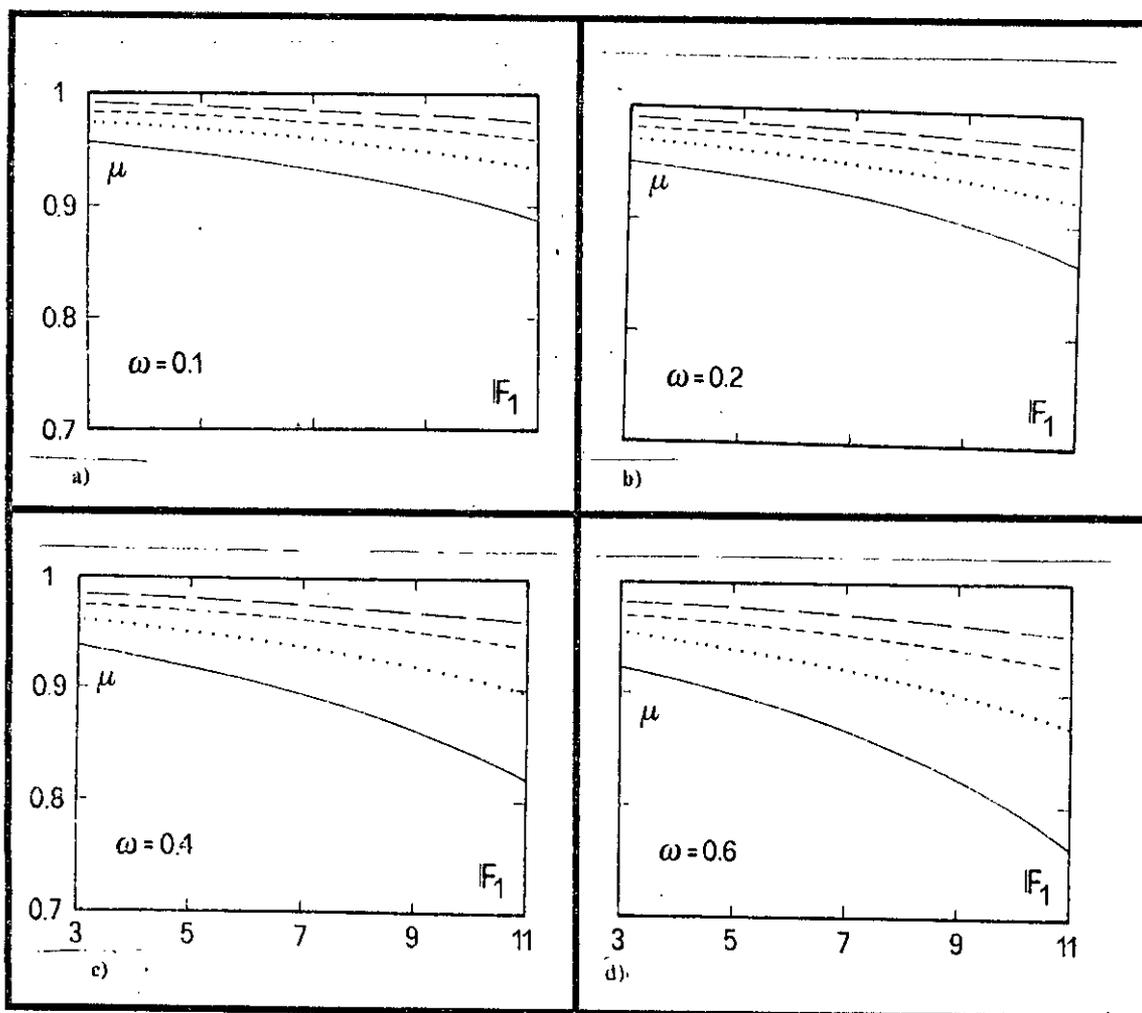


Figure 32: $\mu = \mu Y/Y^*$ en fonction de F_1 et R_1^* pour : a) $\omega=0.1$, b) $\omega=0.2$, c) $\omega=0.4$, d) $\omega=0.6$.

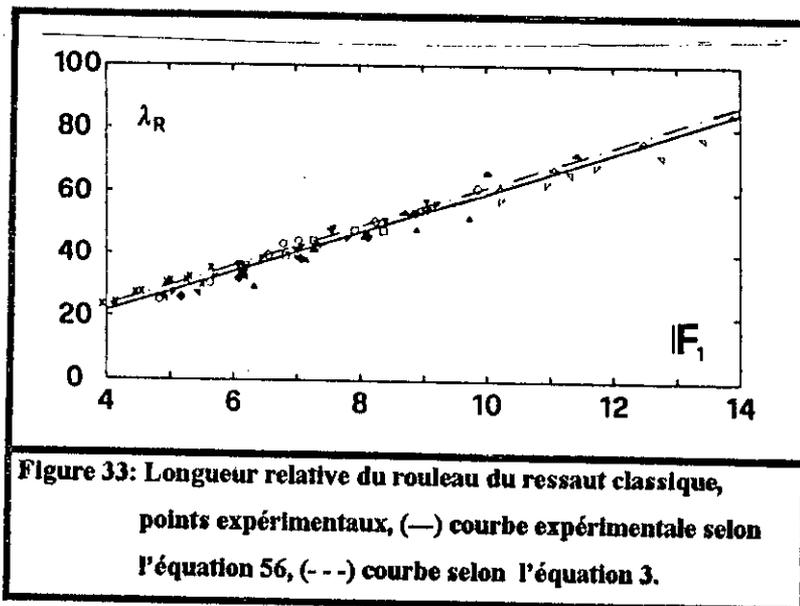
(—) $R_1^*=10^4$, (....) $R_1^*=10^5$, (- - -) $R_1^*=10^6$, (- · - ·) $R_1^*=10^7$.

I-3-2-3 Longueur du ressaut

En se basant sur des essais du ressaut classique, la longueur relative du rouleau de surface $\lambda_r = L_r/h_1$ est représentée sur la figure 33.

Les points expérimentaux s'alignent sur une droite dont l'équation de regression linéaire est:

$$\lambda_r = 6.291 F_1 - 3.591 \quad (56)$$



Cette courbe est pratiquement parallèle, avec un léger décalage vers le bas, à l'équation suivante:

$$\lambda_r = 4.5 Y \quad (03)$$

où $Y=Y(F_1)$ est l'équation de BELANGER.

Les écarts peuvent provenir des fluctuations des positions du pied du ressaut et de la fin du rouleau. Ce décalage pourrait être due également à l'effet du frottement.

I-4 Conclusion

Cette première partie de notre étude, nous a permis de faire un rappel sur les principaux travaux et études relatives au ressaut hydraulique, notamment les résultats des recherches concernant le ressaut classique dans les canaux rectangulaires et trapézoïdaux.

La présentation de l'évolution des analyses du ressaut hydraulique reflète, aussi bien l'intérêt qu'accordent les chercheurs au ressaut depuis le début du 20ème siècle qu'au domaine inépuisable de ce type d'écoulement, avec ses différentes caractéristiques physiques et son utilité économique.

La détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique a été souvent le principal objectif des travaux entrepris, quoique la structure interne du ressaut n'a pas été suffisamment considérée et la répartition des vitesses et des pressions, ainsi que celle de la masse volumique reste sous-exploitée.

Il a été constaté, lors de l'étude bibliographique que le ressaut hydraulique en canal triangulaire n'a fait l'objet que de quelques études, parmi lesquelles figure celle de HAGER et WANOSCHEK en 1987[12]. Cette étude considérée comme la plus récente et qui porte sur l'analyse du ressaut hydraulique dans un canal semi-triangulaire sera développée dans la partie théorique du présent travail.

Notre travail porte sur la détermination expérimentale des caractéristiques du ressaut hydraulique classique dans un canal triangulaire symétrique, ainsi que sur une étude comparative avec le cas du canal semi-triangulaire.

***ETUDE DU RESSAUT HYDRAULIQUE
DANS UN CANAL A SECTION TRIANGULAIRE***

II ETUDE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL A SECTION TRIANGULAIRE

II-1 Introduction

Cette partie de l'étude résume les travaux entrepris par HAGER et WANOSCHEK (1987) sur le ressaut dans un canal triangulaire, en notant que ce sont les dernières recherches effectuées sur ce type de profil.

Les équations régissant les ressauts rectangulaire et triangulaire sont déduites de l'équation de la quantité de mouvement appliquée au ressaut en canal de section trapézoïdale.

Les mesures expérimentales ont montré que les rapports des hauteurs conjuguées du ressaut en canal triangulaire sont légèrement inférieurs aux rapports théoriques et l'équation de la quantité de mouvement est présentée en tenant compte de l'effet des frottements le long des parois du canal. Le développement théorique a dans un premier temps concerné le canal semi-triangulaire, puis étendu dans un second temps au canal triangulaire symétrique.

L'expérimentation a été menée dans un canal rectangulaire dans lequel a été insérée une paroi en P.V.C inclinée d'un angle de 44.7° par rapport à l'horizontale. La paroi verticale du canal rectangulaire est en verre permettant de visualiser l'écoulement.

Les vitesses de l'écoulement à l'amont du ressaut, variant entre 1.7 et 8.6 m/s, ont été produites par un dispositif de "boîte sous pression" assurant la transition entre la conduite d'alimentation et le canal.

L'expérimentation a été menée sous des hauteurs initiales h_1 comprises entre 70 et 76 mm et des débits volumes allant de 4 à 20 l/s ($2 \leq F_1 \leq 14$). Le caractère fortement torrentiel du régime de l'écoulement à l'amont du ressaut a rendu délicates et imprécises les lectures limnimétriques.

II-2 Rapport des hauteurs conjuguées

Sous l'hypothèse de l'uniformité des pressions et des vitesses, l'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique de pente nulle donne:

$$bh_1^2/2 + mh_1^3/3 + Q^2/(g(bh_1+mh_1^2)) = bh_2^2/2 + mh_2^3/3 + Q^2/(g(bh_2+mh_2^2)) \quad (58)$$

h_1 et h_2 sont respectivement les hauteurs initiale et finale du ressaut, b est la base du trapèze, Q le débit volume et m la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontale.

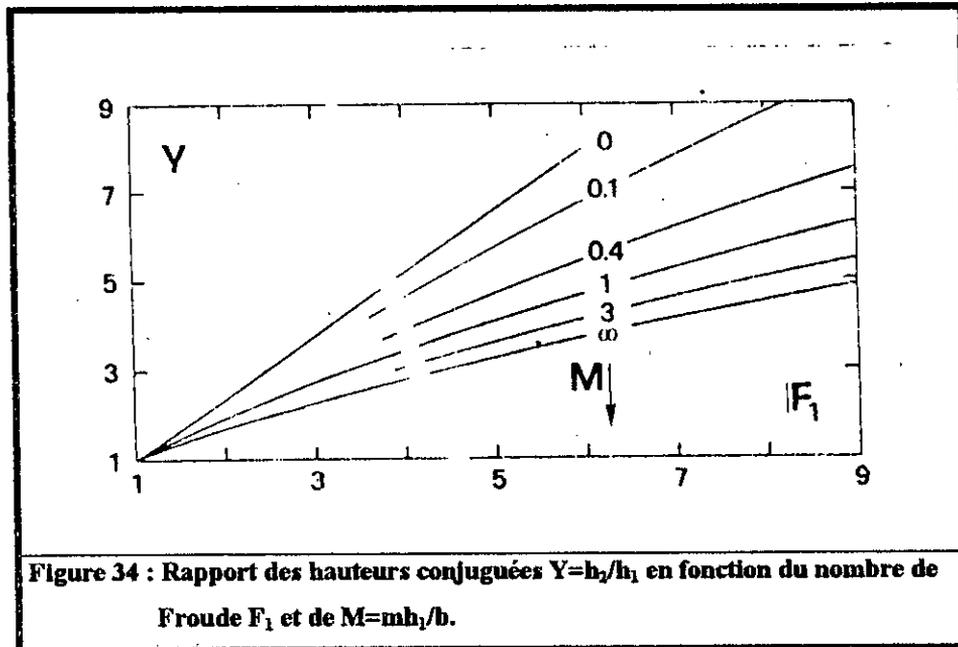
L'équation (58) peut s'écrire, en termes adimensionnels, sous la forme:

$$F_1^2 [1 - ((1+M)/(Y(1+MY)))] = (1+2M)/(2(1+M)^2) [Y^2(1+2MY/3) - (1+2M/3)] \quad (59)$$

où

$$\begin{aligned} F_1^2 &= Q^2(b+2mh_1)/[g(bh_1+mh_1^2)^3] \\ Y &= h_2/h_1 \\ M &= mh_1/b \end{aligned} \quad (60)$$

La relation (59) est représentée graphiquement sur la figure 34 dans un système d'axes à coordonnées cartésiennes.



Sur la figure 34 sont également représentées les courbes limites $M=0$ et $M \rightarrow \infty$ correspondant respectivement aux ressauts rectangulaire et triangulaire. On peut noter que pour un même nombre de Froude F_1 le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut diminue au fur et à mesure que M augmente.

La courbe enveloppe correspond à $M=0$ traduit en fait l'équation déjà citée de BELANGER:

$$Y_R = 1/2 [(1+8F_{1R}^2)^{1/2} - 1] \quad (01)$$

Tandis que celle correspondant à $M \rightarrow \infty$ traduit l'équation régissant le ressaut en canal de section droite triangulaire:

$$F_{1T}^2 = 2Y_T^2(Y_T^2 + Y_T + 1)/(3(Y_T + 1)) \quad (24)$$

Les indices ``R`` et ``T`` désignent le rectangle et le triangle.

Les deux courbes limites sont données respectivement pour $M=0$ (canal rectangulaire) et $M \rightarrow \infty$ (canal triangulaire).

Contrairement à l'équation de BELANGER, la relation (24) est fortement implicite en fonction de Y_T ; HAGER et WANOSCHEK proposent une relation approchée qui permet le calcul direct de Y_T :

$$Y_T \cong \left[(3/2)F_{1T}^2 - 1 \right]^{1/3} \quad (25)$$

II-3 Equation modifiée de la quantité de mouvement

Les essais effectués par HAGER et WANOSCHEK ont montré que les rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs aux rapports théoriques; ils se proposent alors de modifier l'équation de la quantité de mouvement, exprimée par (24), en tenant compte de l'effet des frottements le long des parois du canal.

Pour atteindre cet objectif, deux hypothèses sont émises:

- Le gradient de perte de charge S_f sur la longueur L_j du ressaut peut être évalué par la formule de BLASIUS:

$$S_f = 0.3164 v^2 / [R^{1/4} 8gR_h] \quad (61)$$

où $R = 4R_h v/\nu$ est le nombre de Reynolds, R_h le rayon hydraulique, v la vitesse moyenne de l'écoulement et ν la viscosité cinématique du liquide.

- Le profil de surface du ressaut obéit à l'équation:

$$h(x) = h_1 + (h_2 - h_1)X^2 \quad (62)$$

où $h(x)$ est la profondeur de l'écoulement à la coordonnée x à partir du début du ressaut et $X = x/L_j$.

La coordonnée longitudinale x est telle que $0 \leq x \leq L_j$ correspondant à $0 \leq X \leq 1$.

La force de frottement le long du volume de contrôle correspondant à $0 \leq x \leq L_j$ est par définition:

$$W_x = \varpi \int A(x) S_r dx \quad (63)$$

où $\varpi = \rho g$ est le poids volumique du liquide, $A(x)$ l'aire de la section mouillée fonction de la coordonnée longitudinale x .

Les relations (61) et (63) sont appliquées au canal semi-triangulaire pour lequel:

$$A(x) = mh^2(x)/2 \quad \text{et} \quad R_h = mh(x)/[2(1+(1+m^2)^{1/2})]$$

soit:
$$S_r = (2Q/(mh_1^2))^{7/4} v^{1/4}/(5g h_1^{5/4}) [h(x)/h_1]^{-19/4} \quad (64)$$

La relation (63) devient alors:

$$W_x = \rho g mh_1^2/2 L_j S_r I(Y) \quad (65)$$

où
$$I(Y) = \int_0^1 dx/[1+(Y-1)X^2]^{11/4} \quad , \quad Y=h_2/h_1 \quad , \quad X=x/L_j$$

L'intégration numérique de $I(Y)$ donne approximativement:

$$I(Y) = 1/7 (1+6/Y) \quad (66)$$

Pour des nombres de Froude $F_1 < 15$ correspondant à des rapports des hauteurs conjuguées du ressaut $Y < 7$, l'application de la relation approchée (66) occasionne des erreurs inférieures à 5% par rapport aux valeurs exactes issues de (65).

L'équation de la quantité de mouvement appliquée au ressaut en canal de section droite semi-triangulaire s'écrit alors:

$$mh_1^3/6 + 2Q^2/(gmh_1^2) = mh_2^3/6 + 2Q^2/(gmh_2^2) + W_x$$

soit:

$$mh_1^3/6 + 2Q^2/(gmh_1^2) = mh_2^3/6 + 2Q^2/(gmh_2^2) + 1/7(1+6/Y) mh_1^2/2 L_j S_{r1} \quad (67)$$

Etant donné que $F_1^2 = 8Q^2/(gm^2h_1^5)$ et $S_{r1} = (F_1^2/10) \Lambda$ où $\Lambda = [v m h_1/(2Q)]^{1/4}$, la relation (67) s'écrit alors en termes adimensionnels:

$$1+(3/2)F_1^2 = Y^3+(3/2)F_1^2/(Y^2) + 3\Lambda/(70) (L_j/h_1) (1+6/Y)F_1^2 \quad (68)$$

Le rapport L_j/h_1 figurant dans la relation (68) peut s'écrire:

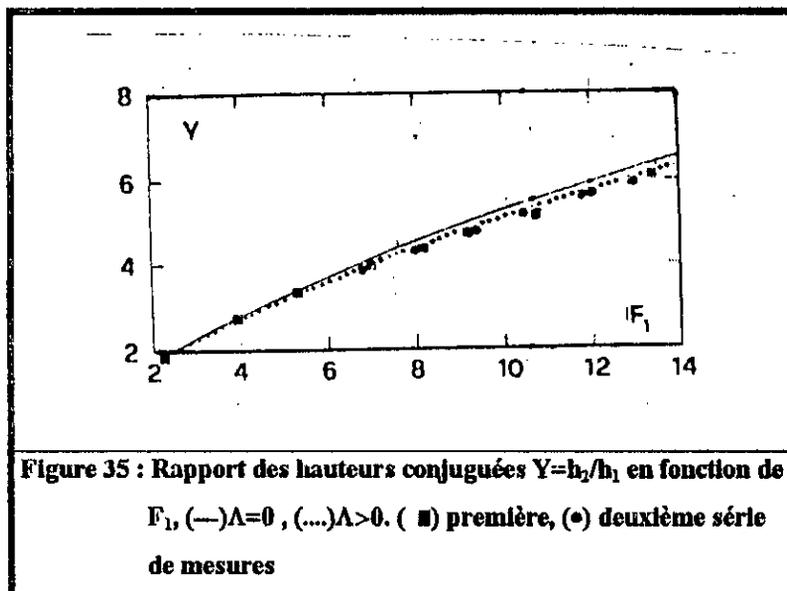
$$L_j/h_1 = (L_j/h_2) Y$$

HAGER et WANOSCHEK estiment que, pour un canal triangulaire incliné d'un angle de 45° par rapport à l'horizontale ($m=1$), $L_j/h_2 \cong 6$.

La relation (68) s'écrit alors sous la forme:

$$F_1^2 = 2Y^2(Y^3-1)/[3(Y^2-1-(\Lambda Y^2/6)(6+Y))] \quad (69)$$

Cette dernière relation traduit ainsi l'équation régissant le ressaut triangulaire ($m=1$) en tenant compte de l'effet des frottements le long des parois du canal (figure 35). Cet effet est nul pour $\Lambda=0$ et l'équation (24) est reproduite.



II-4 Longueurs caractéristiques du ressaut

II-4-1 Longueur du rouleau

La longueur du rouleau L_r est la distance entre le pied amont du ressaut et l'endroit à l'aval où la composante horizontale de la vitesse superficielle est nulle.

On peut voir sur la figure 36 que quatre zones d'écoulement sont distinguées:

- (1) zone du jet des parois, (2) zone de jaillissement vertical, (3) zone d'écoulement de retour et (4) zone du rouleau.

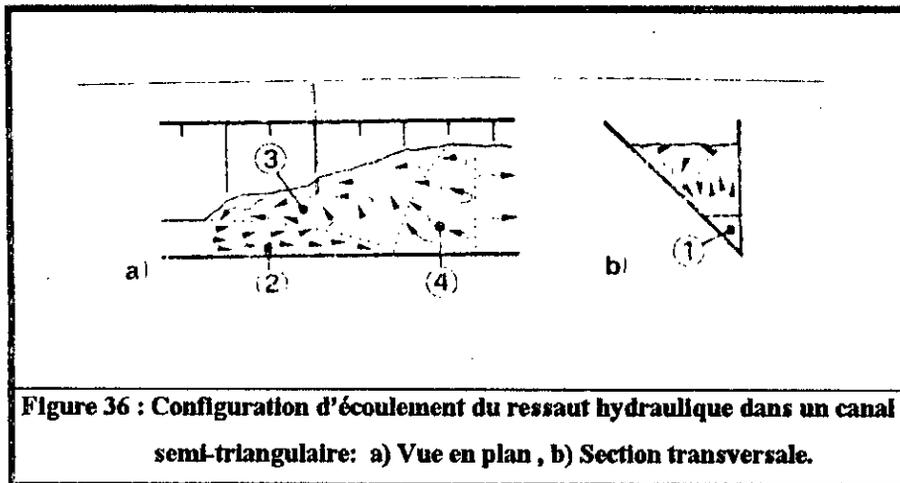


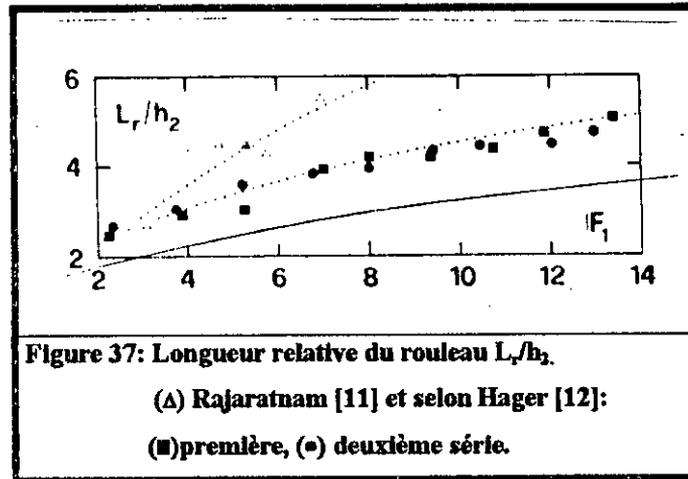
Figure 36 : Configuration d'écoulement du ressaut hydraulique dans un canal semi-triangulaire: a) Vue en plan , b) Section transversale.

Sur la figure 37 sont représentées les longueurs relatives du rouleau pour un canal semi-triangulaire ainsi que les résultats de RAJARATNAM [11]. HAGER a estimé que la longueur relative du rouleau ne dépend que du nombre de Froude F_1 et de m , et que la tendance générale des caractéristiques relatives des longueurs peut être donnée approximativement par la relation suivante:

$$L_r/h_2 = 1.8 m^{1/2} F_1^{0.4/m} \quad 0.4 < m \leq 1 \quad (70)$$

L'application de l'équation 70 pour le cas du canal triangulaire où, m est égale à 1 fait que la longueur relative L_r/h_2 soit égale à :

$$L_r/h_2 = 1.8 F_1^{0.4} \quad m=1$$



La longueur relative L_r/h_2 varie entre les valeurs suivantes:

$$L_r/h_2 = 2.375 \quad \text{pour } F_1 = 2$$

$$L_r/h_2 = 5.173 \quad \text{pour } F_1 = 14$$

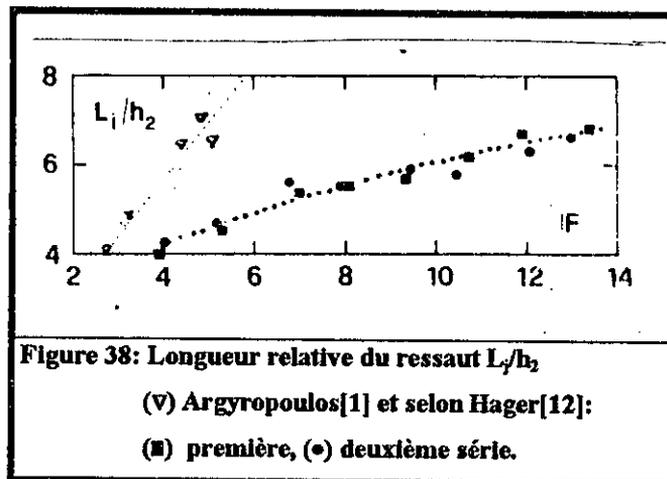
Etant donné que l'équation 70 conserve sa validité même pour le cas de la section triangulaire symétrique dont la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois est comprise entre 0.4 et 1, une vérification sera menée en utilisant les résultats expérimentaux des longueurs relatives du rouleau pour le ressaut dans un canal à section triangulaire symétrique, avec m égal à 1.

II-4-2 Longueur du ressaut

La longueur du ressaut L_j est considérée comme la distance entre le pied amont du ressaut et l'endroit où la surface libre est maximale et tend à devenir parallèle au fond du canal.

Sur la figure 38 sont représentés les résultats de ARGYROPOULOS [1], et les résultats expérimentaux des longueurs relatives du ressaut, obtenus par HAGER, pour un canal semi-triangulaire. L'équation établie par HAGER, et qui porte sur l'extrapolation des résultats de ses expériences sur un canal semi-triangulaire à un canal triangulaire symétrique comprise, dont la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois doit être comprise entre 0.4 et 1 est la suivante:

$$L_j/h_2 = 2.4 m^{1/2} F_1^{0.4/m} \quad 0.4 < m \leq 1 \quad (71)$$



A titre indicatif, on peut noter que:

$$L_j/h_2 = 3.167 \quad \text{pour } m = 1, F_1 = 2$$

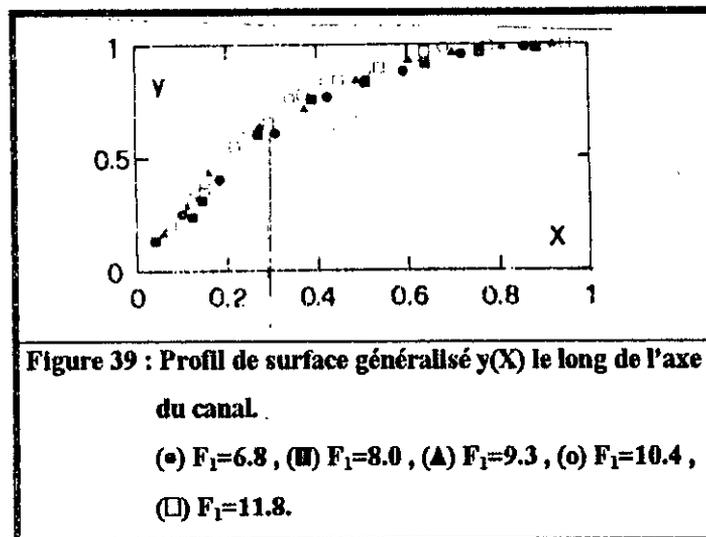
$$L_j/h_2 = 6.897 \quad \text{pour } m = 1, F_1 = 14$$

De même que pour la longueur relative du rouleau, l'équation (71) fera l'objet d'une vérification expérimentale en utilisant un canal triangulaire symétrique

II-5 Profil de surface généralisé

L'emploi des variables $X = x/L_j$ et $Y = (h-h_1)/(h_2-h_1)$ permet le tracé du profil de surface du ressaut sous la forme adimensionnelle.

La figure 39 représente le profil adimensionnel généralisé $y(x)$ le long de l'axe du canal pour plusieurs valeurs de nombre de Froude, obtenu par HAGER et WANOSCHEK.



HAGER et WANOSCHEK estiment que le profil de surface généralisé suit la loi:

$$y = (1 + \alpha X) \tanh(\beta X) \quad (72)$$

(\tanh = tangente hyperbolique)

Pour $0 \leq X \leq 0.2$ le profil de surface est approximativement linéaire de pente

$$\beta = dy/dx = 2.5.$$

La relation (72) permet d'écrire, pour $X = 1$ et $y = 1$, $1 = (1 + \alpha) \tanh \beta$,
soit $\alpha = 0.014$.

Il est important de noter que le profil de la surface libre le long de la paroi inclinée est toujours inférieur ou coincide avec le profil de la surface libre le long de l'axe du canal.

II-6 Rendement du ressaut

Comme il a été déjà signalé, l'énergie relative de dissipation pour le cas du canal trapézoïdal est:

$$\eta = 1 - [Y + F_1^2 / (2Y^2) ((1+M)^3 / ((1+2M)(1+MY)^2))] / [1 + F_1^2 / 2 ((1+M) / (1+2M))] \quad (29)$$

La représentation graphique de la relation (29), pour les cas particuliers du rectangle et du triangle (figure 40) montre que pour les nombres de Froude $F_1 > 3$ le rendement du ressaut triangulaire est supérieur à celui du ressaut rectangulaire; l'écart peut atteindre les 10% au-delà de $F_1 = 5$.

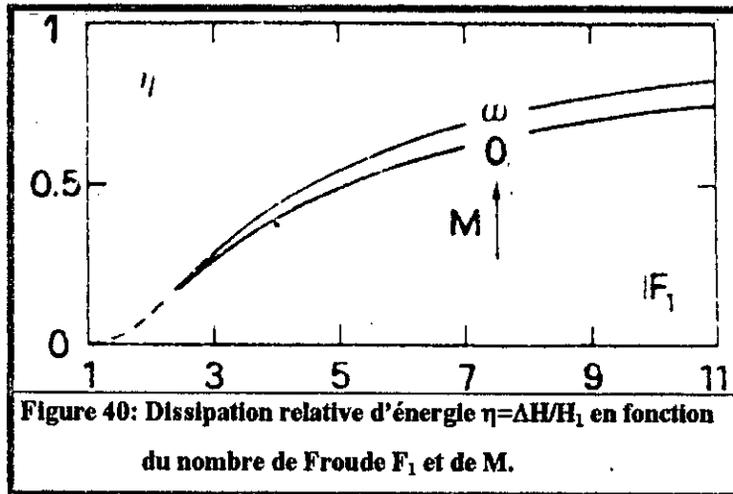
Au-delà des nombres de Froude supérieurs à 3, les courbes enveloppes de la figure 40 peuvent être définies approximativement par les relations suivantes:

$$\eta_R = (1 - \sqrt{2}/F_1)^2 \quad \text{pour } M=0 \quad (31)$$

$$\eta_T = [1 - (12/F_1^4)^{1/3}]^2 \quad \text{pour } 1/M=0 \quad (32)$$

Ainsi, on peut noter que le rendement η_R du ressaut en canal rectangulaire est inversement proportionnel à F_1^2 , tandis que son homologue η_T du triangulaire est inversement proportionnel à $F_1^{8/3}$. La relation (32) montre en outre que le rendement η_T est indépendant de la caractéristique géométrique m .

L'expression théorique définissant le rendement η_T du ressaut triangulaire n'a pas encore fait l'objet d'une vérification expérimentale; c'est un des objectifs que vise la dernière partie de notre étude.



II-7 Conclusion

L'étude théorique a eu pour objectif, la présentation des relations et des courbes élaborées par HAGER et WANOSCHEK dans leur étude sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire.

L'intérêt de cette partie réside, d'une part dans le fait qu'elle permet de présenter toutes les étapes de l'unique étude récente sur le ressaut dans un canal triangulaire [12] et que d'autre part, elle peut nous servir comme un modèle, sur la base duquel, les essais au laboratoire et les résultats expérimentaux seront examinés.

Bien que l'étude théorique a montré que les équations ainsi que les graphes présentés sont applicables aux canaux triangulaires symétriques, leur fiabilité ne peut être mise en évidence que par voie expérimentale menée sur un canal triangulaire symétrique. C'est l'objectif que vise la prochaine étape de notre étude.

ETUDE EXPERIMENTALE

III ETUDE EXPERIMENTALE

III-1 Introduction

Dans cette partie, on procède, d'une part à une description des installations et des instruments de mesure utilisés dans les essais et d'autre part à une présentation des résultats expérimentaux, leur interprétation ainsi que la vérification des relations proposées par HAGER et WANOSCHEK lors de l'étude du ressaut dans un canal semi-triangulaire et la validité de celles-ci pour un canal triangulaire symétrique.

Par ailleurs, les essais ont été menés sur un modèle réduit d'un canal à section droite triangulaire et ont été consacrés à mesurer, pour chaque hauteur initiale h_1 , toutes les caractéristiques du ressaut à savoir, la hauteur finale, la longueur du rouleau et du ressaut, le débit et les hauteurs de la surface libre dans l'axe du canal.

Etant donné que la hauteur initiale h_1 reste constante pendant chaque série de mesure, on est arrivé à adapter à la sortie de la cuve d'alimentation une gamme de guideaux de manière que chacun d'entre eux corresponde à une hauteur h_1 .

Un seuil situé à l'aval du canal est constitué d'une paroi mince qui peut se déplacer verticalement et permet de ramener le ressaut à la position initiale.

Les mesures des débits sont effectuées au moyen d'un débitmètre à diaphragme installé sur la conduite d'alimentation, alors que les hauteurs conjuguées finales h_2 et les hauteurs de la surface libre sont mesurées à l'aide des limnimètres installés sur le canal par des traverses qui assurent leur stabilité.

Dans un premier temps, cette étude est consacrée à une analyse des différents résultats et l'établissement des courbes qui caractérisent le comportement du ressaut hydraulique dans un canal à section droite triangulaire. Dans un second temps, les différentes courbes expérimentales seront comparées à celles issues de l'étude du ressaut dans un canal à section semi-triangulaire ainsi que du développement théorique.

III-2 Description des installations

Le modèle réduit sur lequel sont effectués les différents essais et mesures est réalisé dans sa totalité dans les ateliers et laboratoire de l'institut d'hydraulique de Biskra. Ce modèle est constitué d'un bassin d'alimentation, d'un bassin d'accumulation et d'un canal de mesures en verre ainsi que d'un système de circulation de l'eau (figure 41).

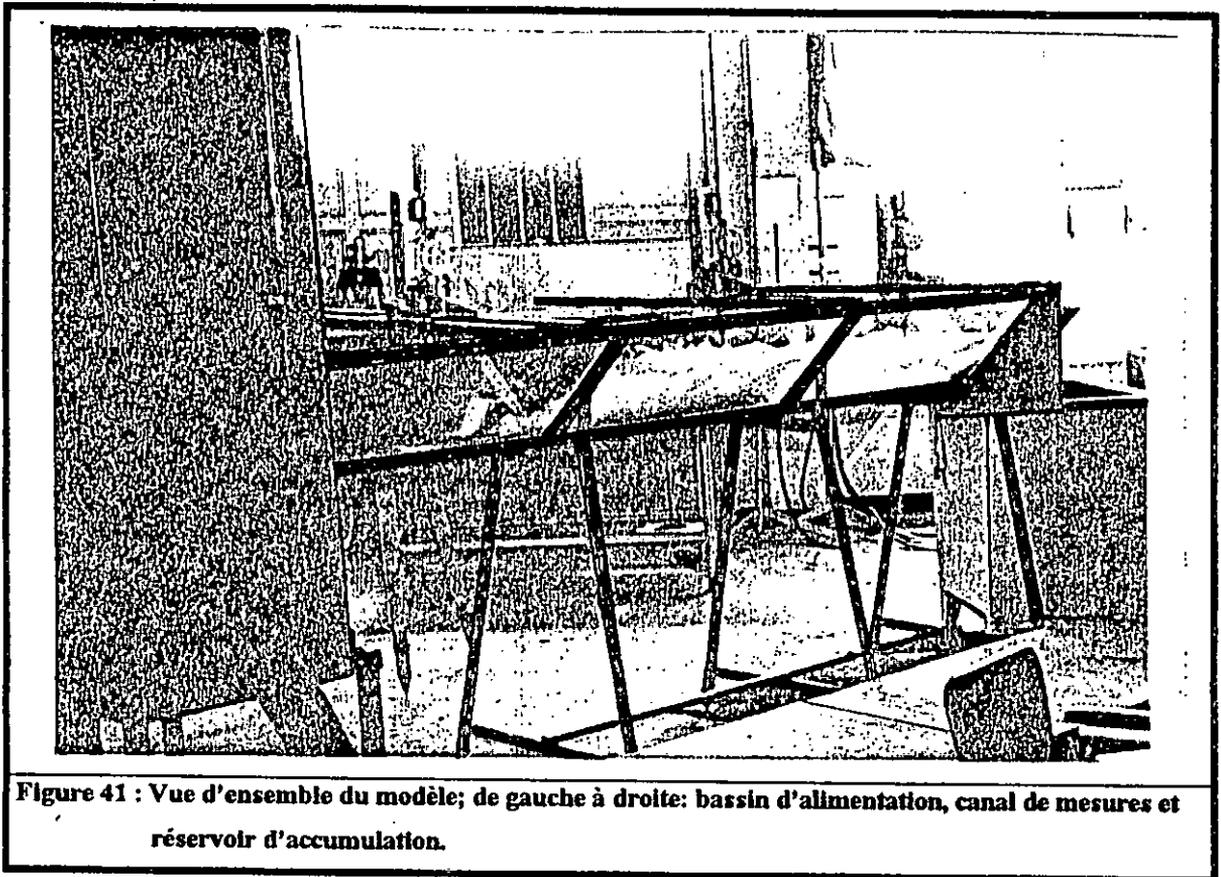


Figure 41 : Vue d'ensemble du modèle; de gauche à droite: bassin d'alimentation, canal de mesures et réservoir d'accumulation.

III-2-1 Réservoir d'alimentation

Le réservoir d'alimentation, confectionné en tôle, est d'une capacité de 1000 litres et surelevé de 1.0 mètre sur un support métallique fixé au sol. L'étanchéité du bassin est assurée par un revêtement interne à base de mastic et de peinture.

La conduite d'amenée de 100 millimètres de diamètre traverse la paroi latérale du bassin et se termine à l'intérieur par un tranquilisateur.

Le bassin est ouvert en direction du canal où est placé le guideau convergent qui sert à assurer une hauteur d'eau en amont, considérée comme la hauteur conjuguée initiale.

En fin, un tube piézomètre est installé sur la paroi latérale pour visualiser le niveau de la surface libre dans le bassin, ainsi qu'une conduite de trop-plein pour éviter d'éventuels débordements.

III-2-2 Canal de mesures

Avec une longueur de 3.0 m, une profondeur de 0.35 m et une section transversale de 0.14 m^2 , le canal de mesures est constitué de plaques de verre qui permettent les prises de vue et les observations.

Le châssis du canal est en profilés cornières, renforcés par des tubes en fer pour le maintien des parois vitrées. Le canal est surélevé sur des pieds-supports métalliques et maintenu sur une pente fixe. Les joints entre les plaques de verre sont réalisés avec du mastic silicone transparent, alors que des joints en matière plastique sont posés entre le métal et le verre. Sur toute la longueur du canal un ruban gradué est collé pour effectuer les mesures des grandeurs longitudinales.

III-2-3 Bassin d'accumulation

Le canal de mesure débouche à surface libre dans un réservoir d'accumulation de 350 litres de volume, posé sur le sol et relié à un grand réservoir d'accumulation déjà existant; ceci permet la mise en service des installations en circuit fermé.

Le réservoir d'accumulation est doté d'une pompe horizontale dont le débit maximal est de 30 l/s. La pompe refoule dans le réservoir d'alimentation au moyen d'une conduite en plastique de 110 millimètres de diamètre.

III-2-4 Débitmètre

Sur la conduite de refoulement est installé un débitmètre à diaphragme, avec deux tubes piézométriques fixés sur une planche verticale. Entre les deux tubes, une règle graduée est collée, ce qui permet la lecture de la différence de niveau Δh dans les tubes.

L'étalonnage du débitmètre est effectué après une série de mesures de débit à l'aide d'un déversoir triangulaire. L'ajustement de la courbe $Q = f(\Delta h)$ a donné la relation suivante:

$$Q = 0.02218 (\Delta h)^{0.5082} \quad (73)$$

Δh en mètres et Q en m^3/s

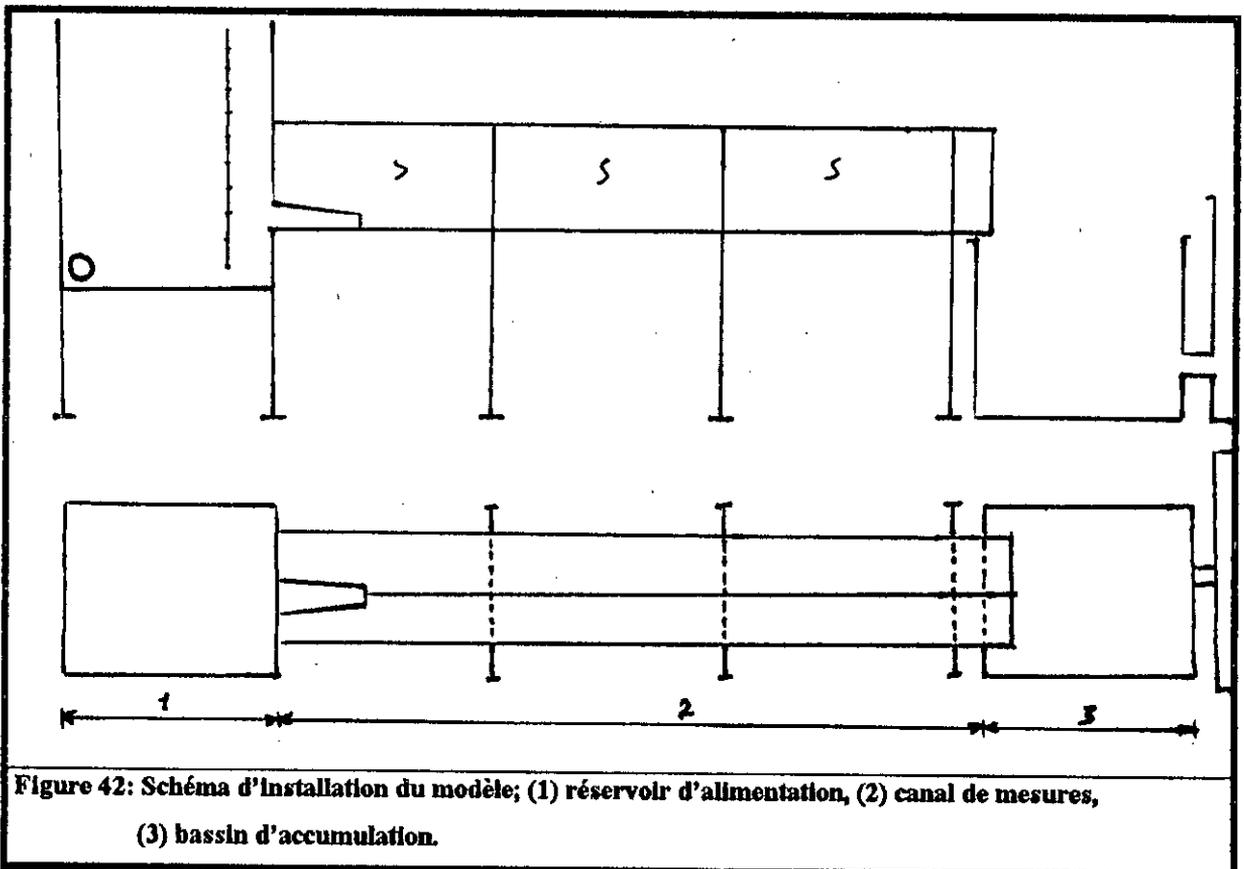


Figure 42: Schéma d'installation du modèle; (1) réservoir d'alimentation, (2) canal de mesures, (3) bassin d'accumulation.

III-2-5 Limnimètres

Le limnimètre est composé d'un tube en aluminium d'une longueur de 70 centimètres. Une règle graduée, le zéro en bas est fixée sur toute la longueur du tube. La précision de la lecture est de $\frac{1}{2}$ mm. Les limnimètres sont installés sur le canal de mesure au moyen des traverses en acier protégés contre la corrosion.(figure 43)

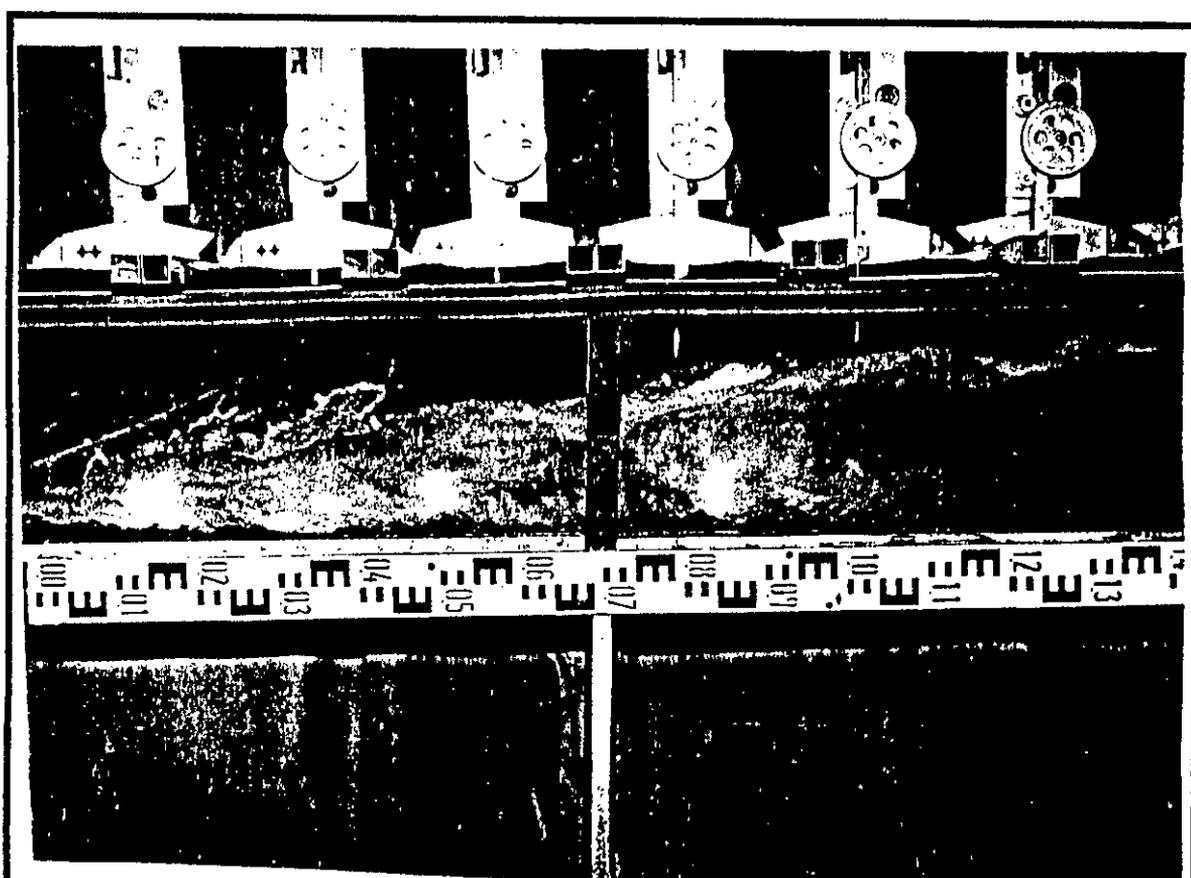


Figure 43 : Limnimètres installés le long du canal de mesures.

III-3 Dérroulement des essais

- Le début de chaque série de mesures est marqué par l'installation du guideau avec lequel la valeur de la hauteur conjuguée initiale h_1 est fixée.
- La mise en place d'un nombre de limnimètres le long du canal, tout en couvrant la distance entre l'ouverture du guideau et l'extrémité aval du canal.
- Après la mise en marche du système d'alimentation, le ressaut hydraulique étant apparu grâce au seuil à paroi mince, installé au préalable à l'extrémité aval du canal.
- On procède à la stabilisation du ressaut par la variation de la hauteur du seuil ou bien par le réglage du débit en manoeuvrant la vanne située sur la conduite d'alimentation. Cette manipulation consiste à rendre le ressaut stable et à remettre le pied du ressaut juste à la sortie du guideau.
- S'assurer que le débit refoulé par la pompe dans le réservoir d'alimentation est pratiquement égal à celui du canal de mesure, en observant la stabilité de la surface libre dans le bassin d'alimentation à l'aide d'un tube piézométrique.
- On entame la série de mesures par la lecture de la différence Δh entre les deux colonnes d'eau du débimètre à diaphragme déjà étalonné.
- On relève les valeurs des hauteurs d'eau au moyen des différents limnimètres installés sur le canal.
- On mesure la longueur du rouleau et celle du ressaut avec le ruban gradué et collé le long de la paroi vitrée du canal.
- On refait les opérations, après avoir varier le débit et le seuil.
- Au bout de dix à quinze essais, un changement du guideau est effectué et une autre série de mesures est entamée.

Les essais sont effectuées pour les hauteurs conjuguées amont h_1 suivantes:

38 - 45 - 49.5 - 52 - 56.7 - 60 - 65.8 - 70 - 76 - 78.5 mm et avec des nombres de Froude compris entre 2 et 12.

III-4 Détermination expérimentale des caractéristiques du ressaut dans un canal triangulaire symétrique

III-4-1 Vérification de l'équation de la quantité de mouvement

La vérification expérimentale de la relation donnant le rapport des hauteurs conjuguées, issue de l'application du théorème de la quantité de mouvement et proposée par Hager a été utile pour les deux raisons suivantes:

- 1- confirmation et vérification expérimentale de la validité de l'équation de la quantité de mouvement qui exprime le rapport Y des hauteurs conjuguées h_1 et h_2 en fonction du nombre de Froude F_1 :

$$F_1^2 = [2Y^2(Y^2 + Y + 1)]/[3(Y + 1)] \quad (24)$$

- 2- Vérification de l'effet des frottements du fond et des parois du canal sur le rapport Y des hauteurs conjuguées h_1 et h_2 et la confirmation que ce rapport ne dépend que du nombre de Froude F_1 .

La courbe $Y = f(F_1)$ de la figure 44, issue de valeurs expérimentales (tableaux de 1 à 49 en annexe) montre que l'influence des pertes de charge sur le rapport Y des hauteurs conjuguées est négligeable, voir inexistant.

La coïncidence des points expérimentaux avec la courbe théorique (équation 24) signifie l'absence de l'effet des pertes de charge sur le rapport des hauteurs conjuguées pour les différentes valeurs du nombre de Froude F_1 , ce que nous amène à confirmer la validité de l'équation (24), issue de l'application du théorème de la quantité de mouvement et à infirmer la considération de l'effet des frottements exprimé dans l'équation (69). La dispersion irrégulière des points de mesures autour de la courbe théorique ne serait due qu'aux erreurs de lecture.

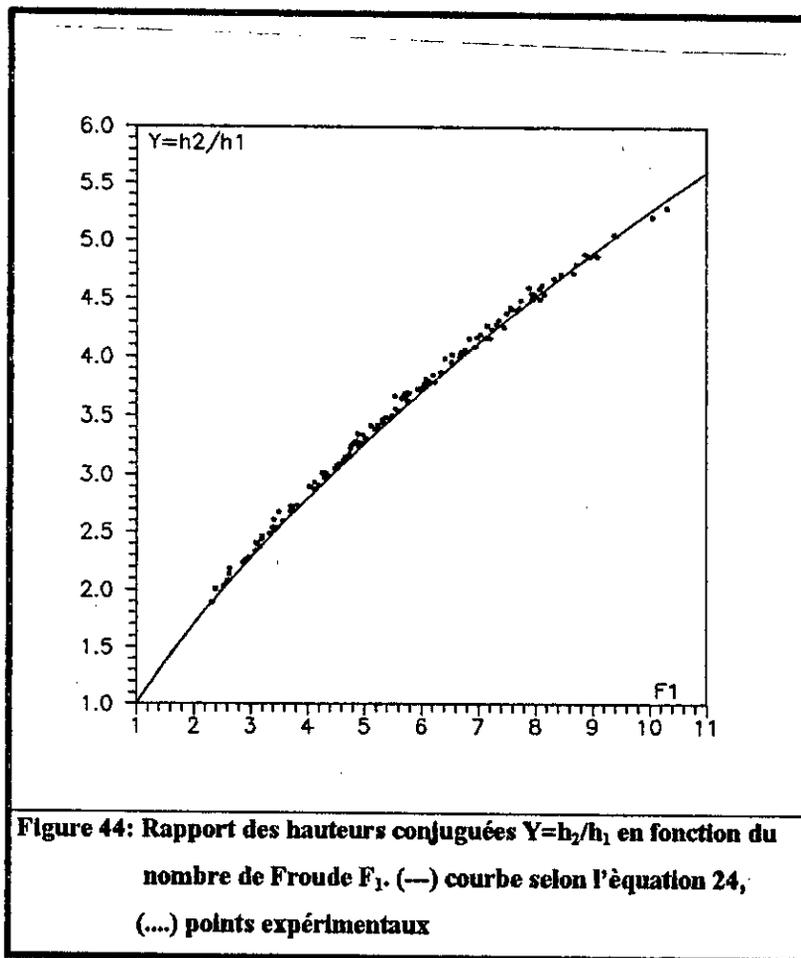


Figure 44: Rapport des hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) courbe selon l'équation 24, (...) points expérimentaux

Par ailleurs, l'équation de BELANGER étant connue,

$$Y_R = h_2/h_1 = 1/2[(1+8F_1^2)^{1/2} - 1] \quad (01)$$

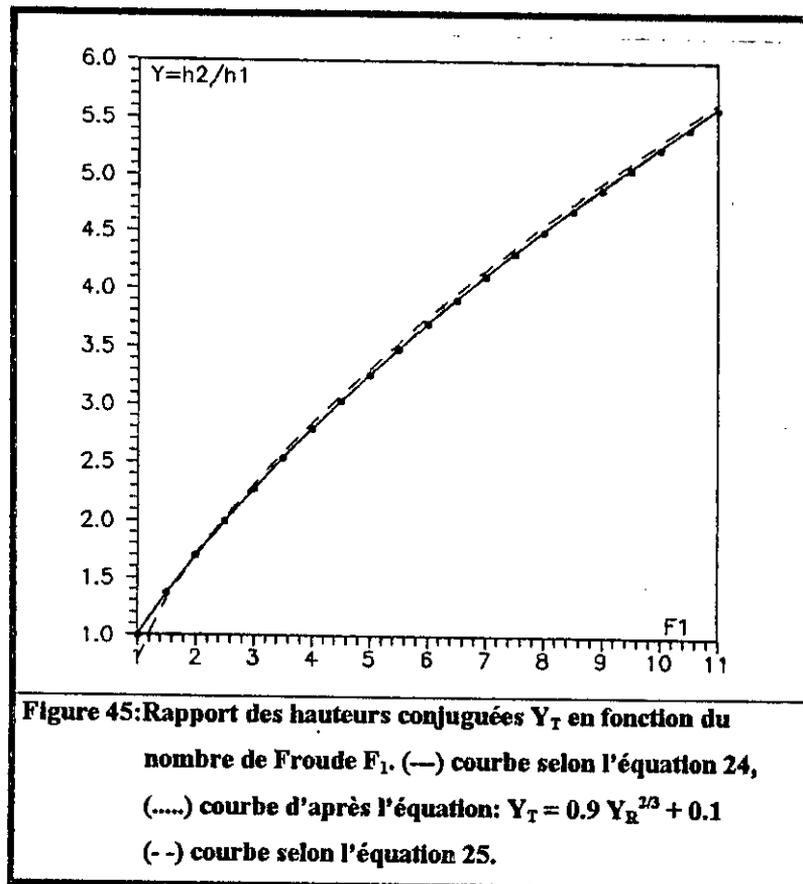
nous proposons d'exprimer le rapport Y_T des hauteurs conjuguées h_1 et h_2 d'un ressaut dans un canal triangulaire en fonction du rapport Y_R de l'équation de BELANGER, par la relation suivante:

$$Y_T = 0.9 Y_R^{2/3} + 0.1 \quad (74)$$

Cette relation présente l'avantage d'être simple et d'une meilleure précision (figure 45):

Comparée à la solution approchée proposée par HAGER et WANOSCHEK et exprimée par la relation (25) dont l'erreur relative est plus de 1%, la relation (74) peut être considérée comme une solution approchée plus simple et d'une meilleure précision du fait que l'erreur relative ne dépasse pas les 0.3%.

Pour un nombre de Froude $F_1 = 1$, la valeur de Y_T selon l'équation (74) est égale à l'unité, ce qui traduit correctement, d'ailleurs, la phase critique de l'écoulement. Par contre, le résultat de l'application de la relation (25) pour un nombre de Froude $F_1 = 1$ est $Y_T \neq 1$.



III-4-2 Détermination expérimentale des longueurs du rouleau et du ressaut

III-4-2-1 Longueur du rouleau

Lors de l'étude théorique du ressaut en canal semi-triangulaire, des relations de calcul des longueurs relatives L_r/h_2 et L_r/h_1 respectivement du rouleau et du ressaut ont été présentées. Ces relations proposées par HAGER et WANOSCHEK étaient adaptées pour des sections triangulaires dont la cotangente de l'angle d'inclinaison m des parois est comprise entre 0.4 et 1.

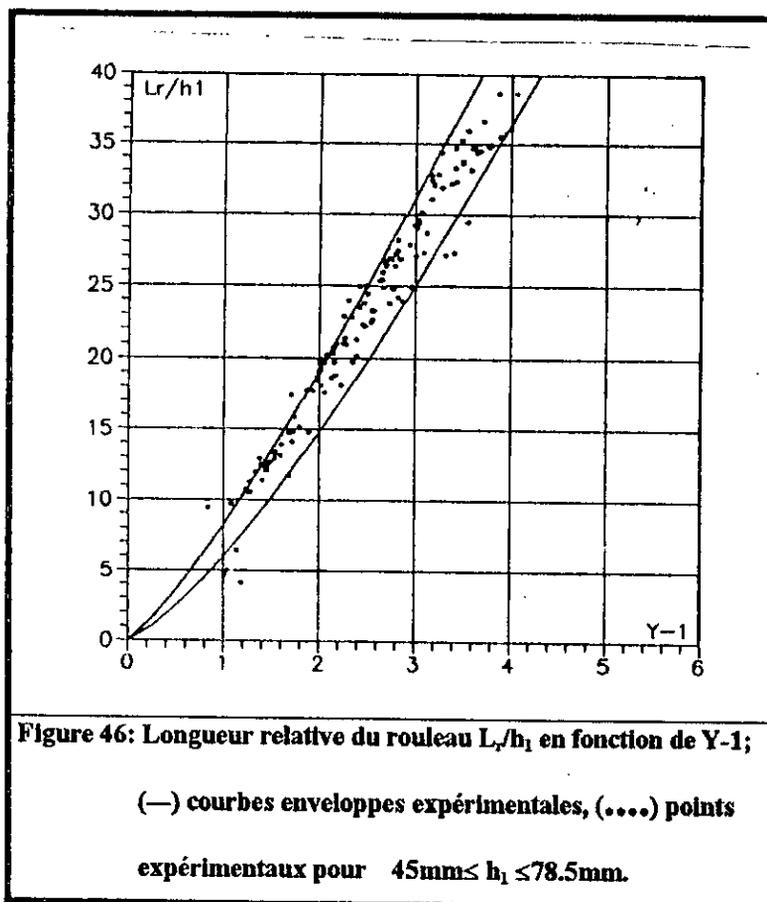
Cependant, les essais du laboratoire visant à mesurer la longueur du ressaut et celle du rouleau nous ont permis de collecter un certain nombre de mesures, sur la base desquelles, nous avons représenté graphiquement la longueur relative du rouleau L_r/h_1 en fonction de $Y=h_2/h_1$. La longueur relative du ressaut par rapport à h_2 est également représentée en fonction du nombre de Froude F_1 .

Etant donné que les mesures de la longueur du rouleau ont été prises pour des hauteurs conjuguées initiales h_1 dont les valeurs sont comprises entre 45 et 78.5 mm, la représentation graphique de la longueur relative du rouleau L_r/h_1 en fonction de $Y-1$ a engendré deux courbes enveloppes (figure 46).

Ces deux courbes enveloppes peuvent s'exprimer par les inégalités suivantes:

$$6.0 (Y-1)^{1.3} \leq L_r/h_1 \leq 8.25 (Y-1)^{1.21} \quad (75)$$

$$\text{pour } 45\text{mm} \leq h_1 \leq 78.5\text{mm}$$



Lors de nos essais, nous avons constaté en effet la difficulté de mesurer la longueur du rouleau.

Comme l'indique la bibliographie, les longueurs du rouleau et du ressaut sont des grandeurs difficiles à mesurer du fait de l'instabilité du ressaut et de l'imprécision relativement importante avec laquelle sont localisées expérimentalement les sections correspondantes; on estime ainsi que les longueurs caractéristiques du ressaut peuvent être mesurées à ± 20 cm et leur représentation graphique se présente alors sous forme de nuage de points répartis autour d'une valeur ou d'une courbe moyenne.

Les valeurs expérimentales, regroupées dans les tableaux de 10 à 18 en annexe, sont portées sur la figure 46. Nous avons délibérément représenté la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction de $Y-1$ au lieu de F_1 comme il est de coutume de le faire. La raison principale est qu'une telle représentation permet d'éliminer les erreurs commises sur la mesure des débits et par conséquent sur le calcul des nombres de Froude F_1 .

Sur la figure 46 sont représentées les valeurs expérimentales issues de sept séries de mesures effectuées sous des hauteurs initiales h_1 variant entre 45 et 78.5 mm.

Nous pouvons constater l'apparition d'un nuage de points répartis entre deux courbes enveloppes que nous avons défini comme étant:

$$6.0 (Y-1)^{1.3} \leq L_r/h_1 \leq 8.25 (Y-1)^{1.21} \quad (75)$$

$$45\text{mm} \leq h_1 \leq 78.5\text{mm}$$

Etant donnée l'erreur couramment admise dans la mesure des longueurs caractéristiques du ressaut (± 20 cm), la répartition uniforme des points de mesure est suffisamment significative. Pour les valeurs de $Y-1 > 1$, soit $Y > 2$ (valeur largement dépassée en pratique), nous pouvons admettre que les longueurs relatives L_r/h_1 varient autour d'une courbe moyenne de tendance pratiquement linéaire. Cette droite se situerait entre les courbes enveloppes définies par la relation (76) et aurait pour équation:

$$L_r/h_1 = 11 (Y - 1) - 4 \quad (76)$$

$$Y > 2$$

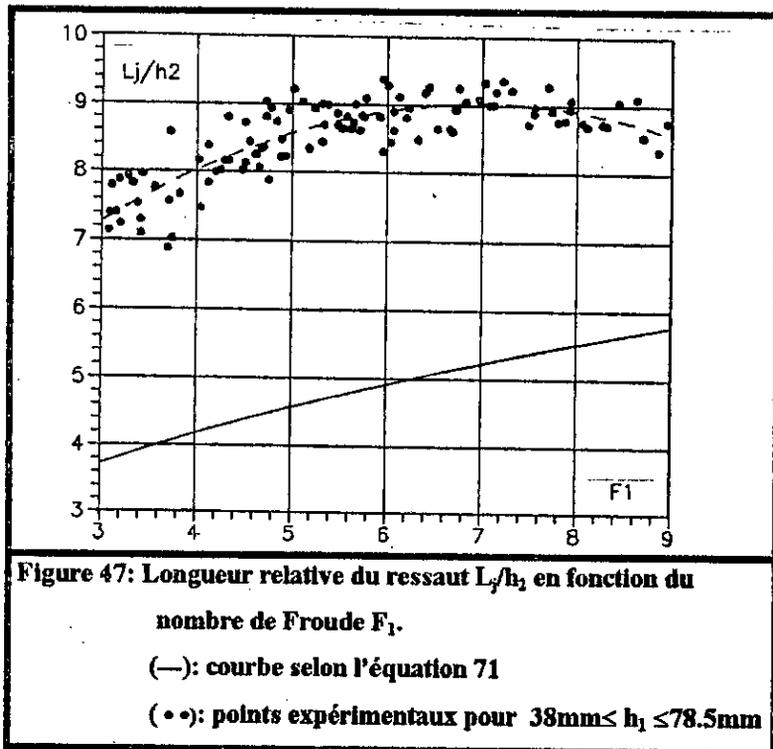
III-4-2-2 Longueur du ressaut

La longueur du ressaut difficilement mesurée notamment pour des nombres de Froude à l'amont assez élevés ($F_1 > 5$) a fait l'objet d'une représentation graphique à partir des valeurs expérimentales des longueurs relatives L_r/h_2 en fonction du nombre de Froude F_1 .

La figure 47, issue de valeurs expérimentales (tableaux de 10 à 18 en annexe) montre clairement que la courbe expérimentale moyenne de la longueur relative du ressaut se situe nettement au-dessus de la courbe tracée selon l'équation (71) proposée par HAGER et WANOSCHEK.

Cet important décalage entre les deux courbes traduit d'une part, l'existence d'un effet de la paroi verticale du canal semi-triangulaire sur la longueur du ressaut et d'autre part, l'infiabilité de l'application de l'équation (71) pour le cas d'un ressaut triangulaire symétrique.

Les longueurs relatives du ressaut L_j/h_2 varient autour d'une courbe moyenne dont les valeurs peuvent atteindre 9 pour des nombres de Froude $6 \leq F_1 \leq 8$.



III-4-3 Profil de surface généralisé

Les tableaux de 19 à 25 en annexe regroupent les valeurs expérimentales des variables y et X définissant à elles seules le profil de surface généralisé du ressaut:

$$y = (h(x) - h_1) / (h_2 - h_1)$$

$$X = x / L_j$$

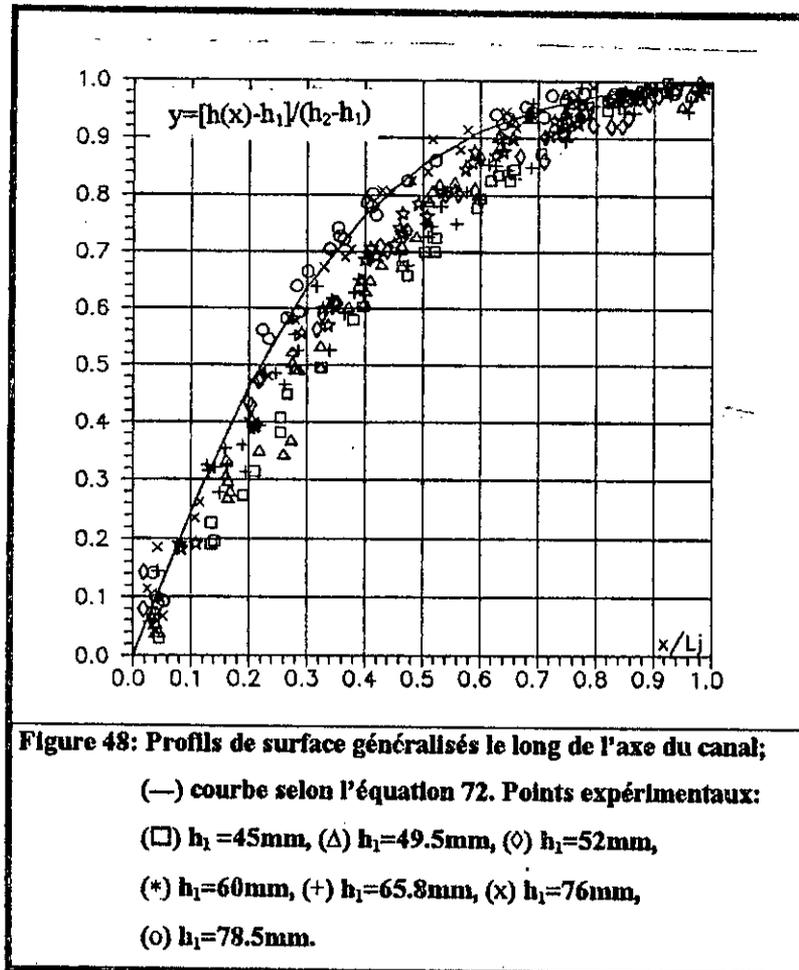
Comme nous l'avons déjà signalé, chaque série d'essais est menée sous une hauteur initiale constante du ressaut. Sept séries de mesures sont représentées sur la figure 48 pour des hauteurs h_1 telles que $45 \leq h_1 \leq 78.5$ mm.

La courbe représentée en trait continu sur la figure 48 est celle issue des travaux de HAGER et WANOSCHEK; elle correspond à des valeurs de h_1 variant entre 70 et 76 mm.

La figure 48 montre ainsi que nos points de mesures correspondant aux valeurs de h_1 égales à 76 mm et 78.5 mm se situent autour de la courbe de HAGER et WANOSCHEK.

Par contre, pour les valeurs de $h_1 < 76$ mm, les courbes obtenues s'éloignent de la courbe en trait plein au fur et à mesure que h_1 diminue. Ceci indique clairement que la relation (72) ne peut être appliquée que pour des valeurs de $h_1 \geq 76$ mm.

La figure 48 montre alors l'influence de h_1 sur la forme du profil de surface généralisé du ressaut triangulaire ($m = 1$)..



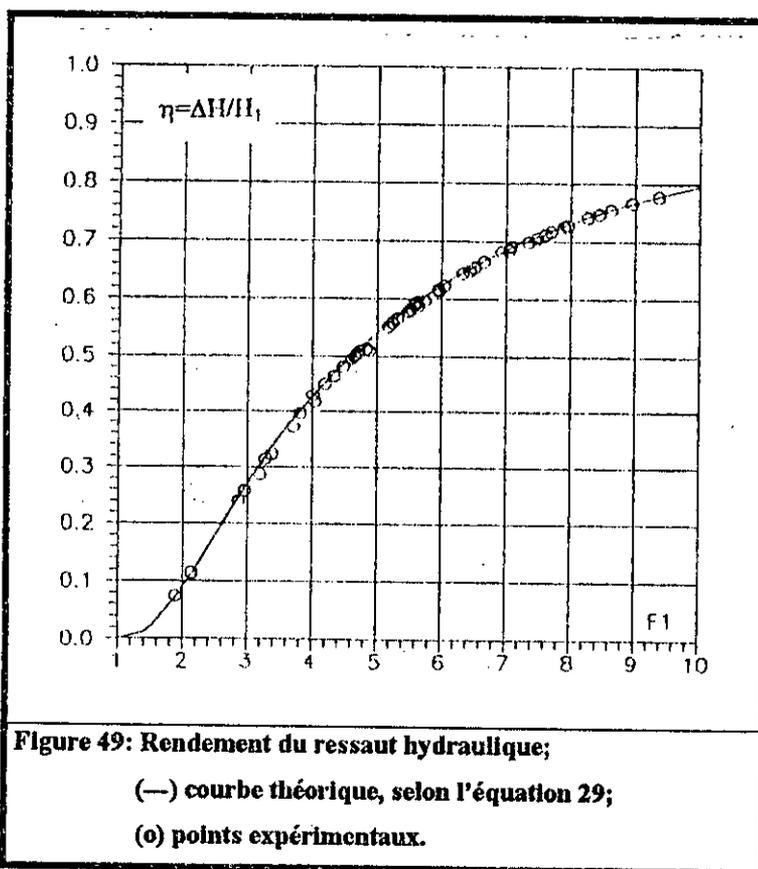
III-4-4 Détermination expérimentale du rendement du ressaut

Les résultats des essais relatifs à la détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique ont permis d'établir une comparaison de la dissipation relative d'énergie avec celle donnée par l'équation (29).

A cet effet, un léger décalage entre la courbe théorique $\eta_{\text{théorique}} = f(F_1)$ et les points expérimentaux $\eta_{\text{expérimentale}} = f(F_1)$ est observé, (figure 49):

Cela montre que les valeurs expérimentales du rendement sont sensiblement inférieures à celles du rendement théorique exprimé par la relation (29), notamment pour les nombres de Froude $F_1 < 5$.

Les valeurs expérimentales regroupées dans le tableau n° 26 en annexe et portées sur la figure 49 montre que la dissipation relative d'énergie dépend uniquement du nombre de Froude F_1 quelque soit la valeur de la hauteur conjuguée h_1 , tout en notant que les valeurs expérimentales du rendement correspondent à des hauteurs conjuguées h_1 qui varient entre 45 et 78.5 mm.



Dans la pratique, le nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut varie en général entre 8 et 9. La figure 49 indique alors que le rendement du ressaut triangulaire peut atteindre 73 à 77%. Pour la même gamme du nombre de Froude F_1 , le rendement du ressaut rectangulaire varie entre 68 et 71%.

III-5 Conclusion

Les caractéristiques principales du ressaut classique évoluant dans un canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° ont été évaluées expérimentalement.

L'étude expérimentale que nous avons effectuée sur un canal triangulaire symétrique a montré les insuffisances des relations jusqu'alors proposées.

L'analyse des résultats expérimentaux nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes:

- Les mesures des hauteurs d'eau deviennent de plus en plus difficiles au fur et à mesure que le débit augmente.
- L'erreur relative des valeurs expérimentales du rapport $Y = h_2/h_1$ a été réduite à environ 1.5% grâce à l'utilisation des guideaux qui permettent de fixer la valeur de la hauteur initiale h_1 pour chaque série de mesures.
- L'équation de la quantité de mouvement est vérifiée et l'effet des frottements sur le rapport Y des hauteurs conjuguées est négligeable.
- Deux courbes enveloppes concernant la longueur relative du rouleau L_r/h_1 ont été déduites:

$$6(Y - 1)^{1.3} \leq L_r/h_1 \leq 8.25(Y - 1)^{1.21}$$

$$45 \leq h_1 \leq 78.5 \text{ mm}$$

Pour des rapports $Y > 2$, un nuage de points répartis autour d'une courbe moyenne de tendance linéaire se situe entre les deux courbes enveloppes.

- L'expérimentation a montré que le ressaut était fortement tridimensionnel et plus ou moins instable dans la direction longitudinale. En raison du caractère tridimensionnel du ressaut, les essais effectués par HAGER et WANOSCHEK ne peuvent être extrapolés au profil triangulaire symétrique. En effet, la présence de la paroi verticale empêche le comportement naturel du ressaut occasionnant des erreurs sur la mesure quantitative de ses caractéristiques

- La forme de la représentation graphique des longueurs relatives du rouleau traduit l'imprécision relativement importante avec laquelle les longueurs caractéristiques sont localisées et mesurées.
- La longueur relative du ressaut triangulaire L_1/h_2 peut atteindre la valeur 9 pour des nombres de Froude variant de 6 à 8. Pour la même gamme de nombres de Froude, la valeur de L_1/h_2 est de l'ordre de 5, selon HAGER et WANOSCHEK
- L'influence de la hauteur initiale h_1 sur la forme du profil de surface généralisé du ressaut est observée. L'application de l'équation (62) de HAGER et WANOSCHEK reste limitée à des valeurs de $h_1 \geq 76$ mm. Pour $h_1 < 76$ mm les courbes $y = f(X)$ s'éloignent de la courbe donnée par l'équation (62) au fur et à mesure que h_1 diminue.
- Le rendement expérimentale du ressaut peut atteindre 73 à 77% pour des nombres de Froude variant entre 8 et 9.
- Les valeurs expérimentales du rendement sont légèrement inférieures aux valeurs théoriques pour des nombres de Froude $F_1 < 5$.
- La valeur maximale du rendement du ressaut rectangulaire est d'environ 71%, tandis que pour le ressaut triangulaire, le rendement peut atteindre 73%, soit 2% de plus pour un même nombre de Froude $F_1 \cong 9$.

Compte tenu des résultats expérimentaux, nous pouvons conclure que le ressaut triangulaire symétrique se caractérise par un comportement remarquablement différent à celui du ressaut en canal semi-triangulaire. Cette différence réside d'une part, dans la symétrie de la section transversale du ressaut qui permet d'effectuer les mesures le long de l'axe du canal, ce qui n'est pas possible dans la section semi-triangulaire et d'autre part, dans les différence du point de vue quantitatif et qualitatif des caractéristiques du ressaut.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail, considéré comme une contribution à l'étude du ressaut hydraulique classique dans un canal horizontal à section droite triangulaire consiste à élaborer une comparaison avec le ressaut en canal semi-triangulaire et à établir des relations analytiques et graphiques entre les différentes caractéristiques du ressaut sur la base des résultats expérimentaux.

Les essais effectués sur le modèle réduit d'un canal triangulaire symétrique ont révélé que la différence avec le comportement du ressaut en canal semi-triangulaire est significative.

L'équation du rapport des hauteurs conjuguées a été retrouvée et aucun effet des pertes de charge sur celle-ci n'a été observé, contrairement à ce qui a été proposé par Hager dans l'équation (69). En effet, l'équation (24) est confirmée et une solution approchée de celle-ci a été proposée. Cette dernière présente une erreur relative de moins de 0.3%. Les grandeurs longitudinales expérimentales du ressaut représentées par la longueur relative du rouleau et celle du ressaut ont montré, par les différentes relations et courbes expérimentales établies que l'influence du type de la section triangulaire est considérable et que la section droite triangulaire du canal engendre un ressaut dont la plupart de ses caractéristiques ne concordent pas avec celles du ressaut provoqué dans une section semi-triangulaire.

Le profil de surface du ressaut a été examiné pour plusieurs hauteurs conjuguées initiales et l'influence de ces dernières a été signalée. Cependant, le profil de surface pour des hauteurs h_1 de l'ordre de 70 mm (les valeurs de h_1 utilisées par Hager dans son étude du ressaut en canal semi-triangulaire sont comprises entre 70 et 76 mm) concordent parfaitement avec le profil de surface donné par l'équation (72).

En ce qui concerne la dissipation relative d'énergie, la courbe expérimentale du rendement du ressaut en fonction du nombre de Froude montre que les points expérimentaux correspondent aux valeurs théoriques données par l'équation (29) avec $1/M=0$.

En fin, notons que l'objectif de ce travail était d'examiner le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique et d'établir une comparaison avec l'étude présentée par Hager et wanoschek, peut être repris pour développer d'autres recherches concernant le ressaut forcé par seuil ainsi que l'examen de la structure interne du ressaut, du moment que le modèle réduit du canal triangulaire est à la disposition des chercheurs intéressés par ce type d'écoulement.

ANNEXE

**Tableau 1 : Valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut
(première série , $h_1 = 45$ mm)**

N°	Q (l/s)	F ₁	h ₂ (mm)	L _r (mm)	L _t (mm)	Y=h ₂ /h ₁
01	4.638	4.88	150.9	890	1240	3.35
02	5.309	5.58	159.9	1050	1410	3.55
03	6.027	6.33	174.3	1080	1480	3.87
04	6.337	6.66	180.3	1220	1560	4.01
05	6.597	6.93	183.9	1230	1800	4.09
06	7.124	7.49	197.2	1450	1820	4.38
07	7.323	7.70	199.1	1500	1850	4.42
08	7.551	7.94	202.6	1520	1840	4.50
09	8.032	8.44	212.1	1650	1920	4.71
10	8.515	8.95	219.1	1740	1920	4.87
11	8.918	9.37	227.8	1740	2040	5.06

**Tableau 2 : Valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut
(deuxième série , $h_1 = 49.5$ mm)**

N°	Q (l/s)	F ₁	h ₂ (mm)	L _r (mm)	L _t (mm)	Y=h ₂ /h ₁
01	4.209	3.49	132.7	580	760	2.68
02	5.126	4.25	149.7	900	1200	3.02
03	5.742	4.76	160.0	900	1260	3.23
04	6.299	5.22	167.7	1000	1300	3.39
05	6.450	5.34	172.4	1100	1500	3.48
06	7.258	6.01	185.1	1360	1720	3.74
07	7.324	6.07	189.0	1200	1630	3.81
08	8.077	6.69	199.8	1460	1720	4.04
09	8.599	7.12	206.4	1540	1860	4.17
10	9.120	7.55	219.3	1600	1950	4.43
11	9.512	7.88	227.9	1720	2000	4.60
12	9.789	8.11	228.9	1720	1990	4.62
13	10.035	8.31	231.9	1710	2020	4.68
14	10.509	8.70	237.8	1730	2030	4.80
15	10.694	8.86	242.1	1760	2020	4.89

**Tableau 3 : Valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut
(troisième série , $h_1 = 52$ mm)**

N°	Q (l/s)	F ₁	h ₂ (mm)	L _r (mm)	L _t (mm)	Y=h ₂ /h ₁
01	4.037	2.96	118.6	550	930	2.28
02	4.482	3.28	127.5	630	1010	2.45
03	5.486	4.02	145.6	790	1190	2.80
04	6.412	4.70	165.0	980	1380	3.17
05	7.487	5.48	184.1	1170	1600	3.54
06	7.678	5.62	185.1	1180	1600	3.56
07	8.795	6.44	205.0	1450	1900	3.94
08	8.137	5.96	195.0	1400	1830	3.75
09	9.664	7.08	214.2	1495	1930	4.12
10	10.785	7.90	234.1	1750	2050	4.50
11	11.294	8.27	241.8	1790	2110	4.65
12	11.782	8.63	248.1	1810	2260	4.77

**Tableau 4 : Valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut
(quatrième série , $h_1 = 56.7$ mm)**

N°	Q (l/s)	F_1	h_2 (mm)	L_r (mm)	L_1 (mm)	$Y=h_2/h_1$
01	4.937	2.91	128.2	600	920	2.26
02	5.218	3.08	132.8	680	950	2.34
03	5.354	3.16	134.9	735	1000	3.38
04	5.783	3.41	143.7	760	1020	2.53
05	6.261	3.70	152.4	840	1050	2.69
06	6.987	4.12	163.4	1010	1370	2.88
07	7.646	4.51	174.4	1150	1520	3.08
08	8.017	4.73	179.3	1180	1620	3.16
09	8.107	4.78	185.1	1300	1655	3.26
10	8.514	5.02	187.5	1360	1730	3.31
11	9.120	5.38	197.6	1420	1780	3.49
12	9.689	5.71	209.9	1500	1810	3.70
13	10.289	6.07	216.7	1600	1930	3.82
14	11.076	6.53	227.8	1650	1970	4.02
15	11.572	6.83	236.2	1840	2140	4.16
16	11.824	6.97	236.3	1860	2150	4.17
17	12.130	7.15	242.0	1950	2230	4.27
18	12.819	7.56	250.6	1970	2250	4.42
19	13.120	7.74	254.5	2000	2270	4.49
20	13.437	7.93	258.0	2040	2310	4.55

**Tableau 5 : Valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut
(cinquième série , $h_1 = 60$ mm)**

N°	Q (l/s)	F_1	h_2 (mm)	L_r (mm)	L_1 (mm)	$Y=h_2/h_1$
01	5.783	2.96	136.5	680	1040	2.28
02	6.222	3.19	146.1	740	1150	2.44
03	6.506	3.33	149.6	760	1170	2.49
04	6.706	3.43	152.1	780	1210	2.54
05	6.952	3.56	155.9	790	1210	2.60
06	7.895	4.04	173.9	890	1300	2.90
07	8.740	4.48	183.4	1060	1470	3.06
08	9.013	4.62	187.8	1120	1550	3.13
09	10.101	5.18	203.5	1280	1700	3.39
10	10.393	5.32	207.1	1340	1750	3.45
11	10.808	5.53	214.0	1400	1850	3.57
12	11.636	5.96	223.9	1430	1860	3.73
13	11.803	6.04	226.0	1490	1910	3.77
14	12.723	6.51	237.8	1500	1910	3.96
15	14.356	7.35	259.0	1630	2050	4.32
16	14.865	7.61	264.5	1640	2100	4.41
17	15.563	7.97	272.9	1770	2200	4.55
18	15.737	8.06	275.3	1990	2410	4.59

**Tableau 6 : Valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut
(sixième série , $h_1 = 65.8$ mm)**

N°	Q (l/s)	F ₁	h ₂ (mm)	L _r (mm)	L ₁ (mm)	Y=h ₂ /h ₁
01	5.866	2.38	132.0	310	540	2.01
02	6.223	2.53	134.0	330	600	2.04
03	6.450	2.62	140.5	450	770	2.14
04	9.147	3.72	178.4	1150	1530	2.71
05	10.556	4.29	196.1	1220	1600	2.98
06	11.207	4.56	203.9	1330	1720	3.10
07	12.131	4.93	215.0	1410	1770	3.27
08	13.473	5.48	231.1	1610	2050	3.51
09	14.341	5.53	241.7	1640	2090	3.67
10	15.242	6.20	253.1	1770	2230	3.85
11	16.519	6.72	265.0	1950	2370	4.03
12	17.749	7.22	274.4	2160	2570	4.24
13	17.985	7.31	281.8	2200	2600	4.28

**Tableau 7 : Valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut
(septième série , $h_1 = 70$ mm)**

N°	Q (l/s)	F ₁	h ₂ (mm)	L _r (mm)	L ₁ (mm)	Y=h ₂ /h ₁
01	7.550	2.63	153.5	290	620	2.19
02	8.877	3.09	169.0	800	1250	2.41
03	10.740	3.74	190.5	990	1340	2.72
04	12.430	4.33	211.4	1345	1860	3.02
05	14.272	4.97	233.5	1600	2080	3.34
06	15.275	5.32	243.0	1670	2190	3.47
07	16.293	5.67	256.5	1820	2310	3.66
08	16.594	5.78	259.2	1850	2360	3.70
09	17.889	6.23	265.5	1850	2380	3.79
10	18.370	6.40	279.5	2050	2570	3.99
11	19.421	6.76	285.0	2110	2640	4.07
12	20.176	7.03	294.3	2250	2750	4.20

**Tableau 8 : Valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut
(huitième série , $h_1 = 76$ mm)**

N°	Q (l/s)	F ₁	h ₂ (mm)	L _r (mm)	L ₁ (mm)	Y=h ₂ /h ₁
01	8.166	2.32	143.5	720	1140	1.89
02	9.147	2.59	157.8	740	1200	2.08
03	10.965	3.11	182.3	950	1420	2.40
04	12.029	3.41	198.5	1060	1450	2.61
05	14.529	4.12	223.5	1350	1750	2.94
06	15.909	4.51	232.5	1500	1890	3.06
07	16.519	4.68	239.5	1550	2000	3.15
08	17.253	4.89	247.7	1600	2100	3.26
09	18.027	5.11	260.0	1900	2350	3.42
10	20.299	5.76	275.5	1930	2430	3.63
11	20.905	5.93	283.5	2050	2500	3.73
12	21.609	6.13	288.5	2070	2630	3.80

**Tableau 9 : Valeurs expérimentales des caractéristiques du ressaut
(neuvième série , $h_1 = 78.5$ mm)**

N°	Q (l/s)	F_1	h_2 (mm)	L_2 (mm)	L_1 (mm)	$Y=h_2/h_1$
01	10.965	2.87	175.8	850	1250	2.24
02	12.231	3.20	193.5	980	1400	2.46
03	12.915	3.38	199.0	1050	1500	2.54
04	14.186	3.71	214.0	1170	1620	2.73
05	14.614	3.82	215.0	1250	1650	2.74
06	16.063	4.20	228.8	1400	1830	2.91
07	16.594	4.34	235.3	1500	1920	3.00
08	17.819	4.66	247.9	1550	2000	3.16
09	18.096	4.73	249.8	1650	2200	3.18
10	18.503	4.84	257.5	1650	2250	3.28
11	20.052	5.24	268.5	1850	2400	3.42
12	21.609	5.65	286.5	2000	2500	3.65
13	21.953	5.74	288.5	2100	2550	3.68

**Tableau 10 : Valeurs relatives des caractéristiques du ressaut
(première série , $h_1 = 45$ mm)**

N°	Q (l/s)	F_1	L_2/h_1	L_3/h_1	L_4/h_1	L_5/h_1	$Y=h_2/h_1$
01	4.638	4.88	19.78	5.90	27.56	8.22	3.35
02	5.309	5.58	23.33	6.57	31.33	8.82	3.55
03	6.027	6.33	24.00	6.20	32.89	8.49	3.87
04	6.337	6.66	27.11	6.77	34.67	8.65	4.01
05	6.597	6.93	27.33	6.69	40.00	9.79	4.09
06	7.124	7.49	32.22	7.35	38.22	8.72	4.38
07	7.323	7.70	33.33	7.53	41.11	9.29	4.42
08	7.551	7.94	33.78	7.50	40.89	9.08	4.50
09	8.032	8.44	36.67	7.78	42.67	9.05	4.71
10	8.515	8.95	38.67	7.94	42.67	8.76	4.87
11	8.918	9.37	38.67	7.64	45.33	8.96	5.06

**Tableau 11 : Valeurs relatives des caractéristiques du ressaut
(deuxième série , $h_1 = 49.5$ mm)**

N°	Q (l/s)	F_1	L_2/h_1	L_3/h_1	L_4/h_1	L_5/h_1	$Y=h_2/h_1$
01	4.209	3.49	11.72	4.37	15.35	5.73	2.68
02	5.126	4.25	18.18	6.01	24.24	8.02	3.02
03	5.742	4.76	18.18	5.63	25.45	7.88	3.23
04	6.299	5.22	20.20	5.96	26.26	7.75	3.39
05	6.450	5.34	22.22	6.38	30.30	8.70	3.48
06	7.258	6.01	27.47	7.35	34.75	9.29	3.82
07	7.324	6.07	24.24	6.35	32.93	8.62	3.82
08	8.077	6.69	29.49	7.31	34.75	8.61	4.04
09	8.599	7.12	31.11	7.46	37.58	9.01	4.17
10	9.120	7.55	32.32	7.30	39.39	8.89	4.43
11	9.512	7.88	34.75	7.55	40.40	8.78	4.60
12	9.789	8.11	34.75	7.51	40.20	8.69	4.62
13	10.035	8.31	34.55	7.37	40.81	8.71	4.68
14	10.509	8.70	34.95	7.28	41.01	8.54	4.80
15	10.694	8.86	35.56	7.27	40.81	8.34	4.89

**Tableau 12 : Valeurs relatives des caractéristiques du ressaut
(troisième série, $h_1 = 52$ mm)**

N°	Q (Us)	F ₁	L _r /h ₁	L _r /h ₂	L _r /h ₁	L _r /h ₂	Y=h ₂ /h ₁
01	4.037	2.96	10.58	4.64	17.88	7.84	2.28
02	4.482	3.28	12.12	4.94	19.42	7.92	2.45
03	5.486	4.02	15.19	5.43	22.88	8.17	2.80
04	6.412	4.70	18.85	5.94	26.54	8.36	3.17
05	7.487	5.48	22.50	6.36	30.77	8.69	3.54
06	7.678	5.62	22.69	6.37	30.77	8.64	3.56
07	8.795	6.44	27.88	7.07	36.54	9.27	3.94
08	8.137	5.96	26.92	7.18	35.19	9.38	3.75
09	9.664	7.08	28.75	6.98	37.12	9.01	4.12
10	10.785	7.80	33.65	7.48	39.42	8.76	4.50
11	11.294	8.27	34.42	7.40	40.58	8.73	4.65
12	11.782	8.63	34.81	7.30	43.46	9.11	4.77

**Tableau 13 : Valeurs relatives des caractéristiques du ressaut
(quatrième série, $h_1 = 56.7$ mm)**

N°	Q (Us)	F ₁	L _r /h ₁	L _r /h ₂	L _r /h ₁	L _r /h ₂	Y=h ₂ /h ₁
01	4.937	2.91	10.58	4.68	16.23	7.18	2.26
02	5.218	3.08	11.99	5.12	16.75	7.15	2.34
03	5.354	3.16	12.96	5.45	17.64	7.41	2.38
04	5.783	3.41	13.40	5.29	17.99	7.10	2.53
05	6.261	3.70	14.81	5.51	18.52	6.89	2.69
06	6.987	4.12	17.81	6.18	24.16	8.38	2.88
07	7.646	4.51	20.28	6.59	26.81	8.72	3.08
08	8.017	4.73	20.81	6.58	28.57	9.04	3.16
09	8.107	4.78	22.93	7.02	29.19	8.94	3.26
10	8.514	5.02	23.99	7.25	30.51	9.23	3.31
11	9.120	5.38	25.04	7.19	31.39	9.00	3.49
12	9.689	5.71	26.46	7.15	31.92	8.62	3.70
13	10.289	6.07	28.22	7.38	34.04	8.91	3.82
14	11.076	6.53	29.10	7.24	34.74	8.65	4.02
15	11.572	6.83	32.45	7.79	37.74	9.06	4.17
16	11.824	6.97	32.80	7.87	37.92	9.10	4.17
17	12.130	7.15	34.39	8.06	39.33	9.21	4.27
18	12.819	7.56	34.74	7.86	39.68	8.98	4.42
19	13.120	7.74	35.27	7.86	40.04	8.92	4.49
20	13.437	7.93	35.98	7.91	40.74	8.95	4.55

**Tableau 14 : valeurs relatives des caractéristiques du ressaut
(cinquième série, $h_1 = 60$ mm)**

N°	Q (l/s)	F ₁	L ₁ /h ₁	L ₂ /h ₂	L ₃ /h ₃	L ₄ /h ₄	Y=h ₂ /h ₁
01	5.783	2.96	11.33	4.98	17.33	7.62	2.28
02	6.223	3.19	12.33	5.07	19.17	7.87	2.44
03	6.506	3.33	12.67	5.08	19.50	7.82	2.49
04	6.706	3.43	13.00	5.13	20.17	7.96	2.54
05	6.952	3.56	13.17	5.07	20.17	7.76	2.60
06	7.895	4.04	14.83	5.12	21.67	7.48	2.90
07	8.740	4.48	17.67	5.78	24.50	8.02	3.06
08	9.013	4.62	18.67	5.96	25.83	8.25	3.13
09	10.101	5.18	21.33	6.29	28.33	8.35	3.39
10	10.393	5.32	22.33	6.47	29.17	8.45	3.45
11	10.808	5.53	23.33	6.54	30.83	8.64	3.57
12	11.636	5.96	23.83	6.39	31.00	8.31	3.73
13	11.803	6.04	24.83	6.59	31.83	8.45	3.77
14	12.723	6.51	25.00	6.31	31.83	8.03	3.96
15	14.356	7.35	27.17	6.29	34.17	7.92	4.32
16	14.865	7.61	27.33	6.20	35.00	7.94	4.41
17	15.563	9.97	29.50	6.49	36.67	8.06	4.55
18	15.737	8.06	33.17	7.23	40.17	8.75	4.59

**Tableau 15 : Valeurs relatives des caractéristiques du ressaut
(sixième série, $h_1 = 65.8$ mm)**

N°	Q (l/s)	F ₁	L ₁ /h ₁	L ₂ /h ₂	L ₃ /h ₃	L ₄ /h ₄	Y=h ₂ /h ₁
01	5.866	2.38	4.71	2.35	8.21	4.09	2.01
02	6.223	2.53	5.02	2.46	9.12	4.48	2.04
03	6.450	2.62	6.48	3.20	11.70	5.48	2.14
04	9.147	3.72	17.48	6.45	23.25	8.57	2.71
05	10.556	4.29	18.54	6.22	24.32	8.16	2.98
06	11.207	4.56	20.21	6.52	26.14	8.44	3.10
07	12.131	4.93	21.43	6.56	26.90	8.23	3.27
08	13.473	5.48	24.47	6.97	31.16	8.87	3.51
09	14.341	5.53	24.92	6.97	31.76	8.65	3.67
10	15.242	6.20	26.90	6.99	33.89	8.81	3.85
11	16.519	6.72	29.64	7.36	36.02	8.94	4.03
12	17.749	7.22	32.83	7.87	39.06	9.37	4.24
13	17.985	7.31	31.91	7.45	39.51	9.23	4.28

**Tableau 16 : Valeurs relatives des caractéristiques du ressaut
(septième série, $h_1 = 70$ mm)**

N°	Q (l/s)	F ₁	L ₁ /h ₁	L ₂ /h ₂	L ₃ /h ₃	L ₄ /h ₄	Y=h ₂ /h ₁
01	7.551	2.63	4.14	1.89	8.86	4.04	2.19
02	8.877	3.09	11.43	4.73	17.86	7.40	2.41
03	10.740	3.74	14.14	5.20	19.14	7.03	2.72
04	12.430	4.33	19.21	6.36	26.57	8.80	3.02
05	14.272	4.97	22.86	6.85	29.71	8.91	3.34
06	15.275	5.32	23.86	6.87	31.29	9.01	3.47
07	16.293	5.67	26.00	7.10	33.00	9.01	3.66
08	16.594	5.78	26.43	7.14	33.71	9.10	3.70
09	17.889	6.23	26.43	6.97	34.00	8.96	3.79
10	18.370	6.40	29.29	7.33	36.71	9.19	3.99
11	19.421	6.76	30.14	7.40	37.71	9.26	4.07
12	20.176	7.03	32.14	7.65	39.29	9.34	4.20

**Tableau 17 : Valeurs relatives des caractéristiques du ressaut
(huitième série, $h_1 = 76$ mm)**

N°	Q (l/s)	F_1	L_r/h_1	L_r/h_2	L_r/h_1	L_r/h_2	$Y=h_2/h_1$
01	8.166	2.32	9.47	5.02	15.00	7.94	1.84
02	9.147	2.59	9.74	4.69	15.79	7.60	2.08
03	10.965	3.11	12.50	5.21	18.68	7.79	2.40
04	12.029	3.41	13.95	5.34	19.08	7.30	2.61
05	14.529	4.12	17.76	6.04	23.03	7.83	2.94
06	15.909	4.51	19.74	6.45	24.87	8.13	3.06
07	16.519	4.68	20.39	6.47	26.32	8.35	3.15
08	17.253	4.89	21.05	6.46	27.63	8.48	3.26
09	18.027	5.11	25.00	7.31	30.92	9.04	3.42
10	20.299	5.76	25.39	7.01	31.97	8.82	3.63
11	20.905	5.93	26.97	7.23	32.89	8.82	3.73
12	21.609	6.13	27.24	7.18	34.61	9.12	3.80

**Tableau 18 : Valeurs relatives des caractéristiques du ressaut
(neuvième série, $h_1 = 78.5$)**

N°	Q (l/s)	F_1	L_r/h_1	L_r/h_2	L_r/h_1	L_r/h_2	$Y=h_2/h_1$
01	10.965	2.87	10.83	4.84	15.92	7.11	2.24
02	12.231	3.20	12.48	5.06	17.83	7.24	2.46
03	12.915	3.38	13.38	5.28	19.11	7.54	2.54
04	14.186	3.71	14.90	5.47	20.64	7.57	2.73
05	14.614	3.82	15.92	5.81	21.02	7.67	2.74
06	16.063	4.20	17.83	6.12	23.31	7.99	2.91
07	16.594	4.34	19.11	5.92	24.46	8.16	3.00
08	17.819	4.66	19.75	6.25	25.48	8.07	3.16
09	18.096	4.73	21.02	6.61	28.03	8.81	3.18
10	18.503	4.84	21.02	6.41	28.66	8.74	3.28
11	20.052	5.24	23.57	6.89	30.57	8.94	3.42
12	21.609	5.65	25.48	6.98	31.85	8.73	3.65
13	21.953	5.74	26.75	7.28	32.48	8.84	3.68

Tableau 19: Valeurs expérimentales des paramètres sans dimension du profil de surface généralisé. (première série, $h_1 = 45$ mm)

N°	$X = x / L_1$	$y = [h(x) - h_1] / [h_2 - h_1]$
01	0.0453	0.0286
02	0.1354	0.1903
03	0.1354	0.2275
04	0.1413	0.1961
05	0.1907	0.2735
06	0.2097	0.3144
07	0.2552	0.3818
08	0.2552	0.4084
09	0.2663	0.4492
10	0.3244	0.4963
11	0.3802	0.5804
12	0.3967	0.6041
13	0.4640	0.6759
14	0.4730	0.6592
15	0.5026	0.7008
16	0.5216	0.7015
17	0.5244	0.7253
18	0.5946	0.7784
19	0.6006	0.7951
20	0.6186	0.8263
21	0.6318	0.8354
22	0.6520	0.8260
23	0.6592	0.8458
24	0.7052	0.8739
25	0.7448	0.9118
26	0.7776	0.9423
27	0.7795	0.9442
28	0.7837	0.9448
29	0.8196	0.9490
30	0.8779	0.9721
31	0.8838	0.9820
32	0.9223	0.9816
33	0.9243	0.9978
34	0.9743	0.9899

Tableau 20: Valeurs expérimentales des paramètres sans dimensions du profil de surface généralisé (deuxième série, $h_1 = 49.5$ mm)

N°	$X = x/L_1$	$y = [h(x) - h_1]/[h_2 - h_1]$
01	0.0390	0.0392
02	0.0400	0.0548
03	0.1616	0.3086
04	0.1640	0.2696
05	0.1648	0.2988
06	0.1682	0.2803
07	0.2187	0.3507
08	0.2603	0.3448
09	0.2733	0.3693
10	0.2762	0.5049
11	0.2762	0.5244
12	0.2790	0.4944
13	0.2804	0.4928
14	0.2862	0.4929
15	0.3244	0.5339
16	0.3720	0.6037
17	0.3931	0.6506
18	0.3950	0.6542
19	0.4092	0.6514
20	0.4290	0.6788
21	0.4639	0.7117
22	0.4896	0.7290
23	0.5089	0.7966
24	0.5114	0.7897
25	0.5165	0.8088
26	0.5297	0.8209
27	0.5554	0.8241
28	0.6006	0.8717
29	0.6310	0.9028
30	0.6342	0.9076
31	0.6437	0.9002
32	0.6569	0.9305
33	0.6887	0.9369
34	0.7448	0.9277
35	0.7475	0.9468
36	0.7475	0.9792
37	0.7550	0.9619
38	0.7588	0.9783
39	0.7744	0.9617
40	0.8695	0.9788
41	0.8737	0.9874
42	0.8738	0.9875
43	0.8825	0.9871
44	0.8869	0.9899

Tableau 21: Valeurs expérimentales des paramètres sans dimensions du profil de surface généralisé (troisième série, $h_1 = 52$ mm)

N°	$X = x/L_1$	$y = [h(x) - h_1]/[h_2 - h_1]$
01	0.0189	0.0790
02	0.0195	0.1428
03	0.1990	0.4347
04	0.2048	0.4305
05	0.2176	0.4735
06	0.2211	0.4778
07	0.3175	0.5638
08	0.3268	0.5909
09	0.3472	0.6104
10	0.3526	0.6092
11	0.4265	0.7113
12	0.4390	0.7029
13	0.4663	0.7306
14	0.4737	0.7386
15	0.5403	0.8014
16	0.5625	0.8032
17	0.5907	0.8089
18	0.6000	0.8660
19	0.6683	0.8693
20	0.7098	0.8613
21	0.7125	0.9031
22	0.7486	0.9308
23	0.7725	0.9399
24	0.7951	0.9237
25	0.8261	0.9212
26	0.8446	0.9217
27	0.8563	0.9372
28	0.8579	0.9745
29	0.8815	0.9779
30	0.8907	0.9629
31	0.9073	0.9753
32	0.9637	0.9753
33	0.9789	0.9974

Tableau 22: Valeurs expérimentales des paramètres sans dimension du profil de surface généralisé (quatrième série, $h_1 = 60\text{mm}$)

N°	$X = x / L_1$	$y = [h(x)-h_1]/[h_2-h_1]$
01	0.0811	0.1917
02	0.0835	0.1840
03	0.1092	0.1932
04	0.2052	0.4038
05	0.2108	0.3929
06	0.2119	0.3948
07	0.2912	0.5566
08	0.3277	0.6001
09	0.3366	0.5717
10	0.3384	0.6019
11	0.4009	0.6876
12	0.4105	0.7081
13	0.4205	0.6935
14	0.4513	0.7154
15	0.4609	0.7440
16	0.4634	0.7352
17	0.4659	0.7694
18	0.4926	0.7872
19	0.5071	0.7652
20	0.5351	0.8070
21	0.5561	0.8099
22	0.5743	0.8470
23	0.5866	0.8590
24	0.5898	0.8780
25	0.6269	0.8708
26	0.6405	0.8778
27	0.6561	0.9005
28	0.7193	0.9066
29	0.7281	0.9318
30	0.7463	0.9206
31	0.7686	0.9279
32	0.8241	0.9679
33	0.8417	0.9663
34	0.8462	0.9762
35	0.8508	0.9838
36	0.8677	0.9703
37	0.8922	0.9879
38	0.9259	0.9930
39	0.9781	0.9825
40	0.9833	0.9939
41	0.9886	0.9922

Tableau 23: Valeurs expérimentales des paramètres sans dimensions du profil de surface généralisé (cinquième série, $h_1 = 65.8$ mm)

N°	$X = x/L_1$	$y = [h(x) - h_1]/[h_2 - h_1]$
01	0.0295	0.0572
02	0.0335	0.0813
03	0.0407	0.1028
04	0.0438	0.1435
05	0.1304	0.3149
06	0.1603	0.3535
07	0.1893	0.3599
08	0.2094	0.3891
09	0.2189	0.3934
10	0.2250	0.4870
11	0.2276	0.4864
12	0.2468	0.4859
13	0.2799	0.5537
14	0.3439	0.6175
15	0.3655	0.5921
16	0.3824	0.6288
17	0.3899	0.6521
18	0.3976	0.6316
19	0.4058	0.6907
20	0.4105	0.6851
21	0.4605	0.6964
22	0.4738	0.6763
23	0.5094	0.7283
24	0.5146	0.7453
25	0.5327	0.7806
26	0.5422	0.8072
27	0.5762	0.8073
28	0.6148	0.8539
29	0.6268	0.8518
30	0.6883	0.8499
31	0.6895	0.9449
32	0.6907	0.9620
33	0.7344	0.9136
34	0.7489	0.9448
35	0.7840	0.9644
36	0.7960	0.9568
37	0.8399	0.9574
38	0.8672	0.9698
39	0.9280	0.9775
40	0.9750	0.9824

Tableau 24: Valeurs expérimentales des paramètres sans dimension du profil de surface généralisé (sixième série, $h_1 = 76$ mm)

N°	$X = x / L_i$	$y = [h(x)-h_1]/[h_2-h_1]$
01	0.0255	0.1141
02	0.0300	0.0649
03	0.0343	0.0508
04	0.0414	0.0694
05	0.0423	0.1847
06	0.0526	0.0667
07	0.1082	0.2365
08	0.1160	0.2626
09	0.2050	0.4740
10	0.2343	0.4814
11	0.2716	0.5820
12	0.2809	0.5793
13	0.3300	0.6734
14	0.3663	0.6917
15	0.3771	0.7058
16	0.4297	0.8094
17	0.4450	0.8073
18	0.4809	0.8261
19	0.5086	0.8420
20	0.5171	0.8979
21	0.5650	0.8807
22	0.5787	0.9147
23	0.6457	0.9458
24	0.6626	0.9183
25	0.6800	0.9346
26	0.6851	0.9359
27	0.7771	0.9614
28	0.7947	0.9907
29	0.8601	0.9749

**Tableau 25: Valeurs expérimentales des paramètres sans dimensions
du profil de surface généralisé (septième série, $h_1 = 78.5$ mm)**

N°	$X = x/L_1$	$y = [h(x)-h_1]/[h_2-h_1]$
01	0.0356	0.1408
02	0.0417	0.1001
03	0.0437	0.0878
04	0.0533	0.0929
05	0.2240	0.5619
06	0.2350	0.5456
07	0.2654	0.5830
08	0.2833	0.6400
09	0.2867	0.5942
10	0.3022	0.6654
11	0.3400	0.7060
12	0.3542	0.7423
13	0.3569	0.7286
14	0.3640	0.7236
15	0.4041	0.7877
16	0.4121	0.7810
17	0.4136	0.8027
18	0.4198	0.7661
19	0.4740	0.8259
20	0.5227	0.8611
21	0.6273	0.9416
22	0.6392	0.9257
23	0.6500	0.9348
24	0.6792	0.9553
25	0.6900	0.9463
26	0.7099	0.9373
27	0.7244	0.9760
28	0.7480	0.9668
29	0.7792	0.9795
30	0.8214	0.9652
31	0.8275	0.9738
32	0.8311	0.9788
33	0.8440	0.9808
34	0.8519	0.9675
35	0.8792	0.9842
36	0.9350	0.9805
37	0.9378	0.9888

Tableau 26 : Valeurs de la dissipation relative d'énergie η

N°	F ₁	$\eta_{\text{théorique}}$	$\eta_{\text{expérimentale}}$
01	1.8893	0.0713	0.0743
02	2.1356	0.1132	0.1140
03	2.8674	0.2482	0.2404
04	2.9562	0.2641	0.2585
05	3.2822	0.3200	0.3158
06	3.7099	0.3865	0.3725
07	3.8218	0.4026	0.3972
08	4.0426	0.4327	0.4186
09	4.2009	0.4531	0.4500
10	4.4750	0.4860	0.4816
11	4.6151	0.5017	0.4964
12	4.6957	0.5104	0.5044
13	4.7324	0.5143	0.5095
14	4.8756	0.5290	0.5102
15	5.1754	0.5578	0.5523
16	5.3216	0.5709	0.5667
17	5.4823	0.5845	0.5785
18	5.5800	0.5925	0.5899
19	5.6513	0.5982	0.5887
20	5.7413	0.6052	0.5975
21	5.9579	0.6212	0.6175
22	6.0435	0.6273	0.6238
23	6.4403	0.6534	0.6495
24	6.6610	0.6667	0.6651
25	6.9340	0.6820	0.6829
26	7.0564	0.6885	0.6856
27	7.3521	0.7033	0.6998
28	7.4876	0.7097	0.7057
29	7.6980	0.7192	0.7177
30	7.8975	0.7277	0.7264
31	7.9689	0.7306	0.7283
32	8.2704	0.7425	0.7421
33	8.4423	0.7489	0.7476
34	8.6277	0.7555	0.7548
35	8.9500	0.7663	0.7667
36	9.3740	0.7793	0.7781

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ARGYROPOULOS, P.A. « general solution of the hydraulic jump in sloping channels » Proc. ASCE j. Hydr. Div. Vol. 88, 1962, Hy 4, pp 61-75.
- [2] BAKMETEFF, B.A. , MATZKE, A.E. , « the hydraulic jump in terms of dynamic similarity », Trans. ASCE, Vol. 101, 1936, 630-680.
- [3] BRADLY, J.N. , PETERKA, A.J. , « the hydraulic design of stilling basins: hydraulic jump on a horizontal apron », Proc. ASCE, j. Hydr. Div. , Vol. 83, 1957, 1401/1-24.
- [4] BREMEN, R. , HAGER, W.H. , « T-jump in abruptly expanding channel », j. hydr. Ressearch, Vol. 31, 1993,61-77.
- [5] BRETZ, N.V. , « ressaut hydraulique forcé par seuil », communication 2, Ec. Polytech. Fédérale de Lausane, 1988, pp. 43-85.
- [6] CITRINI, D. , « il salto di Bidone », L'energia Electrica, 1939, 441-465, 517-527.
- [7] FORSTER, J.W. , SKRINDE, R.A. , « control of the hydraulic jump by sills », Trans. ASCE, Vol. 115, 1950, 973-1022.
- [8] GIBSON, A.H. , «the formation of standing waves in an open channel », Minutes of proc. of the inst. of civil eng. , Vol. CXCVII, 1914, 233-142.
- [9] HAGER, W.H. , « hydraulic jump in non-prismatic channels », j. hydr.. Ressearch, Vol. 23, 1985, 21-35.
- [10] HAGER, W.H. , BRETZ, N.V. , « hydraulic jump in at positive and negative steps », j. hydr. Ressearch, Vol. 24, 1986, 237-253.
- [11] HAGER, H.W. , SINNIGER, R. , « flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise » j. Hydr. Ressearch, Vol. 23, 1985, 2, pp. 101-113, Vol. 24, 1986, 3, pp. 207-215.
- [12] HAGER, W.H. , WANOSCHEK, R. , « hydraulic jump in triangular channel », j. hydr. Ressearch, Vol.25, 1988, 549-564.
- [13] HAGER, W.H. , « hydraulic jump in U-shaped channel », j. hydr. Ressearch, Vol. 115, 1989, 667-675.
- [14] HAGER, W.H. , BREMEN, R. , « classical hydraulic jump: sequent depths », j. hydr. Ressearch, Vol. 27, 1989, 565-585.
- [15] HAGER, W.H. , BREMEN, R. , KAWAGOSHI, N.J. , « classical hydraulic jump: jump length », j. hydr. Ressearch, Vol. 28, 1990, 591-607.
- [16] HAGER, W.H. , DAMEL, L. , « sill-controlled energy dissipator », j. hydr. Ressearch, Vol. 30, 1992, 165-181.
- [17] HARLEMAN, D.R.F. , « discussion to Rouse,et al. , Trans. ASCE, Vol. 124, 1959, 959-962.
- [18] HERBRAND, K. , « der wechsels prung unter dem einfluss der luft beimischung », Die wasserwirtschaft, Heft. 9, 1969, 254-260.
- [19] KAWAGOSHI, N. , HAGER, W.H. , « B-jump in sloping channel,II », j. Hydr. Ressearch, Vol. 28, 1990, 461-479.
- [20] KENNISON, K.R. , « the hydraulic jump in open channel flow at high velocity », Trans. ASCE, Vol. 42, 1916, 338-420.
- [21] KHADER, M.H.A. , ELANGO, K. , « turbulent pressure field beneath a hydraulic jump », j. hydr.. Ressearch, Vol. 12, 1974, 469-489.
- [22] MACHA, L. , « untersuchingen über die wirksamkeit von tosbecken », thèse présentée à la T.U. Berlin, Mittl. 61,1963.

- [23] MARTIN VIDE, J.P. , DOLZ, J. , DEL ESTAL, J. , « kinematics of the moving hydraulic jump », j. hydr. Ressearch, Vol. 31, 1993, 171-185.
- [24] MC CORQUODALE, J.A. , MOHAMED, M.S. , « hydraulic jump on adverse slopes », j. hydr. Ressearch, Vol. 32, 1994, 119-130.
- [25] NANDANA, V. , AYED, M.A.G. , « modified type III stilling basin - now method of design » j. Hydr. Ressearch, Vol. 30, n° 4, 1992.
- [26] RAJARATNAM, N. , « the hydraulic jump », Advances in hydrosiences, ed. V.T. Chow, Vol. 4, Academic Press, New-york, 1967, 197-280.
- [27] RAJARATNAM, N. , SUBRAMANYA, K. , « profile of the hydraulic jump », Proc. ASCE, j. hydr..div. , Vol. 94, 1968, 663-673; Vol. 95, 1969, 546-557; 725-727; Vol. 96, 1970, 579-581.
- [28] RAJARATNAM, N. , « hydrulic jump on rough deds », Trans. Eng. Inst. Of Cannada, Vol. 11, 1968, A-2/I-VII.
- [29] RAND, W. , « an approach to generalized design of stilling basins », Trans. New-york Academy of sciences, Vol. 20, 1957, 2, 173-191
- [30] RAND, W. , « flow over a vertical sill in open channel », Proc. ASCE, j. Hydr. Ressearch, Vol. 91, 1965, 97-122.
- [31] RESCH, F.J. , LEUTHEUSSER, H.J. , « mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique », La houille blanche, Vol. 26, 1971,17-31.
- [32] RESCH, F.J. , LEUTHEUSSER, H.J. , « mesures de tensions de Reynolds dans le ressaut », j. hydr.. Ressearch. , Vol. 10, 1972, 409-428.
- [33] SAFRANEZ, K. , « wechsels prung und die energie vernichtung des wassers », Der Bauingenieur, Heft 49, 1927, 898-905.
- [34] SAFRANEZ, K. , « untersuchungen über den wechsels prung », Der Bauingenieur, Heft. 37, 1929, 649-651; Heft.38, 1929, 668-678.
- [35] SAFRANEZ, K. , « l'änge des wassers prunges », Wasser kraft und wasserwirtschaft, Heft.,24, 1933, 277-282.
- [36] SILVESTER, R. , « hydraulic jump in all shapes of horizontal channels », Proc. ASCE, j. hydr. div., Vol. 90, 1964, 23-25;339-358; 177-186; 265-268.
- [37] SMITH, C.D. , « the submerged hydraulic jump in an abrupt lateral expansion », j. hydr. Ressearch, Vol. 27, 1989, 257-391..
- [38] WANOSCHEK, R. , HAGER, W.H. , « hydraulic jump in trapezoidal channel », j. hydr. Ressearch, Vol. 27, 1989, 429-446.
- [39] CHOW V. « Open - channel hydraulics », Ed. Mc Graw-Hill, 1973.
- [40] RAJARATNAM, N. « The hydraulic jump as a wall jet », Proc. ASCE, j. Hydr. Div. 91 (Hy5): 107-132, 1965.
- [41] SMITH, J. , « ressaut hydraulique dans une conduite rectangulaire à forte pente » j. Hydr. Ressearch, Vol.3, 1989.

Notations

A(x)	aire de la section mouillée en fonction de la coordonnée longitudinale x.	[m ²]
B	rapport des largeurs du bassin, $B = b_2 / b_1$	[-]
b	base de la section transversale.	[m]
D	diamètre de la section circulaire.	[m]
F ₁	nombre de Froude à l'amont.	[-]
g	accélération gravitationnelle.	[m/s ²]
H	charge totale.	[m]
h	hauteur d'eau	[m]
h ₁	hauteur conjuguée initiale.	[m]
h ₂	hauteur conjuguée finale.	[m]
h _b	hauteur maximale du rouleau du fond.	[m]
j	paramètre de correction de la turbulence.	[-]
K	facteur de position du seuil.	[-]
L _j	longueur du ressaut.	[m]
L _r	longueur du rouleau.	[m]
L _s	distance entre le seuil et le pied du ressaut.	[m]
L _b	longueur du rouleau du fond.	[m]
L _v	distance entre le début du rouleau de fond et le pied du ressaut.	[m]
m	cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du canal.	[-]
m	coordonnée longitudinale adimensionnelle.	[-]
M	hauteur relative initiale du ressaut, $M = mh_1/b$.	[-]
n	coordonnée verticale adimensionnelle.	[-]
Q	débit d'écoulement.	[m ³ /s]
q	débit unitaire.	[m ² /s]
R	nombre de Reynolds.	[-]
R ₁ *	nombre de Reynolds modifié amont.	[-]
R _b	rayon hydraulique.	[m]
S	hauteur relative du seuil, $S = s/h_1$.	[-]
s	hauteur du seuil.	[m]
\bar{S}	force de frottement adimensionnelle du fond.	[-]
S _f	gradient de perte de charge.	[-]
U _m	vitesse positive.	[m/s]
U _s	vitesse négative.	[m/s]
V	vitesse moyenne d'écoulement.	[m/s]
v ₁	vitesse moyenne à l'amont.	[m/s]
v ₂	vitesse moyenne à l'aval.	[m/s]
V	volume du ressaut.	[m ³]
ω	rapport d'aspect, $\omega = b/h_1$.	[-]
W	force de frottement intégrée.	[N]
W _x	force de frottement le long du volume de contrôle.	[N]
X	coordonnée longitudinale adimensionnelle, $X = x / L_j$.	[-]
x	coordonnée longitudinale.	[m]
Y	rapport des hauteurs conjuguées, $Y = h_2 / h_1$.	[-]
y	coordonnée verticale adimensionnelle, $y = [h(x)-h_1] / (h_2 - h_1)$.	[-]
Y*	rapport des hauteurs conjuguées pour un ressaut classique.	[-]
z	coordonnée verticale.	[m]
α	coefficient de correction des vitesses.	[-]
β ₁	coefficient de correction amont.	[-]
β ₂	coefficient de correction aval.	[-]
ξ	coefficient de correction.	[-]
η	dissipation relative d'énergie.	[-]
θ	angle du fond du canal.	[degré]
λ	longueur relative.	[-]

Notations

λ_r	longueur relative du rouleau.	[-]
λ_j	longueur relative du ressaut	[-]
λ_u	distance relative entre le pied du ressaut et le début du rouleau, $\lambda_u = L_r/h_2$.	[-]
λ_b	longueur relative du rouleau du fond, $\lambda_b = L_r/h_2$.	[-]
Λ_B	longueur relative du bassin de dissipation, $\Lambda_B = L_B/L_r$.	[-]
Λ	nombre de Reynolds transformé.	[-]
μ	rapport Y / Y^* .	[-]
ν	viscosité cinématique.	[m ² /s]
ρ	masse volumique.	[Kg/m ³]
Σ	hauteur relative, $\Sigma = (S - 1) / (Y - 1)$	[-]
σ_0	gradient de la courbe $\Sigma(X)$ pour $X = 0$.	[-]
ϕ	variation de la longueur relative du bassin de dissipation.	[-]
ψ	rapport des hauteurs conjuguées, $\psi = Y = h_2/h_1$.	[-]