

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université d'el oued

Faculté des sciences et technologiques

Filière d'hydraulique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de licence en hydraulique

Option : hydraulique urbaine

**THEME : CONTRIBUTION A L ETUDE DU RESSAUT
HYDRAULIQUE CANAL TROPEZOÏDAL A PENTE
HORIZONTALE**

Encadré par :

- Mr Riguet Ferhat

présenté par :

- kermadi Ali

-Hamda Sad eddine

Promotion : juin2014

REMERCIEMENTS

*Nous remercions le Seigneur de nous avoir aidé à accomplir ce travail
après un long parcours, sans oublier bien entendu notre enseignant :
Mr Riquet Ferhat qui avait donné de son mieux pour arriver à cette
phase décisive.*

*Egalement, nous remercions tout le staff enseignant à qui nous
exprimons notre gratitude pour les efforts déployés pendant les études,
le milieu estudiantin qui aussi n'a pas hésité de nous donner un coup de
pouce et finalement nos chers parents qui n'ont pas manqué un jour de
nous prodiguer les soins nécessaires et de nous encourager matériellement
et moralement pour parvenir à ce stade.*

Que Dieu les protège et prolonge leurs vies.

Ali kermadi & sad eddin

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : REVUE DE LA LITTERATURE	
I.INTRODUCTION.....	4
I.1.CANAL RECTANGULAIRE.....	5
I.1.1.Ressaut hydraulique dans un canal horizontal.....	5
I.1.1.1. Forme du ressaut classique.....	5
I.1.1.2. Rapport des hauteurs conjuguées du réseau.....	6
I.1.1.3. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	7
I.1.1.3.1. Longueur du rouleau.....	7
I.1.1.3.2. Longueur du ressaut	8
I.1.1.3.3 Rendement du ressaut.....	9
I.2.CANAL TRIANGULAIRE.....	11
I.2.1.Approche de hager et wanoschek.....	11
I.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées	12
I.2.1.2. Equation de quantité de mouvement	14
I.2.1.3. Longueur caractéristique du réseau.....	16
I.2.1.4.Profil de surface généralisé du réseau	18
I.3 ETUDE DEACHOUR ET DEBABECHE (2003)	19
I.3.1 Rapport des hauteurs conjuguées du réseau.....	19
I.3.2 HAUTEUR RELATIVE DU SEUIL EN FONCTION DU NOMBRE DE FROUDE.....	21
I.3.3 RELATION GENERALE REGISSANT LE CONTROLE DU RESUAU	23
I.3.4. Approche de Debabeche et Achour (2007).....	23
I.4 RAPPORT DES HAUTEUR CONJUGUEES DU RESSAUT.....	23
I.4.1 Hauteur relative du seuil.....	25
I.4.2 Longueur relative du bassin.....	26
I.5 CONCLUSION.....	27

Chapitre II : ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE

EN CANAL TRAPEZOÏDAL A PENTE HORIZONTALE

II.1 INTRODUCTION.....	30
II.2. ANALYSE THEORIQUE.....	30
II.2.1. Equation de la quantité de mouvement.....	30
II.2.2. Evaluation du volume du ressaut	33
II.2.3. Nombre de Froude.....	33
II.3. ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'EQUATION SEMI THE ORIQUE.....	35
II.3.1. Estimation du coefficient k de correction.....	35
II.3.2. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle α d'inclinaison du canal.....	39
II.4. CONCLUSION.....	44
CONCLUSION GENERALE.....	46
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	49

LISTE DES FIGURS 1

N°	Nom de la figure	Pag
1.1	Forme du ressaut classique selon la classification de BRADLEY et PETERKA (1957). a) pré-ressaut, b) ressaut de transition, c) ressaut stable, d) ressaut agité.	6
1.2	Ressaut hydraulique classique.	6
1.3	Aspect du ressaut classique. a) rouleau développé. b) rouleau non développé.	8
1.4	:(---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique	9
1.5	Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude. (—) Courbe tracée selon la relation (1.21). (---) Courbe tracée selon la relation (1.22).	11
1.6	ressaut en canal semi-triangular selon HAGER et WANOSCHEK (1987) . (a) vue en plan, (b) coupe transversale	11
1.7	Variation du nombre de Froude IF_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et de la hauteur relative M . $M=0$: Profil rectangulaire $M \rightarrow \infty$: Profil triangulaire $0 < M < \infty$: Profils trapézoïdaux.	13
1.8	Variation des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut triangulaire ($m=1$) en fonction du nombre de Froude IF_1 , selon HAGER et WANOSCWEK (1987). (—) courbe tracée selon la relation (2.4). $\Delta=0$. (---) courbe tracée selon la relation (2.14). $\Delta>0$.	16
1.9	Longueur relative L_r/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de nombre de Froude IF_1 , selon HAGER et WANOSCHEK (1987) ($m=1$). (Δ) : $m=0,58$ selon Rajaratnam (1964).	17
1.10	Longueur relative L_j/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude IF_1 , selon HAGER et WANOSCHEK (1987) ($m=1$). (∇): $m=0,44$ selon ARGYROPOULOS (1962).	18
1.11	Profil de surface généralisé $y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ($m=1$), selon Hager et	18

	Wanoschek (1987) .	
1.12	Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.	19
1.13	Variation du rapport $Y_S = f(F_1)$ dans un canal triangulaire. (---) Ressaut classique. (o) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.	20
1.14	Variation expérimentale de $Y_S = f(S)$ lors du contrôle d'un ressaut triangulaire. (Δ) Points expérimentaux. (---) Courbe tracée selon la relation : $Y_S = 1 + 0,96.S$.	20
1.15	Variation expérimentale de la hauteur relative S du seuil, en fonction du nombre de Froude F_1 . (o) Points expérimentaux	21
1.16	Variation de $(S+F_1^{0,4})$ en fonction de la position relative x/h_1 du seuil (Δ) Points expérimentaux (—) courbe d'ajustement	22
1.17	a) Ressaut contrôlé. b) Ressaut forcé de type B_{min} . h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x position du seuil par rapport au pied du ressaut, L_j longueur du ressaut, L_{RF} longueur du rouleau de fond, L_B distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval, L Distance entre le pied du ressaut et la position où h_2 devient constante. $\square x$ distance séparant le convergent du pied du ressaut, C convergent, R réservoir	23
1.18	Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m=1$: (o) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (●) ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) ressaut forcé par seuil à paroi mince. (---) Courbe tracée selon la relation (1).	24
1.19	variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative S du seuil. Points expérimentaux pour $m = 1$: (o) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (●) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) ressaut forcé par seuil à paroi mince	25
1.20	Variation expérimentale de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude IF_1 , pour un ressaut évoluant dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m=1$: (o) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (●) ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) ressaut forcé par seuil à paroi mince.	26
1.21	Variation expérimentale de la longueur relative X du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 , pour un ressaut évoluant dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m = 1$: (o) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (●) ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) ressaut forcé par seuil à paroi mince.	27

LISTE DES FIGURS 2

N°	Nom de la figure	Pag
2.1	<i>Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal incliné à pente positive</i>	30
2.2	<i>a) Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut. b) Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut.</i>	32
2.3	<i>Variation du nombre de Froude F_{1uni} selon la relation universelle en fonction du nombre de Froude théorique F_{1th} calculée selon la relation (2.21). (—) Première bissectrice.</i>	37
2.4	<i>Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,00$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.</i>	39
2.5	<i>: Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,005$. (o) points expérimentaux; (—) Courbes d'ajustement.</i>	39
2.6	<i>Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,01$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.</i>	40
2.7	<i>Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,015$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.</i>	40
2.8	<i>Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,02$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.</i>	40
2.9	<i>Variation des paramètres 'a' en fonction de $\tan(\alpha)$.</i>	42
2.10	<i>: Variation du rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction Du rapport des hauteurs conjuguées théorique Y_{th} calculée selon la relation (2.23). (—) Première bissectrice.</i>	43
2.11	<i>: Variation expérimentale de $Y(F_1)$ pour différentes valeurs de $\tan(\alpha)$. (—) courbe tracé selon la relation (4.23).</i>	43

LISTE DES TABLEAUX

N°	Nom de la tableaux	Pag
1.1	valeurs des constantes a et b de l'équation (1.49) pour les trois types de ressaut	31
2.1	<i>Valeurs du coefficient k selon la relation 2.20</i>	36
22	<i>Ecarts relatifs en (%) entre F_{1uni} universelle et F_{1th} théorique</i>	38
2.3	<i>Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1</i>	41
2.4	<i>Valeurs des paramètres 'a'</i>	42
25	<i>Ecarts relatifs entre Y_{th} déterminés par la relation théorique (2.21) et Y_{ap} calculés par la relation approchée (2.23)</i>	44

PRINCIPALES NOTATIONS

A_1	L'aire de la section mouillée initiale	$[m^2]$
A_2	L'aire de la section mouillée finale	$[m^2]$
$A(x)$	L'aire de la section mouillée correspondant à x	$[m^2]$
b	Base du canal trapézoïdal	$[m]$
F_1, IF_1	Nombre de Froude incident	$[-]$
P_1	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'amont du ressaut	$[N]$
P_2	Force de pression s'exerçant sur la section mouillée à l'aval du ressaut	$[N]$
g	Accélération de la pesanteur	$[m.s^{-2}]$
h_1	Hauteur initiale du ressaut	$[m]$
h_2	Hauteur finale du ressaut	$[m]$
h_2^*	Hauteur finale du ressaut classique rectangulaire	$[m]$
$h(x)$	Profondeur de l'eau à la distance x du pied du ressaut	$[m]$
$\bar{h}, h_c$	Profondeur du centre de gravité de la section mouillée par rapport à la surface libre de l'écoulement	$[m]$
h_b	hauteur maximal du rouleau de fond	$[m]$
k	coefficient de correction du volume du ressaut	$[-]$
L_r	Longueur du rouleau	$[m]$
L_j	Longueur du ressaut	$[m]$
L_r^*	Longueur du rouleau classique rectangulaire	$[m]$
L_j^*	Longueur du ressaut classique rectangulaire	$[m]$
L_u	la distance du pied du ressaut au début du rouleau de fond	$[m]$
L_b	longueur du rouleau de fond	$[m]$
m	cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale	$[-]$
M	coefficient de forme	$[-]$
Q	Débit volume	$[m^3.s^{-1}]$
Re	Nombre de Reynolds	$[-]$
R_h	Rayon hydraulique correspondant au profil triangulaire	$[-]$
s	Hauteur du seuil	$[m]$
S	Hauteur relative du seuil	$[-]$
S_f	Gradient de perte de charge	$[-]$
W_x	Force de frottement agissant sur le volume de liquide	$[N]$
V	Volume d'eau inscrit entre les deux sections initiale et finale	$[m^3]$
v_1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	$[m.s^{-1}]$
v_2	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	$[m.s^{-1}]$
x	Position de seuil	$[m]$
X	Position relative de seuil	$[-]$

Y^*	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
Y_s	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil	[-]
ν	Viscosité cinématique	$[m^2.s^{-1}]$
λ_j	longueur relative du ressaut	[-]
λ_r	longueur relative du rouleau	[-]
λ_b	longueur relative du rouleau de fond	[-]
λ_u	longueur relative du distance d'approche	[-]
$\overline{\omega}$	Poids spécifique du liquide	$[N.m^{-3}]$
ρ	Masse volumique du liquide	$[kg.m^{-3}]$
η	Rendement du ressaut	[-]
α	Angle d'inclinaison du fond du canal par rapport à l'horizontal	[rd]
θ	Angle d'inclinaison des parois du canal par rapport à l'horizontal	[rd]

INTRODUCTION GENERALE

Les ouvrages de stockage, tel qu'un barrage hydraulique, peuvent avoir, dans leur partie aval, un écoulement torrentiel à forte énergie cinétique, celle-ci engendre des forces tractrices nuisibles par leur effet érosif. Afin d'éviter cela, il est préférable de provoquer un ressaut hydraulique, et dissiper par la suite cette énergie.

Le ressaut hydraulique est obtenu à la suite de la transition de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial, par la surélévation du plan d'eau à l'aval. Celui-ci s'accompagne d'une dissipation d'énergie. En effet, une partie de l'énergie cinétique est convertie en énergie potentielle. Si l'exhaussement de la ligne d'eau est suffisamment important, on observe un ou plusieurs rouleaux plus ou moins instables avec déferlement et turbulence importante qui entraînent une dissipation d'énergie non négligeable (Achour, 1982 ; Hager, 1992 et Debabeche, 2003).

La modification des conditions à l'amont (débit, hauteurs, ...etc.) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur, la pente du canal,...etc.) peut conduire à différentes configurations du ressaut. Le ressaut est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente nulle ou faible, sans obstacle à l'aval (Hager, Bremen et Kawagoshi ; 1990). Il est dit contrôlé lorsque sa formation est conditionnée par la mise en place d'un obstacle (Hager et Bretz, 1988). Il est dit forcé lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle (Rand, 1957 ; Bretz, 1988).

Les recherches expérimentales ont d'abord confirmé que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. C'est en d'autres termes la seconde loi de Newton qui est appliquée, qui montre 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 (Achour, 1997; Debabeche, 2003). L'application de la quantité de mouvement a eu pour but d'évaluer le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 incident caractérisant l'écoulement à l'amont. La relation la plus simple est celle obtenue par Bélanger pour le cas du ressaut classique en canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible et dont la validité a été vérifiée par plusieurs auteurs.

La longueur minimale du bassin amortisseur correspond en règle générale à la longueur L_j du ressaut défini comme étant la longueur au-delà de laquelle aucune protection du bassin n'est nécessaire. Jusqu'à ce jour aucun développement théorique n'a pu mener à l'établissement d'une relation analytique permettant d'évaluer la longueur L_j ; seuls les essais

au laboratoire ont permis de la quantifier. C'est ainsi que Bradley et Peterka (1957) ont élaboré une courbe moyenne expérimentale, représentant la variation de la longueur relative L_j^*/h_2^* en fonction du nombre de Froude F_1 à l'amont du ressaut. Les auteurs concluent que pour la gamme pratique des nombres de Froude tels que $4 < F_1 < 12$, la longueur relative L_j^*/h_2^* prend la valeur moyenne de 6 ; ce résultat est encore admis de nos jours.

Une autre caractéristique géométrique du ressaut est la longueur L_r^* sur laquelle s'étend son rouleau de surface. Comme pour la longueur L_j^* , L_r^* n'a pu être évaluée que par la voie expérimentale. Plusieurs auteurs ont quantifié cette longueur (Bradley et Peterka, 1957 ; Safranez, 1929 ; Bakhmeteff, 1936 ; Moore, 1943), mais nous citerons surtout les travaux relativement récents de Hager (1990) qui montrent que la longueur relative L_r^*/h_1 dépend à la fois du nombre de Froude F_1 et du rapport d'aspect $w=h_1/b$; h_1 et b sont respectivement la hauteur initiale du ressaut et la largeur du canal rectangulaire.

Récemment plusieurs chercheurs ont abordé la question du ressaut hydraulique d'un point de vue théorique et appliqué, les plus importants et les plus récents d'entre eux sont certainement Hager et Sinniger (1990), Hager et Bretz (1987) et Rajaratnam (2002) qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal, Hager et Wanoschek (1987), Achour et Debabeche (2003) et Debabeche et Achour (2007) dont les travaux sont relatifs au ressaut triangulaire horizontal. Par ailleurs, (Rajaratnam, 1966; Mc Corcodal, 1994; Pagliara. S. et Peruginelli, 2000 ; Beiram et Chamani, 2006...) ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. La première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné fut celle de Bakhmeteff et Matzké (1938), qui ont évoqué dans leur étude, le profil de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. Kindsvater (1944) classifiât les ressauts à pente positive en quatre principaux types : le type A, type B, type C et type D. Les études récentes concernant le ressaut dans les canaux inclinés ont été dirigées par Hager (1988) et Ohtsu et Yasuda (1991) mais toujours dans un canal rectangulaire. Debabeche et al (2009) ont étudié théoriquement le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° incliné d'une pente positive. En 2010, Cherhabil a abordé dans sa thèse de doctorat le ressaut hydraulique dans deux profils de canaux inclinés : le canal triangulaire et le canal profilé en "U". Cette dernière étude a approché le sujet d'un point de vue théorique et expérimental. Par ailleurs, pour ce qui concerne le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, la première étude devrait être attribuée à Posey et Hsing (1938). Par la suite Sandoover et Holmes (1962) ont étudié le ressaut hydraulique dans des canaux trapézoïdaux

pour des inclinaisons de parois latérales de 30° , 45° , 60° . Hager et Wanoschek ont étudié en 1989 le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique à angle d'ouverture de 45° .

Ce présent mémoire a pour objectif d'étudier, d'un point de vue théorique, le ressaut hydraulique, dans un canal trapézoïdal symétrique, incliné d'une pente positive. Des relations fonctionnelles, en terme adimensionnel, liant les différentes caractéristiques du ressaut, faisant apparaître l'influence de la pente du fond du canal sur les caractéristiques du ressaut, seront proposées.

Notre mémoire est scindé en deux grands chapitres :

✓ Le premier chapitre concernera une étude bibliographique à travers laquelle nous passerons en revue les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique, en canal de section droite rectangulaire et triangulaire, à fond horizontal et incliné.

✓ Une deuxième partie concernera notre propre contribution dans l'étude du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique incliné d'une pente positive, d'un point de vue théorique et expérimentale. Une analyse expérimentale des équations théoriques sera également élaborée, afin de leur trouver une meilleure représentation.

Chapitre I:

REVUE DE LA LITTERATURE

I. INTRODUCTION :

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

Les caractéristiques du ressaut sont essentiellement :

Les longueurs L_r^* et L_j^* qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut.

Les hauteurs initiales h_1 et finale h_2^* , appelées également hauteurs conjuguées.

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

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un nombre de Froude $F_1 > 1$ étroitement lié au débit volume, à la hauteur initiale h_1 ainsi qu'à la forme géométrique du canal.

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

Le ressaut hydraulique dénoyé est le moyen le moins onéreux et le plus pratique pour dissiper l'énergie emmagasinée dans un ouvrage amont, afin d'éviter d'importantes modifications du lit de la rivière situé à l'aval. Il est utilisé également pour la surélévation du plan d'eau à l'aval afin de permettre l'amorçage d'un siphon dans un canal d'irrigation. Ces dernières années le ressaut hydraulique a fait l'objet de plusieurs recherches fondamentales et appliquées. La bibliographie montre que la modification des conditions à l'amont (débit, hauteurs, ...etc) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, sa hauteur, la pente du canal, la rugosité du fond, ...etc) peut conduire à différentes configurations du ressaut. En effet, plusieurs auteurs ont abordé la question du ressaut hydraulique dans différents profils géométriques. Nous pouvons citer, entre autres, Hager et Sinniger (1990), Hager et Bretz (1987), Rajaratnam (1964, 1965, 1967 et 2002), Rajaratnam et Murahari (1971), Rajaratnam, N., Subramania, K., (1967) et Rans (1957 et 1965) qui ont étudié le ressaut hydraulique dans

un canal rectangulaire horizontal. En outre, Hager et Wanoschek (1987), Achour et Debabeche (2003) et Debabeche et Achour (2007) ont étudié le ressaut hydraulique triangulaire horizontal.

I.1.CANAL RECTANGULAIRE :

I.1.1.Ressaut hydraulique dans un canal horizontal

I.1.1.1. Forme du ressaut classique

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

Ces dernières sont décrites par plusieurs auteurs dont ANDERSON (1987) et ne répond pas aux exigences d'un bassin de dissipation d'énergie; les ressauts correspondants sont dits ondulés présentant tantôt une surface libre régulièrement perturbée et lisse ($1 < F_1 < 1,4$), tantôt une surface libre irrégulièrement ondulée ($1,4 < F_1 < 1,7$).

Selon la classification de BRADLEY et PETERKA (1957) on distingue:

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

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

2. LE RESSAUT DE TRANSITION obtenu pour la gamme $2,5 < F_1 < 4,5$ (figure 1,b). Ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

3. LE RESSAUT STABLE obtenu pour la gamme $4,5 < F_1 < 9$ (figure 1,c). C'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans les bassin de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

4. LE RESSAUT AGITE OU CLAPOTEUX obtenu pour $F_1 > 9$ (figure 1,d). Le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très élevée. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.

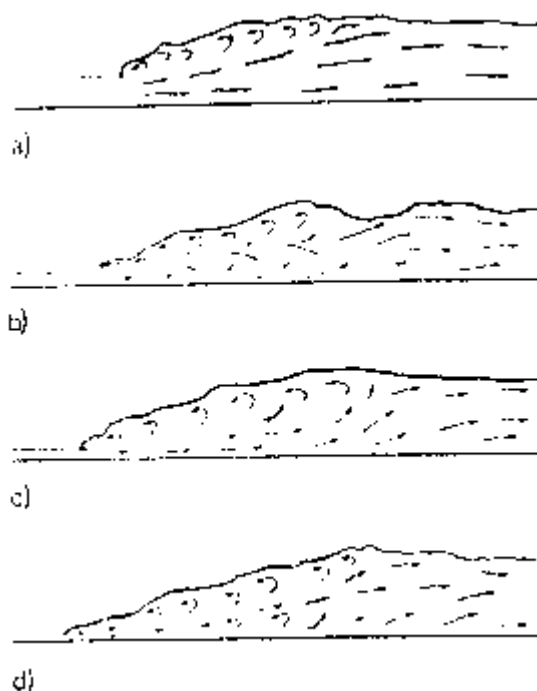


Figure 1.1 : Forme du ressaut classique selon la classification de BRADLEY et PETERKA (1957). a) pré-ressaut, b) ressaut de transition, c) ressaut stable, d) ressaut agité.

I.1.1.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure 1.2 montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiales et finales 1 et 2.

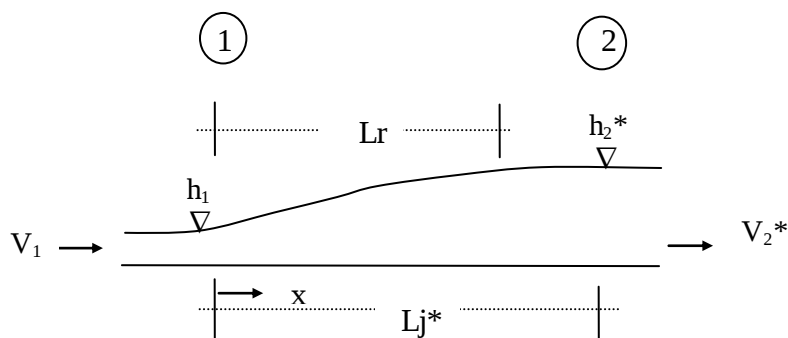


Figure 1.2: Ressaut hydraulique classique

L'écoulement à l'amont du ressaut (à l'origine) est caractérisé par une profondeur h_1 et une vitesse moyenne v_1 . L'équation de continuité permet d'écrire :

$$v_1 = Q/A_1 \quad (1.1)$$

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

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

b est la largeur du canal rectangulaire.

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

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

Sachant que $\rho.Q.v$ représente la quantité de mouvement, l'application de la loi de Newton mène à écrire:

$$\varpi.b.h_1^2/2 + \rho.Q.v_1 = \varpi.b.h_2^{*2}/2 + \rho.Q.v_2^* \quad (1.3)$$

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

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

$$F_1^2 = Q^2 / (g.b^2.h_1^3) \quad (1.4)$$

La relation (1.3) conduit à écrire:

$$Y^* = h_2^*/h_1 = 0,5 [\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1] \quad (1.5)$$

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

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

I.1.1.3. Longueurs caractéristiques du ressaut

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

I.1.1.3.1. Longueur du rouleau

En 1990 HAGER et al (1990) définissent en fait deux longueurs de rouleau suivant le

type de ressaut étudié et introduisant ainsi la notion de longueur de rouleau développé et nom développé. La figure 1.3 montre ces deux type de ressaut et les longueurs L_r^* qui leur correspondent.

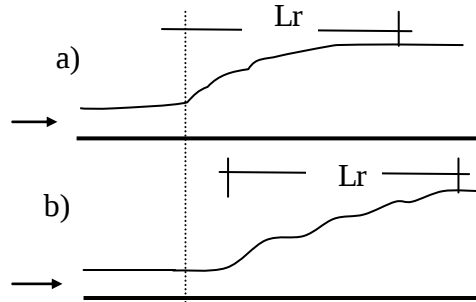


Figure 1.3 : Aspect du ressaut classique.
a) rouleau développé. b) rouleau non développé.

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

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

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

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

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

« Tgh » désigne la tangente hyperbolique.

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

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

I.1.1.3.2. Longueur du ressaut

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

1 la surface libre est pratiquement horizontale.

2 la surface de turbulence du rouleau est faible.

3 les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.

4 l'écoulement graduellement varié apparaît à l'extrémité aval du rouleau.

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

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

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

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

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

I.1.1.3.3 Rendement du ressaut

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

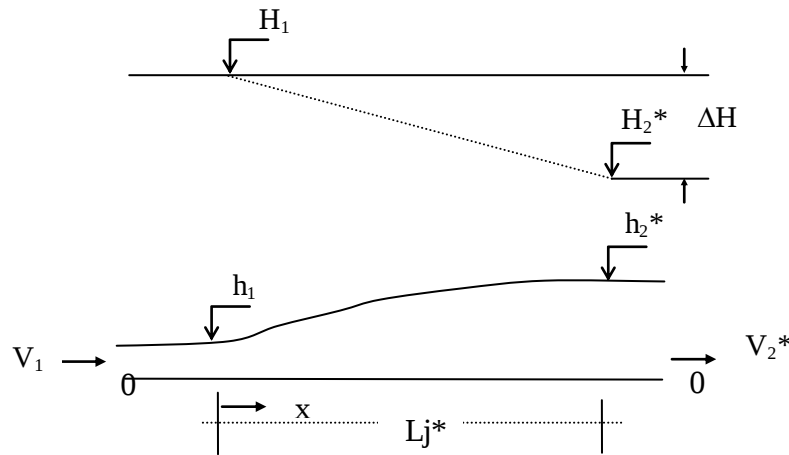


Figure 1.4. : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

En se référant au plan 0-0, la charge totale dans la section initiale du ressaut s'écrit :

$$H_1 = h_1 + \alpha_1 \cdot v_1^2 / (2 \cdot g) \quad (1.12)$$

Tandis que la charge totale dans la section finale est :

$$H_2^* = h_2^* + \alpha_2 \cdot v_2^{*2} / (2 \cdot g) \quad (1.13)$$

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

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

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

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

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2^* \cdot A_2^* \quad (1.15)$$

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

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

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

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

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

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

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

On exprime souvent la capacité de dissipation du ressaut par le rapport $\eta^* = \Delta H^* / H_1$, qui représente en fait son rendement. En tenant compte de la relation (1.4), les charges totales initiale et finale du ressaut peuvent s'écrire respectivement :

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

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

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

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

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

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

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

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

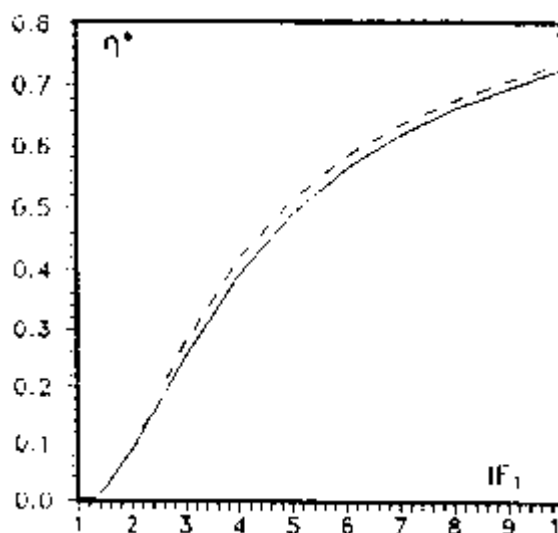


Figure 1.5 : Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude. (—) Courbe tracée selon la relation (1.21). (---) Courbe tracée selon la relation (1.22).

La figure (1.5) montre d'une part que le rendement η^* du ressaut classique est supérieur à 50% pour $F1 \geq 5,1$ et que les rendements calculés en application de la relation approchée (1.21) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.22) d'autre part ; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

I.2.CANAL TRIANGULAIRE

I.2.1.Approche de Hager et Wanoschek

Les essais entrepris par HAGER et WANOSCEK (1987) sur le ressaut "triangulaire" ont été réalisés dans un canal rectangulaire de largeur $b=30\text{cm}$ dans lequel a été insérée une paroi en PVC inclinée d'un angle de 45° par rapport à l'horizontale. Le profil obtenu est alors de forme semi-triangulaire comme l'indique la figure 1.6b.

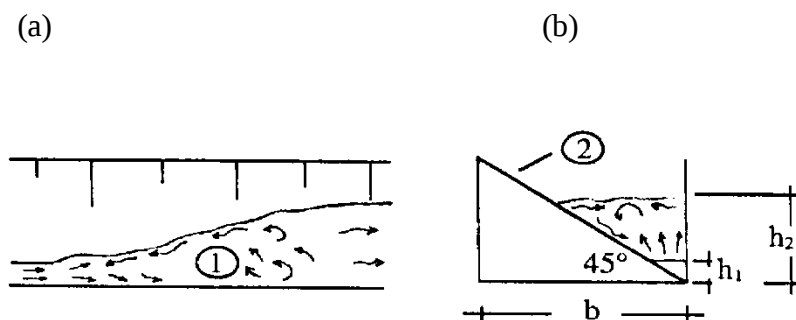


Figure 1.6 : ressaut en canal semi-triangulaire selon HAGER et WANOSCHEK (1987) . (a) vue en plan, (b) coupe transversale.

1. vue en plan du ressaut. 2. paroi en PVC inclinée de 45° .

$H1$ et $h2$: hauteurs conjuguées du ressaut.

La paroi verticale du canal est en verre, ce qui permet la visualisation de l'écoulement. L'angle d'ouverture du canal triangulaire est d'environ 45° ($44,7^\circ$), ce qui correspond à un angle de 90° pour le canal triangulaire symétrique.

Les débits volumes Q ont été variés entre 4 et 20 l/s suivant des pas de $\Delta Q = 2$ l/s. Les essais ont été effectués sous des vitesses de l'écoulement incident variant entre 1,7 et 8,6 m/s et des profondeurs initiales h_1 entre 70 et 76 cm correspondant à des nombres de Froude $2 \leq F_1 \leq 14$ approximativement. En raison du caractère fortement torrentiel de l'écoulement incident, la mesure limnimétrique des profondeurs h_1 a été très délicate.

Les mesures limnimétriques des profondeurs de l'écoulement à l'aval du ressaut ont été mesurées avec une incertitude de plus ou moins 2 à 3 cm, en raison de violentes perturbations de la surface libre observées notamment à des nombres de Froude $F_1 > 10$.

Les vitesses axiales ont été mesurées au moyen d'un tube de Pitot à environ 3 cm de la paroi verticale du canal.

I.2.1.1. 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, entre les sections initiale et finale d'un ressaut évoluent dans un canal horizontal de section droite trapézoïdale, mène à écrire ;

$$\frac{b \cdot h_1^2}{2} + \frac{m \cdot h_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2)} = \frac{b \cdot h_2^2}{2} + \frac{m \cdot h_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b \cdot h_2 + m \cdot h_2^2)} \quad (1.23)$$

h_1 et h_2 sont respectivement les hauteurs initiale et finale du ressaut, b est la base du canal trapézoïdal, Q désigne le débit volume, m représente la cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale et g est l'accélération de la pesanteur.

L'équation (1.23) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (1.24)$$

dans laquelle F_1 représente le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut, Y est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut et M désigne la hauteur relative initiale du ressaut :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b + 2mh_1)}{g(bh_1 + mh_1^2)^3}, Y = \frac{h_2}{h_1}, M = \frac{mh_1}{b} \quad (1.25)$$

La relation (1.25) exprime ainsi, dans le cas d'un canal trapézoïdal, la variation du nombre de Froude à l'amont du ressaut en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées et de la hauteur relative M . Les équations régissant les ressauts en canal de section rectangulaire constants et en canal triangulaire peuvent être déduites de la relation (1.25). Le canal de section droite rectangulaire constante est un particulier du canal trapézoïdal pour lequel l'angle d'inclinaison du talus par rapport à l'horizontal est de 90° ; ceci correspond donc à $m=\cotg 90^\circ=0$, ou bien à $M=0$. Par contre, le profil triangulaire correspond à un profil trapézoïdal de base $b=0$, soit $M \rightarrow \infty$.

Lorsque M est égale à zéro, l'équation (1.25) mène à la relation de Bélanger exprimée par la relation (1.5).

Sur la figure 1.7, est représentée graphiquement, dans un système d'axes de coordonnées cartésiennes, la relation (1.25).

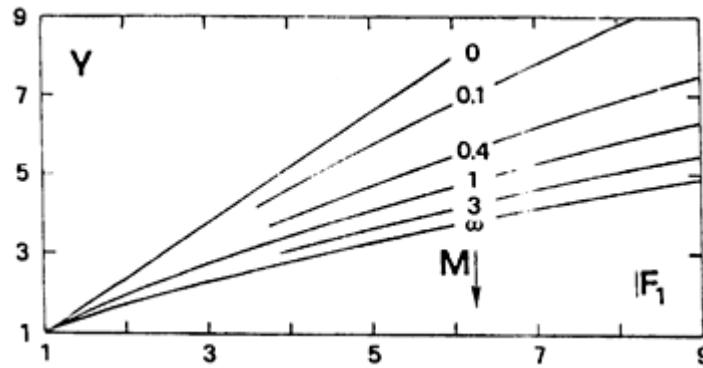


Figure 1.7 : Variation du nombre de Froude IF_1 en fonction du rapport Y des hauteurs du ressaut et de la hauteur relative M .

$M=0$: Profil rectangulaire

$M \rightarrow \infty$: Profil triangulaire

$0 < M < \infty$: Profils trapézoïdaux.

La figure 1.7 montre clairement que la plus faible valeur du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut est obtenue dans le cas du profil triangulaire, pour une même valeur du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

L'équation de la courbe enveloppe inférieure de la figure 1.9, traduisant la variation du rapport Y du ressaut "triangulaire" en fonction du nombre de Froude F_1 est :

$$IF_{1T}^2 = \frac{2Y_T^2(Y_T^2 + Y_T + 1)}{3(Y_T + 1)} \quad (1.26)$$

L'indice "T" indique le profil triangulaire

L'équation (1.26) montre que Y_T s'exprime de manière fortement implicite en fonction de F_{1T} ; HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent alors la relation approchée :

$$Y_T = \left(\frac{3}{2} I F_T^2 - 1 \right)^{1/3} \quad (1.27)$$

La relation approchée (1.27) montre ainsi que $Y_T \sim F_{1T}^{2/3}$

I.2.1.2. Equation de quantité de mouvement

Les essais effectués par HAGER et WANOSCHEK (1987) dans un canal semi-triangulaire d'angle d'ouverture de 45° , extrapolés ensuite au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° , ont montré que les rapports Y expérimentaux sont légèrement inférieurs aux rapports Y théoriques obtenus par l'application de la relation (1.31); cet écart est attribué à l'effet des frottements sur les parois du canal et les auteurs proposent alors de modifier l'équation de la quantité de mouvement en tenant compte des pertes de charges le long des parois du canal. Le gradient de perte de charge S_f est évalué par la formule de Blasius :

$$S_f = \frac{0,3164}{IR^{0,35}} \frac{V_2}{8.g.R_h} \quad (1.28)$$

avec $R = 4R_h$ le nombre de Reynolds, $R_h = mh/[2(1+(1+m^2)^{1/2})]$ le rayon hydraulique correspondant au profil semi-triangulaire et ν la viscosité cinématique.

Le profil de surface du ressaut qui suit approximativement la loi $h(x) = h_1 + (h_2 - h_1)X^2$ dans laquelle x représente la coordonnée longitudinale comptée à partir du début du ressaut et X la coordonnée x rapportée à la longueur L_j du ressaut, soit $X = x/L_j$. La coordonnée x est telle que $0 \leq x \leq L_j$ et par suite $0 \leq X \leq 1$. La force de frottement agissant sur le volume de contrôle correspondant à $0 \leq x \leq L_j$ est par définition :

$$W_x = \int_0^{L_j} A(x).S_f \quad (1.29)$$

$\varpi = \rho.g$ le poids volumique du liquide, $A(x)$ l'aire de la section mouillée correspondant à x .

Pour le cas du profil semi-triangulaire d'angle d'ouverture de 45° ($m=1$), la relation (1.29) devient

$$S_f = \left[\frac{2Q}{mh_1^2} \right]^{7/4} \cdot \frac{\nu^{1/4}}{5gh_1^{5/4}} \left[\frac{h(x)}{h_1} \right] \quad (1.30)$$

La relation (1.30) s'écrit alors :

$$W_x = (\varpi mh_1^2/2).L_j.S_{f1}. I(Y) \quad (1.31.a)$$

$$I(Y) = \int_0^1 \frac{dx}{\left[1 + (Y-1)X^2 \right]^{1/4}} \quad (1.32b)$$

$$Y = h_2/h_1 \quad (1.33)$$

$$X = x/L_j$$

$$S_f = S_{f_0} [h(x)/h_1 = 1]$$

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

$$I(Y) = \frac{1}{7} \left(1 + \frac{6}{Y}\right) \quad (1.34)$$

Pour les nombres de Froude $F_1 < 15$, correspondant à des rapports $Y < 7$, l'application de la relation approchée (1.34) occasionne une erreur relative inférieure à 5% par rapport à la valeur exacte calculée par l'équation (1.32b).

En tenant compte de la force W_x , l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre les sections initiale et finale du ressaut évoluant dans un canal de section droite semi-triangulaire s'écrit :

$$\frac{m \cdot h_1^3}{6} + \left(\frac{2Q^2}{g \cdot m \cdot h_1^2} \right) = \frac{m \cdot h_2^3}{6} + \left(\frac{2Q^2}{g \cdot m \cdot h_2^2} \right) + W_x \quad (1.35)$$

En désignant par : $F_1^2 = 2Q^2/(gmh_1^5)$, $A = [vmh_1/(2Q)]^{1/4}$, $S_{f1} = \Lambda \cdot (F_1^2/10)$, la relation (1.35) s'écrit en termes adimensionnels :

$$1 + \frac{3}{2} IF_1^2 = Y^3 + \frac{3}{2} \frac{IF_1^2}{Y^2} + \frac{3\Lambda}{70} \frac{L_j}{h_1} \left(1 + \frac{6}{Y}\right) IF_1^2 \quad (1.36)$$

La longueur relative L_j/h_1 figure dans la relation (1.36) peut s'écrire : $L_j/h_1 = Y(L_j/h_2)$ et HAGER et WANOSCHEK (1987) estime que pour un canal triangulaire correspondant à $m=1$, $L_j/h_2 \approx 6$. Par suite, la relation (1.36) s'écrit en définitive :

$$IF_1^2 = \frac{2Y^2(Y^3 - 1)}{3 \left[Y^2 - 1 - \frac{\Lambda Y^2}{6} (6 + Y) \right]} \quad (1.37)$$

Cette dernière relation traduit ainsi la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut "triangulaire" ($m=1$) en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, en tenant compte de l'effet des frottements sur les parois du canal ; Cet effet est traduit par le paramètre adimensionnel Λ . Lorsque $\Lambda \rightarrow 0$, l'effet des frottements est négligeable et la

relation (1.26) est reproduite. HAGER et WANOSCHEK (1987) notent que l'écart maximum observé entre les valeurs expérimentales des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut et celles issues de l'application de la relation (1.37) ne dépasse guère 3%.

La figure 1.8 montre les mesures expérimentales de HAGER et WANOSCHEK (1987) comparées à la fois aux valeurs théoriques obtenues par l'application de la relation (1.26) ($\Lambda \rightarrow 0$) et à celles issues de l'équation (1.37) pour $\Lambda > 0$

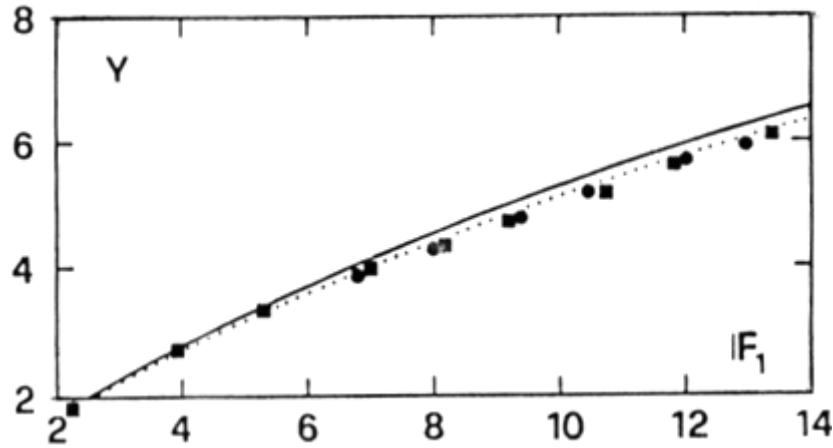


Figure 1.8 : Variation des rapports Y des hauteurs conjuguées du ressaut triangulaire ($m=1$) en fonction du nombre de Froude IF_1 , selon HAGER et WANOSCWEK (1987).

(—) courbe tracée selon la relation (2.4). $\Lambda=0$.

(---) courbe tracée selon la relation (2.14). $\Lambda>0$.

I.2.1.3. Longueur caractéristique du ressaut.

La longueur L_j du ressaut est définie comme étant la distance entre le pied du ressaut et la section à l'aval où la surface libre de l'écoulement est maximale et tend à devenir parallèle au fond du canal. Par contre, la longueur L , est la longueur sur laquelle s'étend le rouleau de surface.

Sur la figure 1.9 sont représentées les mesures expérimentales de RAJARATNAM (1964) ($m=0,58$) et celles de HAGER et WANOSCHEK (1987) ($m=1$) qui concernent la longueur relative L_r/h_2 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. Il apparaît ainsi que la longueur relative L_r/h_2 dépend exclusivement de m et de F_1 . La figure 1.9 montre également que la longueur relative L_r/h_2 croît au fur et à mesure que F_1 augmente et qu'elle décroît avec l'augmentation de m .

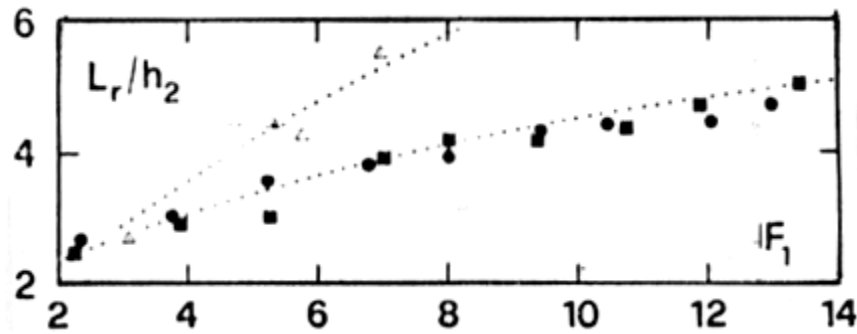


Figure 1.9 : Longueur relative L_r/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude F_1 , selon HAGER et WANOSCHEK (1987) ($m=1$).

(Δ) : $m=0,58$ selon Rajaratnam (1964).

En tenant compte des mesures de RAJARATNAM (1964) ($m=0,58$), HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent une relation générale permettant d'évaluer la longueur relative L_r/h_2 en fonction de F_1 et de m :

$$L_r/h_2 = 1,8(m)^{0,5} F_1^{0,4/m}, \quad 0,4 < m \leq 1 \quad (1.38)$$

Ainsi, dans la gamme pratique des nombres de Froude de l'écoulement incident tels que $6 \leq F_1 \leq 9$, la longueur relative L_r/h_2 du rouleau, pour le cas d'un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° ($m=1$), est telle que $3,7 \leq L_r/h_2 \leq 4,35$.

En ce qui concerne la longueur relative L_j/h_2 du ressaut "triangulaire", les mesures expérimentales de HAGER et WANOSCHEK (1987) ainsi que celle d'ARGYROPOULOS (1962) sont représentées sur la figure 1.10, en fonction du nombre de Froude F_1 . Nous pouvons alors remarquer, comme pour L_r/h_2 , que la longueur relative L_j/h_2 dépend à la fois du nombre de Froude F_1 et du paramètre m . La figure 1.17 montre en outre que L_j/h_2 varie dans le même sens que F_1 et en sens inverse de m . En incluant les mesures d'ARGYROPOULOS (1962), HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent de calculer L_j/h_2 par application de la relation :

$$L_j/h_2 = 2,4(m)^{0,5} F_1^{0,4/m}, \quad 0,4 \leq m \leq 1 \quad (1.39)$$

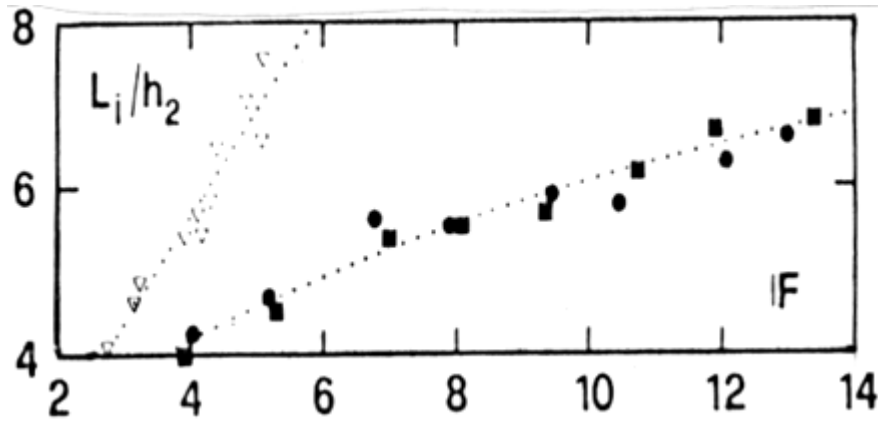


Figure 1.10 : Longueur relative L_j/h_2 du ressaut triangulaire en fonction du nombre de Froude IF_1 , selon HAGER et WANOSCHEK (1987) ($m=1$).
(∇): $m=0,44$ selon ARGYROPOULOS (1962).

I.2.1.4. Profil de surface généralisé du ressaut

L'introduction des variables $X=x/L_j$ et $y(x) = [h(x)-h_1] / (h_2-h_1)$ permet de tracer le long de l'axe longitudinal du canal, le profil de surface du ressaut sous la forme adimensionnelle ; $h(x)$ désigne la hauteur du ressaut à la distance x comptée à partir du pied du ressaut. Pour $x=0$, correspondant à $X=0$, nous pouvons écrire que $h(x)=h_1$ et par suite $y=0$. Par contre, pour $x=L_j$, correspondant à $X=1$, nous pouvons écrire que $h(x)=h_2$ et $y=1$. Les variables adimensionnelles X et $y(x)$ définissant le profil de surface du ressaut le long de l'axe longitudinal du canal sont telles que $0 \leq X \leq 1$ et $0 \leq y \leq 1$.

La figure 1.11 représente les mesures expérimentales de HAGER et WANOSCHEK (1987) concernant le profil de surface généralisé du ressaut "triangulaire" le long de l'axe longitudinale du canal. Les parois de mesures, obtenus pour $6,8 \leq F_1 \leq 11,8$; se situent ainsi sur une même courbe d'équation approchée:

$$y(X) = (1 + \alpha X) \cdot \tanh(\beta X) \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (1.40)$$

"tanh" désigne la tangente hyperbolique.

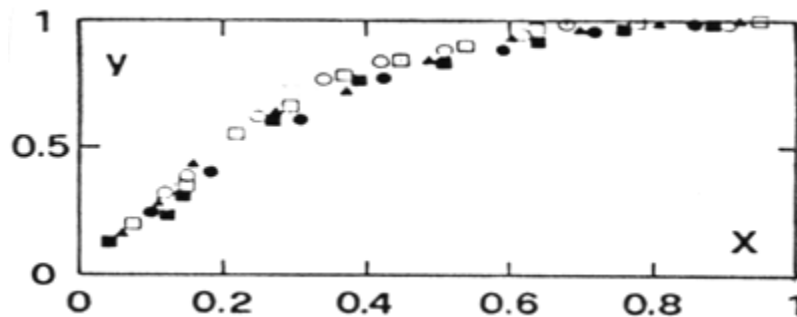


Figure 1.11 : Profil de surface généralisé $y(X)$ le long de l'axe longitudinal du canal triangulaire ($m=1$), selon Hager et Wanoschek (1987) .

La figure 1.11 montre que le profil de surface généralisé est pratiquement linéaire pour la gamme $0 \leq X \leq 0,2$. La droite, représentant la partie linéaire du profil passe par le point de coordonnées (0,0) et coupe approximativement l'axe parallèle à X au point de coordonnées (0,4 ;1) ; le paramètre β figurant dans la relation (1.39) a donc pour valeur : $\beta = (1-0)/(0,4-0) = 1/0,4$, soit $\beta=2,5$. Ainsi, le paramètre α peut être déterminé en écrivant que $y(X=1)=1$, soit $1=(1+\alpha) \cdot \tanh(2,5)$, par suite $\alpha=0,014$. Le profil de surface généralisé admet donc pour équation :

$$y(X)=(1+0,014X) \cdot \tanh(2,5 \cdot X) \quad (1.41)$$

HAGER et WANOSCHEK (1987) notent que le profil de surface le long de la paroi incliné du canal triangulaire (profil latéral) se situe légèrement au-dessous du profil axial précédemment défini, voir même équivalent.

I.3 Etude de Achour et Debabeche (2003)

I.3.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

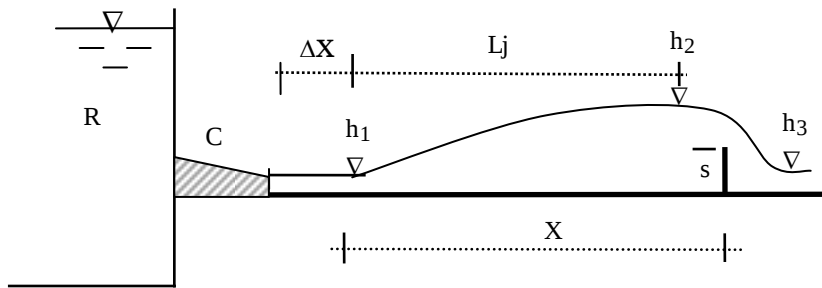


Figure 1.12: Ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince.

Lors du contrôle du ressaut, la mise en place du seuil à l'aval n'a théoriquement aucun effet réducteur sur le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut classique. Sous les mêmes conditions de l'écoulement amont, c'est à dire sous la condition de l'identité des débits volumes et des hauteurs initiales du ressaut, la hauteur finale h_2^* du ressaut classique est théoriquement égale à celle du ressaut contrôlé par un seuil.

La figure 1.13 montre à la fois la variation de Y^* et de Y_s en fonction du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement incident.

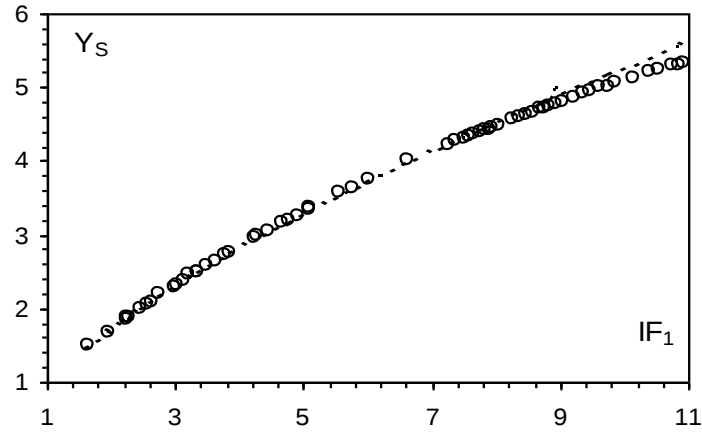


Figure 1.13 : Variation du rapport $Y_S = f(F_1)$ dans un canal triangulaire.
(---) Ressaut classique. (o) Ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

La figure 1.13 montre la variation de Y^* et de Y_S en fonction du nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement incident. Il ressort que l'égalité $Y^* = Y_S$ n'est vérifiée que pour une certaine gamme de valeurs du nombre de Froude F_1 . L'influence du seuil à paroi mince se manifeste à des valeurs du nombre de Froude F_1 supérieures à 7,5.

Cette influence s'accroît au fur et à mesure que F_1 augmente, mais ne semble pas être significative.

La représentation graphique des points expérimentaux des rapports Y_S en fonction de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil a abouti à une courbe unique, comme l'indique la figure 1.14. Celle-ci montre clairement que les points expérimentaux obtenus s'alignent suivant une droite passant par le point (0,1). Suite à un ajustement linéaire Achour et Debabeche (2003) ont déterminé la relation suivante :

$$Y_S = 1 + 0,96 \cdot S \quad (1.42)$$

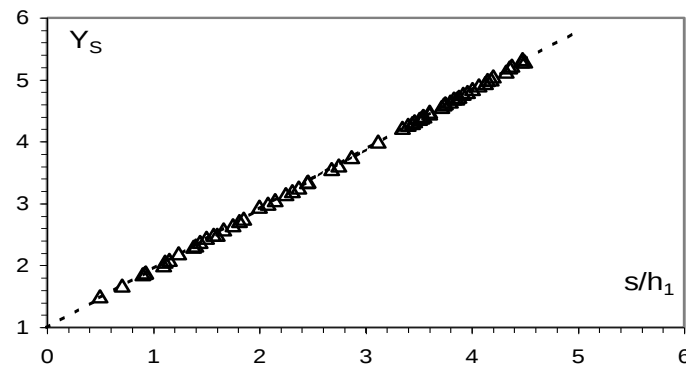


Figure 1.14: Variation expérimentale de $Y_S = f(S)$ lors du contrôle d'un ressaut triangulaire. (Δ) Points expérimentaux.
(---) Courbe tracée selon la relation : $Y_S = 1 + 0,96 \cdot S$.

I.3.2 Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude

Achour et Debabeche (2003) ont montré précédemment que l'influence du seuil sur la hauteur finale du ressaut, et de même pour le rapport Y , n'était pas significative. Ils ont trouvé également qu'une relation unique existe entre la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil et le rapport Y_s des hauteurs conjuguées du ressaut. Ces considérations laissent les auteurs penser qu'une relation unique peut être obtenue entre la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil et le nombre de Froude F_1 .

La figure 1.15 montre en conséquence que les points de mesures expérimentaux obtenus suivent, dans leur totalité, la variation d'une courbe unique de type logarithmique. L'ajustement des couples de valeurs (F_1, S) , suivant la méthode des moindres carrés non linéaires, à donner la relation :

$$S=s/h_1 = 4,125.Ln [(F_1 + 4)/5] \quad (1.43)$$

« Ln » désigne le logarithme népérien.

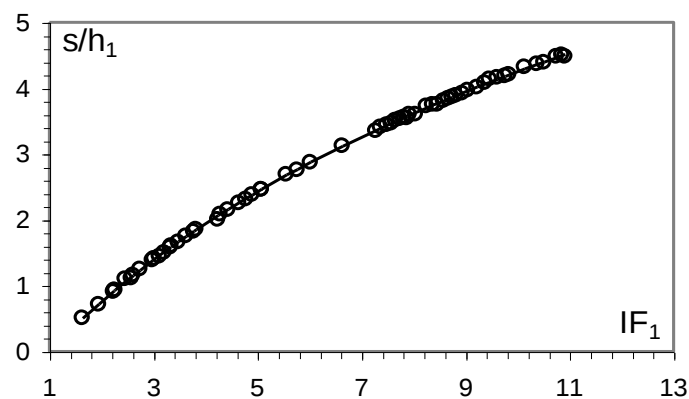


Figure 1.15: Variation expérimentale de la hauteur relative S du seuil, en fonction du nombre de Froude F_1 . (o) Points expérimentaux

La relation (1.43), ainsi que la tendance des points expérimentaux représentés par la figure 1.15, montrent que pour $F_1 = 1$ la hauteur relative S du seuil est nulle.

Comparée à la courbe expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil mince dans un canal rectangulaire, la figure 1.15 indique que pour le cas du ressaut triangulaire la hauteur relative s/h_1 ne dépend pas de la position X/h_2 du seuil.

En outre, le contrôle du ressaut rectangulaire nécessite des hauteurs relatives s/h_1 beaucoup plus importantes, pour un même nombre de Froude F_1 .

I.3.3 Relation générale régissant le contrôle du ressaut

Achour et Debabeche (2003) ont montré, d'après l'analyse de leurs mesures expérimentales, qu'une relation générale peut exprimer les paramètres F_1 , s/h_1 et X/h_1 . Cette relation peut s'écrire sous la forme $f(s/h_1, F_1, X/h_1) = 0$.

L'analyse des mesures expérimentales obtenues a montré que la meilleure représentation graphique adimensionnelle de la fonction f est celle indiquée par la figure 1.16. Les points expérimentaux se situent en fait, pour $X/h_1 \geq 4$ (condition largement réalisée dans la pratique), sur une droite d'équation : $(S+F_1^{0,4}) = a.(X/h_1)+b$. Les valeurs des constantes a et b ont été obtenues par un ajustement linéaire.

Ainsi, la relation générale régissant le contrôle du ressaut triangulaire en présence d'un seuil à paroi mince s'écrit :

$$S + F_1^{0,4} = 0,127.(X/h_1) + 1,269 \quad , X/h_1 \geq 4 \quad (1.44)$$

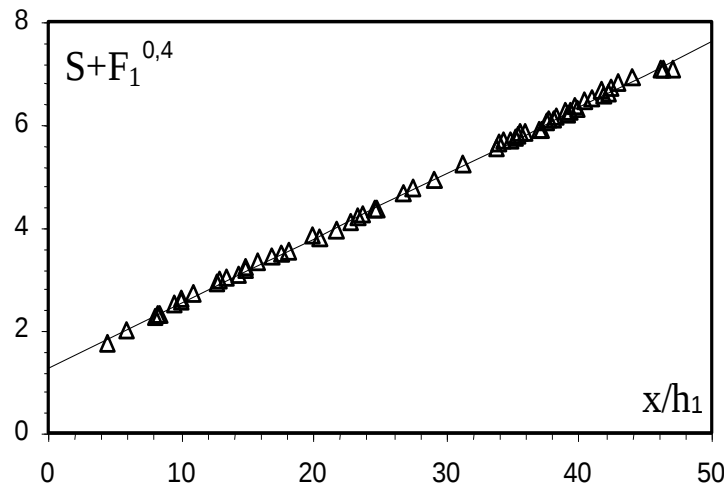


Figure 1.16 : Variation de $(S+F_1^{0,4})$ en fonction de la position relative x/h_1 du seuil (Δ) Points expérimentaux (—) courbe d'ajustement

I.3.4. Approche de Debabeche et Achour (2007)

L'étude de Debabeche et Achour (2007) a trait à l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° . L'étude a pour objectif de faire une comparaison entre les caractéristiques du ressaut contrôlé par seuil mince, du ressaut contrôlé par seuil épais et du ressaut forcé de type B-min (figure 1.17).

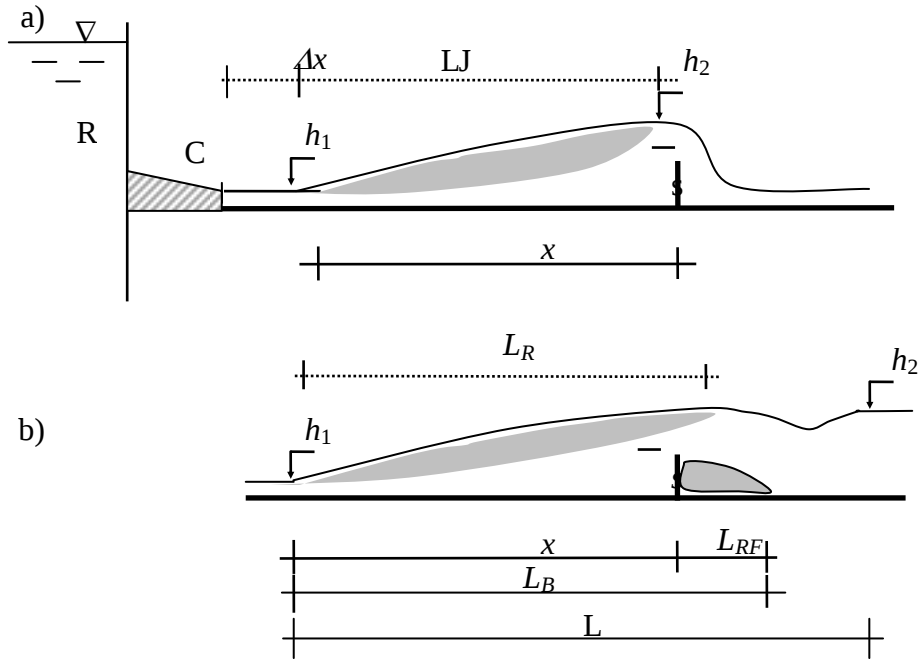


Figure 1.17 : a) Ressaut contrôlé. b) Ressaut forcé de type B_{min} . h_1 hauteur d'eau amont, h_2 hauteur d'eau aval, s hauteur du seuil, x position du seuil par rapport au pied du ressaut, L_J longueur du ressaut, L_{RF} longueur du rouleau de fond, L_B distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval, L Distance entre le pied du ressaut et la position où h_2 devient constante. $\square x$ distance séparant le convergent du pied du ressaut, C convergent, R réservoir.

I.4 RAPPORT DES HAUTEUR CONJUGUEES DU RESSAUT :

Le ressaut n'étant pas encore forcé, théoriquement le seuil ne devrait avoir aucun effet réducteur sur la hauteur finale h_2 du ressaut, puisque celui-ci n'est pas encore forcé. En d'autre termes, la hauteur finale h_2^* du ressaut classique triangulaire doit être égale à la hauteur finale h_2 du ressaut contrôlé par seuil, sous les mêmes conditions de l'écoulement incident. La figure 1.18 montre la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 d'une part, pour le cas du ressaut contrôlé par le seuil à paroi mince et épaisse, et d'autre par pour le ressaut forcé.

Nous avons également représenté la variation du rapport Y^* théorique du ressaut 'classique triangulaire' issu de l'application de l'équation de quantité de mouvement, soit :

$$IF_1^2 = \frac{2Y^{*2}(Y^{*2} + Y^* + 1)}{3.(Y^* + 1)} \quad (1.45)$$

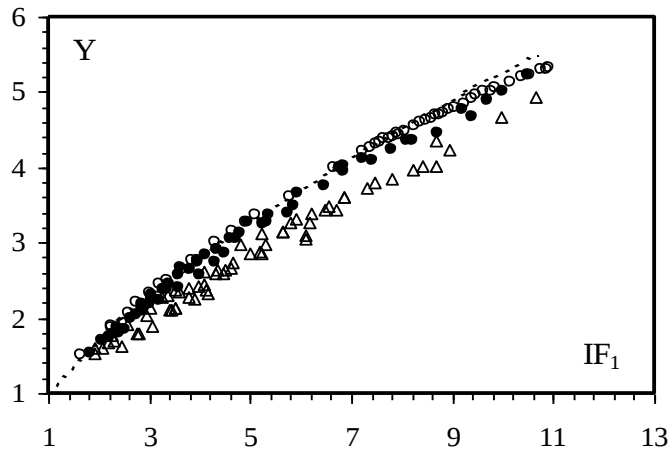


Figure 1.18: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude IF_1 de l'écoulement incident, dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m=1$: (o) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (•) ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) ressaut forcé par seuil à paroi mince. (---) Courbe tracé selon la relation (1).

La figure 1.18 montre ainsi que l'égalité $Y = Y^*$ n'est satisfaite que pour une certaine gamme de valeurs du nombre de Froude incident F_1 . L'influence du seuil à paroi mince (ou épaisse) sur le rapport des hauteurs conjuguées apparaît à des valeurs de F_1 supérieures à 7,50 environ. Cette influence s'accroît avec l'augmentation de F_1 , mais elle n'est cependant pas significative; Nous avons pu observer que en effet que pour $F_1=11$ l'écart relatif $(Y-Y^*)/Y^*$ est approximativement égal à 5% pour le seuil à paroi mince et 7% environ pour le cas du seuil à paroi épaisse.

Par ailleurs, pour les même nombres de Froude F_1 , un décalage important, entre les valeurs de Y du ressaut forcé et du ressaut contrôlé sont perceptibles.

En effet, pour des nombres de Froude F_1 supérieur à 3, le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut forcé est nettement inférieur à celui contrôlé par seuil.

Dans toute la gamme de Froude F_1 que nous avons testé, c'est-à-dire $1,60 \leq F_1 \leq 11$, un ajustement des valeurs expérimentales a montré que la variation de $Y=f(F_1)$ est de type logarithmique:

$$Y = 1 + \alpha \ln[(F_1 + 4)/5] \quad (1.46)$$

$\alpha = 3,96$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince

$\alpha = 3,78$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse

$\alpha = 3,33$ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince

La condition de criticité est ainsi satisfaite puisque $Y(1) = 1$.

L'analyse des mesure expérimentales a montré la possibilité de corrélér le rapport Y des hauteurs conjuguées des ressauts contrôlé et forcé par seuil et la hauteur relative S de celui-ci, dans toutes la gamme $1,60 \leq F_1 \leq 11$. La figure 1.19 montre la variation expérimentale de Y en fonction de S pour le cas du ressaut contrôlé par seuil à paroi mince et épaisse, et le cas d'un ressaut forcé par seuil mince. Il ressort que cette variation suit une loi linéaire et un ajustement a permis d'écrire avec une bonne approximation, aussi bien pour le ressaut contrôlé (seuil à paroi mince et épaisse) que pour le ressaut forcé, que :

$$Y = 1 + \beta S \quad (1.47)$$

$\beta = 0,96$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince

$\beta = 1,02$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse

$\beta = 0,82$ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince

Pour l'ajustement de ces droites, nous avons pris en considération la condition : $Y(1) = 1$.

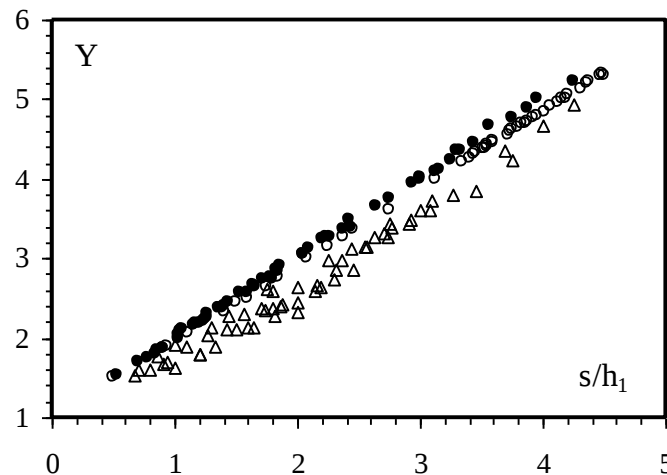


Figure 1.19: variation expérimentale du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de la hauteur relative S du seuil. Points expérimentaux pour $m = 1$: (○) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (●) Ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) ressaut forcé par seuil à paroi mince

I.4.1 Hauteur relative du seuil

Il ressort des relations (1.46) et (1.47) que la hauteur relative S du seuil peut s'écrire pour les trois cas de figure comme suit :

$$S = \gamma \ln [(F_1 + 4)/5] \quad (1.48)$$

$\gamma = 4,13$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince

$\gamma = 3,71$ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse

$\gamma = 4,06$ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince

L'expérimentation a d'ailleurs montré la validité de la relation (1.48) pour les trois type de ressauts testés. Nous présenterons sur la figure 1.20 les résultats obtenus.

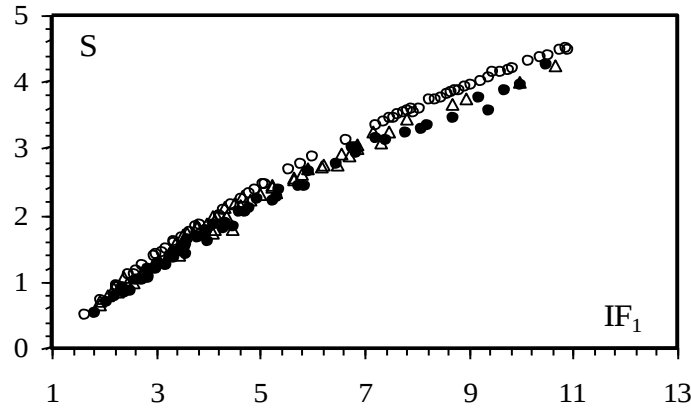


Figure 1.20 : Variation expérimentale de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude IF_1 , pour un ressaut évoluant dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m=1$: (o) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (•) ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) ressaut forcé par seuil à paroi mince.

1.4.2 Longueur relative du bassin

Comme il est bien illustré dans la figure 1.21, la notation de longueur de bassin diffère pour les deux types de ressauts.

Pour le ressaut contrôlé par seuil mince ou épais, cette longueur correspond à la position x du seuil par rapport au début du ressaut. Pour ce type de ressaut, cette longueur est caractérisée par un rouleau de surface.

Tandis que pour le ressaut forcé, la longueur L_B du bassin est la somme de la longueur de la position x du seuil et de la longueur du rouleau de fond L_{RF} à l'aval du seuil, par rapport au pied du ressaut ($L_B = x + L_{RF}$).

La figure 1.21 montre la variation expérimentale de la longueur relative $X = x/h_1$ du bassin du ressaut contrôlé par seuil mince, par seuil épais et $X = L_B/h_1$ du ressaut forcé par seuil mince en fonction du nombre de Froude F_1 . Un ajustement par la méthode des moindres carrés a permis d'aboutir, avec une bonne approximation, pour les trois types de ressaut, à une équation de type puissance de la forme :

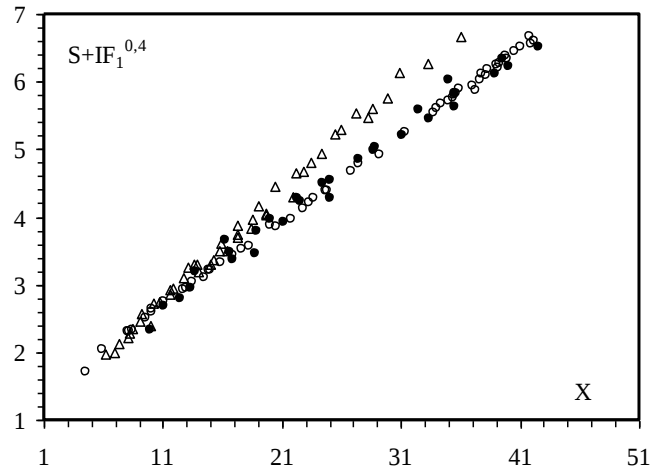
$$S + F_1^{0,4} = a X + b, \quad X \geq 4 \quad (1.49)$$

La hauteur relative $S = s/h_1$ de seuil est tirée de l'équation (1.48).

Les constantes a et b sont représentées pour chaque type de ressaut dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1.1 : valeurs des constantes a et b de l'équation (1.49) pour les trois types de ressaut

	Ressaut Contrôlé		<i>Ressaut Forcé</i> de type B-min
	Seuil mince	Seuil épais	
a	0,127	0,125	0,161
b	1,278	1,410	1,000
R^2	0,999	0,986	0,993

**Figure 1.21** : Variation expérimentale de la longueur relative X du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 , pour un ressaut évoluant dans un canal triangulaire. Points expérimentaux pour $m = 1$: (○) ressaut contrôlé par seuil à paroi mince. (●) ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse. (Δ) ressaut forcé par seuil à paroi mince.

Pour le même nombre de Froude F_1 et pour la même hauteur relative s/h_1 du seuil, la longueur relative X est pratiquement la même pour le ressaut contrôlé par seuil mince et par seuil épais. Cependant, pour le ressaut de type B-min, la longueur relative X du bassin est relativement petite par rapport à celle du ressaut contrôlé, pour $F_1 \geq 4$. Par ailleurs, on peut observer que pour $S + F_1 = 6,68$, l'écart relatif entre x/h_1 et L_B/h_1 est de 17%.

I.5 CONCLUSION

A travers ce chapitre, nous avons abordé les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire et triangulaire, à fond horizontal.

L'étude bibliographique a examiné dans un premier temps, la classification de l'U.S.Bureau of Reclamation concernant la forme du ressaut et ceux de Hager (1990) relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. La bibliographie a abordé dans un second temps les travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire incliné à pente positive. Il a été montré que la première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné était celle de Bakhmeteff et Matzké (1938), qui ont évoqué dans leur étude, le profil de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. En outre Kindsvater (1944) a

classifié les ressauts dans un canal à pente positive en quatre principaux types: type A, type B, type C et type D. par ailleurs Il a été montré également que plusieurs auteurs ont abordé la question du ressaut en contre pente, mais uniquement pour le canal rectangulaire. Mc Corcodale et Mohamed (1994) ont étudié le cas limite d'existence des ressauts en contre pente. Une relation théorique a été proposée pour le type D. L'étude de Pagliara et Peruginelli (2000) a été également évoquée dans ce volet de l'étude bibliographique.

L'étude a examiné dans un seconde temps, les travaux de Hager et Wanoschek (1987) relatifs au ressaut hydraulique classique dans un canal triangulaire de pente géométrique horizontale. Nous avons mis l'accent sur la démarche expérimentale assez particulière de HAGER et WANOSCHEK (1987) qui extrapole les résultats issus d'un profil semi-triangulaire à angle d'ouverture de 45° à un canal symétrique.

HAGER et WANOSCHEK (1987) proposent une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut L_r/h_2 et L_j/h_2 , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de m .

Nous avons abordé en second lieu le travail de Achour et Debabeche (2003) qui a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut, contrôlé par un seuil dénoyé à paroi mince, dans un canal de section droite triangulaire à angle d'ouverture de 90° . Le ressaut est contrôlé de telle sorte que sa longueur L_j soit approximativement égale à la longueur du bassin, délimité à l'amont par le pied du ressaut et à l'aval par le seuil. L'expérimentation a eu pour objectif de corrélérer les différents paramètres régissant le contrôle du ressaut. L'étude de Achour et Debabeche (2003) montre que ces paramètres sont en nombre de cinq, et pouvant former trois produits adimensionnels $S=s/h_1$, F_1 et X/h_1 ; S est la hauteur relative du seuil et X/h_1 sa position relative. L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a pu mener à l'établissement de relations simples à l'emploi, liant les trois variables adimensionnelles ci-dessus citées, pour le type de seuil considéré.

Dans un troisième temps, nous avons examiné dans ce chapitre, l'étude de Debabeche et Achour (2007), relative à l'analyse de l'influence du seuil sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire. Les auteurs ont fait une étude comparative, d'une part, entre le ressaut contrôlé par seuil mince et par seuil épais, et d'autre part entre le ressaut contrôlé et le ressaut forcé de type B-min. L'analyse des mesures expérimentales montre que la mise en place d'un seuil n'a pas d'effet réducteur significatif sur le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut. Un léger écart est cependant observé en Y^* et Y désignant les rapports des hauteurs conjuguées respectivement du ressaut sans obstacle à l'aval "ressaut classique" et ceux du

ressaut contrôlé. L'écart est par contre important, entre les valeurs de Y du ressaut forcé et du ressaut contrôlé. En effet, pour des nombres de Froude IF_1 supérieurs à 3, le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut forcé est nettement inférieur à celui du ressaut contrôlé. Une loi de type logarithmique est proposée pour évaluer le rapport Y en fonction du nombre de Froude IF_1 , pour les trois types de ressaut. En outre, la représentation graphique des mesures expérimentales montre que $(Y-1)$ augmente au fur et à mesure que la hauteur relative S du seuil croît, suivant une courbe unique linéaire de pente 0,96 pour le cas du ressaut contrôlé par seuil mince, de pente 1,02 pour le cas du ressaut contrôlé par seuil épais et la pente est de 0,82 pour le ressaut forcé par seuil mince. L'interdépendance des paramètres adimensionnel S et IF_1 est alors mise en évidence.

En outre, une relation de type puissance, liant la hauteur relative S du seuil, le nombre de Froude IF_1 et la longueur relative X du bassin a été trouvée pour les trois types de ressaut étudiés. La représentation graphique montre que pour le même nombre de Froude incident les points de mesures du ressaut contrôlé par seuil mince et épais sont presque confondus. En outre un décalage important est observé pour le cas du ressaut forcé. En effet, pour des nombres de Froude incidents supérieurs à 4, la longueur relative du bassin du ressaut forcé est inférieure à celle du ressaut contrôlé. D'une manière générale, le ressaut forcé par seuil mince est plus avantageux par une hauteur aval moindre et un bassin plus court.

Chapitre II :

ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANAL TRAPEZOÏDAL A PENTE HORIZONTALE

II.1. INTRODUCTION

Ce présent chapitre de notre étude sera consacré en premier lieu à un développement théorique, permettant de trouver une relation théorique de la forme $F_1=f(Y,\lambda,M,\alpha)$, tels que : F_1 est le nombre de Froude de l'écoulement incident, $Y=h_2/h_1$ est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut (h_1 et h_2 étant les hauteurs conjuguées du niveau d'eau respectivement à l'extrémité amont et aval), $M=mh_1/b$ le coefficient de forme du canal (m représente la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois latérale par rapport à l'horizontale, b la largeur de la base du canal), $\lambda=L_j/h_1$ la longueur relative du ressaut, et α l'angle d'inclinaison du canal par rapport à l'horizontale. En second lieu ce chapitre servira à estimer le coefficient k de correction, afin de corriger la relation issue du développement théorique. k étant le rapport du volume réel et du volume calculé du ressaut.

Les données expérimentales nous permettront en outre, d'analyser expérimentalement la relation obtenue, afin de trouver une formulation explicite de la fonction $f(F_1,Y,\lambda,M,\alpha)=0$.

II.2. ANALYSE THEORIQUE

II.2.1. Equation de la quantité de mouvement

Nous avons appliqué l'équation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale d'un ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale, incliné d'une pente positive par rapport à l'horizontale (Figure 2.1), en tenant compte des hypothèses simplificatrices citées dans la partie bibliographique.

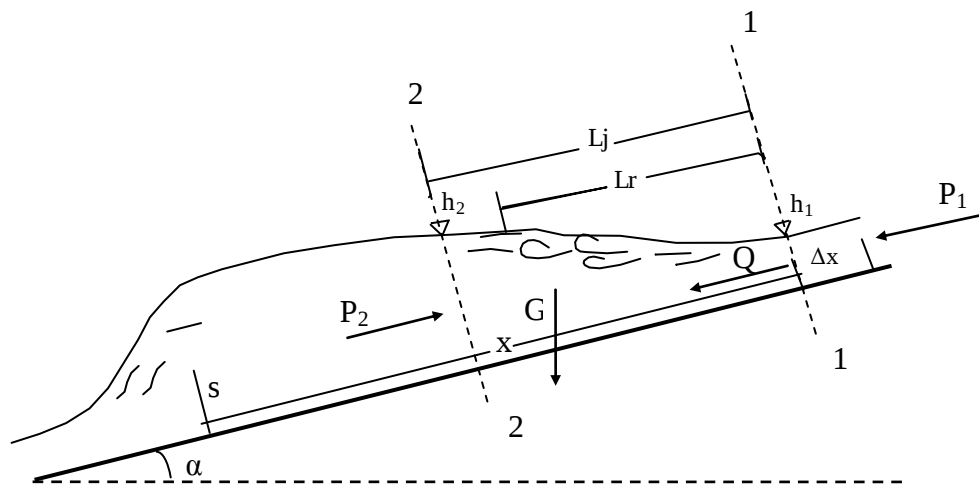


Figure 2.1 : Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal incliné à pente positive

L'équation de la quantité de mouvement appliquée entre les sections 1-1 et 2-2 s'écrit :

$$\rho Q \vec{v}_1 - \rho Q \vec{v}_2 = \sum \vec{F}_{ext} \quad (2.1)$$

Tel que:

$\sum \vec{F}_{ext}$: représente la somme des forces extérieures. Ces forces sont :

- La force de pression P_1 appliquée à la section 1-1.
- La force de pression P_2 appliquée à la section 2-2.
- Le poids G appliqué au centre de gravité du volume d'eau formé par le ressaut.

La relation (2.1) s'écrit :

$$\rho Q v_1 + P_1 + G \sin \alpha = \rho Q v_2 + P_2 \quad (2.2)$$

Les forces P_1 et P_2 sont appliquées, selon la figure 2.2, respectivement aux centres de gravité des sections trapézoïdales 1 et 2 ; le poids G est appliqué au centre de gravité du ressaut. Les forces de pressions P_1 et P_2 ainsi que le poids G de l'eau peuvent être exprimés, en appliquant les lois de l'hydrostatiques: $P_1 = \omega h_{c1} A_1$, $P_2 = \omega h_{c2} A_2$, $G = \omega V$, où: $\omega = \rho g$ représente le poids spécifique du liquide en écoulement, h_{c1} et h_{c2} représentent respectivement les distances des centres de gravité des sections transversales 1 et 2 à partir de la surface libre de l'écoulement, A_1 et A_2 représentent respectivement l'aire de la section mouillée 1 et 2 et V représente le volume d'eau inscrit entre les deux sections 1 et 2.

En remplaçant les expressions de P_1 , P_2 et G dans la relation (2.2), on obtient:

$$\rho Q v_1 + \omega h_{c1} A_1 + \omega V \sin \alpha = \rho Q v_2 + \omega h_{c2} A_2 \quad (2.3)$$

L'équation de continuité indique que la vitesse moyenne de l'écoulement s'écrit, en fonction du débit volume Q et de l'aire de la section mouillée A : $v = Q/A$.

En tenant compte de toutes ces considérations la relation (2.3) peut s'écrire, en divisant tous ses membres par ρg :

$$\frac{Q^2}{g A_1} + h_{c1} A_1 + V \sin \alpha = \frac{Q^2}{g A_2} + h_{c2} A_2 \quad (2.4)$$

En se basant sur la figure (2.2), on peut facilement déterminer les expressions de A_1 , A_2 , h_{c1} et h_{c2} .

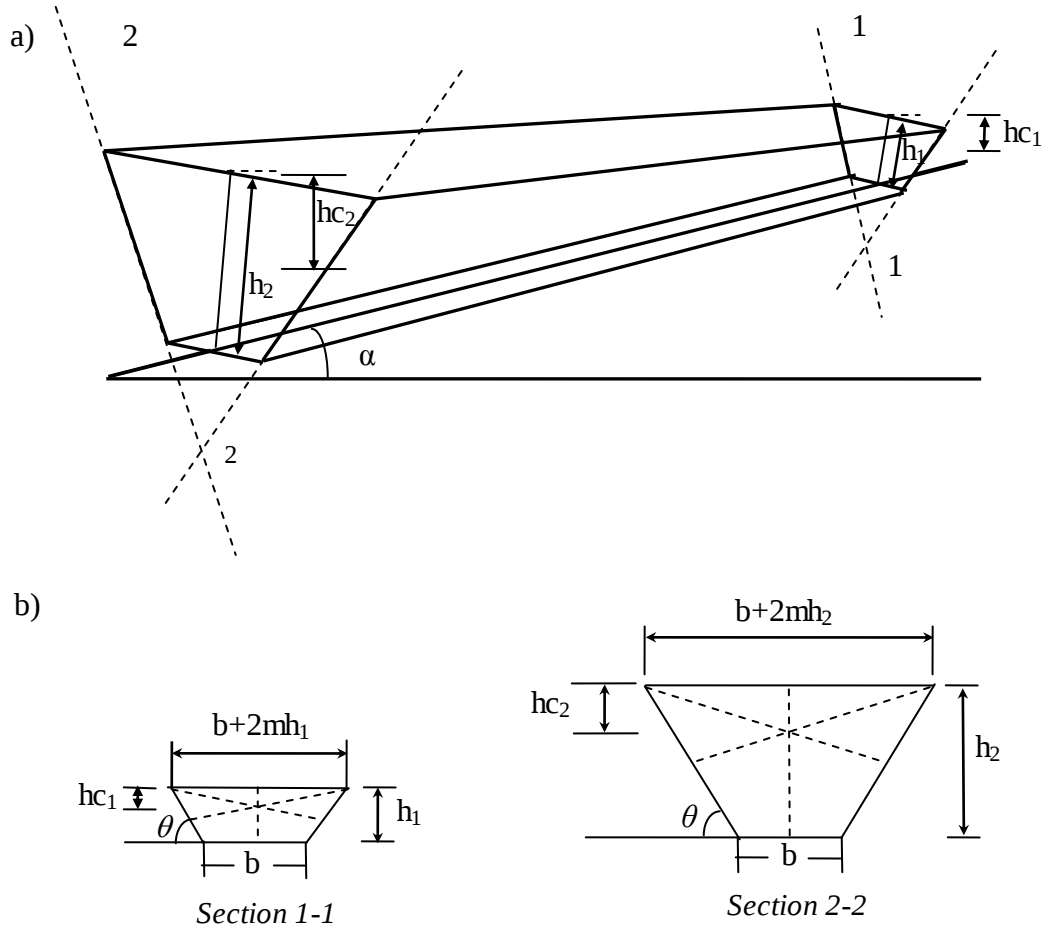


Figure 2.2 : a) Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut.

b) Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut.

La figure 2.2 montre respectivement les sections amont (1-1) et aval (2-2) du ressaut. Le paramètre m est défini comme la cotangente de l'angle θ . Celui-ci est l'angle d'inclinaison des parois du canal trapézoïdale symétrique par rapport à l'horizontal.

L'aire des sections mouillées A_1, A_2

$$A_1 = bh_1 + mh_1^2 \quad (2.5)$$

$$A_2 = bh_2 + mh_2^2 \quad (2.6)$$

Les hauteurs des centres de gravité hc_1, hc_2 s'écrivent respectivement :

$$hc_1 = \frac{h_1^2}{6} \cdot \frac{3b + 2mh_1}{A_1} \cos \alpha \quad (2.7)$$

$$hc_2 = \frac{h_2^2}{6} \cdot \frac{3b + 2mh_2}{A_2} \cos \alpha \quad (2.8)$$

II.2.2. Evaluation du volume du ressaut

Le volume d'eau inscrit entre les deux sections 1-1 et 2-2

$$V = \left[\frac{A_1 + A_2}{2} \right] \times L_j \quad (2.9)$$

En tenant compte des relations (2.5) et (2.6) la relation (2.9) devient:

$$V = \left[\frac{(bh_1 + mh_1^2) + (bh_2 + mh_2^2)}{2} \right] \times L_j \quad (2.10)$$

Tels que : $Y = h_2/h_1$ et $M = mh_1/b$

$$V = bh_1 \left[\frac{M(Y^2 + 1) + Y + 1}{2} \right] \times L_j \quad (2.11)$$

La forme géométrique du volume équivalent V représentative du ressaut hydraulique étudié, n'est pas en réalité parfaitement prismatique, comme nous l'avons supposé, à cause de la perturbation de la surface libre du ressaut due au rouleau de surface. Pour cela, il est nécessaire de corriger ce volume en le multipliant par un coefficient k .

$$V = kbh_1 \left[\frac{M(Y^2 + 1) + Y + 1}{2} \right] \times L_j \quad (2.12)$$

k étant le rapport du volume réel et du volume calculé du ressaut. Ce dernier étant difficile à évaluer théoriquement, nous allons l'estimer par voie expérimentale.

II.2.3. Nombre de Froude

L'autre caractéristique du ressaut hydraulique qui va nous servir de base à notre étude théorique est le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, calculé à la section initiale 1-1, c'est-à-dire au pied du ressaut. Ce nombre s'exprime en règle générale, pour un canal horizontal, par la relation (2.13) :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial h_1} \quad (2.13)$$

La relation (2.13) montre que le nombre de Froude F_1 est une fonction de quatre paramètres tels que :

- Q représente le débit volume de l'écoulement;
- g est l'accélération de la pesanteur;
- A_1 est l'aire de la section transversale mouillée au pied de ressaut;

- $\frac{\partial A_1}{\partial h_1}$ représente la dérivée partielle de l'aire de la section mouillée A_1 au pied du ressaut par apport à la hauteur h_1 . Pour notre cas, il s'agit d'une section trapézoïdale et par conséquent: $\frac{\partial A_1}{\partial h_1} = (b + 2mh_1)$.

Cette considération mène à écrire la relation (4.13) telle que :

$$F_1^2 = \frac{Q^2(b + 2mh_1)}{g(bh_1 + mh_1^2)^3} \quad (2.14)$$

En tenant compte des relations (2.5) à (2.8), (2.12), (2.13) et (2.14), la relation (2.4) devient :

$$\begin{aligned} \frac{Q^2}{g(bh_1 + mh_1^2)} + \frac{h_1^2 \cos \alpha}{6} (3b + 2mh_1) + \frac{1}{3} Kbh_1 L_j [(Y + 1) + M(Y^2 + 1)] \sin \alpha = \\ \frac{Q^2}{g(bh_2 + mh_2^2)} + \frac{h_2^2 \cos \alpha}{6} (3b + 2mh_2) \end{aligned} \quad (2.15)$$

En multipliant la relation (4.15) par $\left(\frac{b + 2mh_1}{(bh_1 + mh_1^2)^2} \right)$ on obtient :

$$\begin{aligned} F_1^2 + \frac{1 + 2M}{2(1 + M)^2} \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \cos \alpha + \frac{1 + 2M}{2(1 + M)^2} K \frac{L_j}{h_1} ((Y + 1) + M(Y^2 + 1)) \sin \alpha = \\ F_1^2 \left(\frac{1 + M}{Y(1 + MY)} \right) + \frac{1 + 2M}{2(1 + M)^2} \left(Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) \right) \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.16)$$

En remplaçant le rapport $\frac{L_j}{h_1}$ par le coefficient λ , la relation (2.16) devient :

$$\begin{aligned} F_1^2 + \frac{1 + 2M}{2(1 + M)^2} \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \cos \alpha + \frac{1 + 2M}{2(1 + M)^2} K \lambda ((Y + 1) + M(Y^2 + 1)) \sin \alpha = \\ F_1^2 \left(\frac{1 + M}{Y(1 + MY)} \right) + \frac{1 + 2M}{2(1 + M)^2} \left(Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) \right) \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.17)$$

L'application de l'équation de la quantité de mouvement entre deux sections délimitants un ressaut hydraulique à pente positive et évoluent dans un canal de section droite trapézoïdale mène à écrire la relation (2.17); cette relation montre que ce type de ressaut est régi par :

- le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident à la section amont du ressaut;
- les hauteurs conjuguées h_1 et h_2 respectivement à l'amont et à l'aval du ressaut;
- la pente du canal par rapport à l'horizontale (l'angle α);
- la longueur L_j du ressaut;
- le coefficient de forme M .

Un arrangement de la relation (2.17) permet d'écrire le nombre de Froude sous la forme suivante :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \cos \alpha \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) - K\lambda((Y+1) + M(Y^2+1)) \tan \alpha \right] \quad (2.18)$$

La relation (4.18) exprime le nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées, de l'angle d'inclinaison α du canal par rapport à l'horizontale, le coefficient de forme $M=mh_1/b$ et la longueur relative $\lambda=L_j/h_1$ d'un ressaut hydraulique à pente positive, évoluent dans un canal de section droite trapézoïdale.

L'approche théorique proposée pour le cas du ressaut classique montre que le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident dépend exclusivement du rapport des hauteurs conjuguées Y , du coefficient de forme M en appliquant toujours l'équation de la quantité de mouvement.

En remplaçant $\alpha=0$ dans la relation (2.18) on obtient :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (2.19)$$

La relation (2.18) mène donc à la relation (2.19) exprimant les caractéristiques du ressaut classique dans un canal trapézoïdale.

Ce résultat nous permet donc de valider notre approche théorique. En outre, afin de déterminer le coefficient de correction k , l'approche proposée sera confrontée par la suite aux résultats expérimentaux.

II.3. ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'EQUATION SEMI THEORIQUE

II.3.1. Estimation du coefficient k de correction

Pour évaluer expérimentalement le coefficient de correction k , la relation (2.18) peut être reformulée comme suit :

$$K = \frac{\frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \cos \alpha - F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right]}{\frac{1+2M}{2(1+M)^2} [(Y+1) + M(Y^2+1)] \lambda \sin \alpha} \quad (4.20)$$

Le nombre de Froude incident est calculé pour $m=0,312$, selon la relation 2.14 :

Les valeurs du coefficient k obtenues en introduisant les données expérimentales dans l'équation (2.20), sont présentées dans le tableau 2.1 :

Tableau 2.1 : Valeurs du coefficient k selon la relation 2.20

tang (α) = 0,005			tang (α) = 0,01			tang (α) = 0,015			tang (α) = 0,02		
F ₁	Y	k	F ₁	Y	k	F ₁	Y	k	F ₁	Y	k
2,26	2,74	1,43	1,52	1,73	0,49	2,08	2,63	1,11	1,66	2,25	1,55
2,28	2,77	1,03	2,14	2,7	1,29	2,2	2,88	1,54	1,82	2,4	1,39
3,21	4	0,96	2,53	3,24	1,53	2,58	3,4	1,21	2,11	2,8	1,25
3,39	4,23	1,25	2,56	3,27	1,08	3,02	4	1,2	2,16	2,92	1,24
3,67	4,67	1,51	2,66	3,38	1,19	3,39	4,27	0,46	2,71	3,75	1,3
3,81	4,65	0,58	2,9	3,73	1,35	3,4	4,55	1,25	2,72	3,9	1,53
4,91	6,27	1,46	2,92	3,7	0,83	3,55	4,83	1,3	2,96	4,28	1,57
5,25	6,67	1,37	3,12	4,03	1,16	3,69	5,03	1,37	3,24	4,64	1,54
5,75	7,27	1,33	3,59	4,73	1,39	3,96	5,48	1,49	3,34	4,73	1,38
6,02	7,63	1,51	3,69	4,85	1,53	4,06	5,57	1,34	3,51	4,96	1,48
7,33	9,25	0,56	3,76	4,75	0,42	4,5	6,1	1,19	3,64	5	1,07
7,55	9,37	1,14	4,37	5,7	1,45	4,62	6,35	1,51	3,69	5,25	1,41
7,96	10	0,51	4,42	5,65	0,49	4,78	6,63	1,43	3,98	5,73	1,47
9,22	11,5	0,51	4,7	6,13	1,51	4,99	6,85	1,55	4,37	6,1	1,06
9,79	12,2	0,61	4,91	6,33	1,32	5,09	6,6	0,52	4,38	6,1	1,26
10,28	12,75	0,54	5,21	6,8	1,21	5,29	7,23	1,36	4,62	6,53	1,38
10,85	13,4	0,53	5,58	7,15	0,51	5,69	7,77	1,35	4,81	6,97	1,48
11,49	14,15	0,59	6,35	8,1	0,44	5,82	7,5	0,43	4,87	6,75	1,02
11,98	14,7	0,55	6,37	8,37	1,48	6,18	8,5	1,53	5,01	7	1,35
12,69	15,5	0,55	6,85	8,8	0,61	6,47	8,5	0,73	5,26	7,57	1,43
			7,23	9,47	1,56	6,49	8,87	1,46	5,59	8,03	1,47
			7,61	9,65	0,43	6,81	9,23	1,4	5,67	7,85	1,08
			7,77	9,93	1,19	6,94	9,15	0,8	5,9	8,5	1,52
			7,95	10,23	1,32	7,23	9,73	1,35	6,24	8,7	1,13
			8,72	11	0,42	7,62	9,95	0,74	6,4	9,07	1,35
			9,35	11,75	0,43	7,79	10,33	1,26	6,87	9,5	1,12
			11,35	14,1	0,47	8,26	10,75	0,73	7,44	10,4	1,22
						8,91	11,5	0,67	8,16	11,25	1,14
						9,51	12,25	0,69	8,87	12,1	1,07
						10,11	13	0,72	9,59	13	1,05
						10,81	13,7	0,56	10,19	13,7	1
						11,39	14,4	0,58			

Le tableau 2.1 montre que le coefficient de correction k est sans aucun doute une valeur constante. En éliminant quelques valeurs extrêmes, la moyenne arithmétique de toutes les valeurs de k donne la constante 1,09. L'équation (2.18) devient alors comme suit :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \cos \alpha \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) - 1,09 \lambda ((Y+1) + M(Y^2 + Y + 1)) \tan \alpha \right] \quad (2.21)$$

Afin de vérifier la validité de l'équation semi théorique (2.21), celle-ci est confrontée au nombre de Froude universelle calculé en application de la relation (2.14).

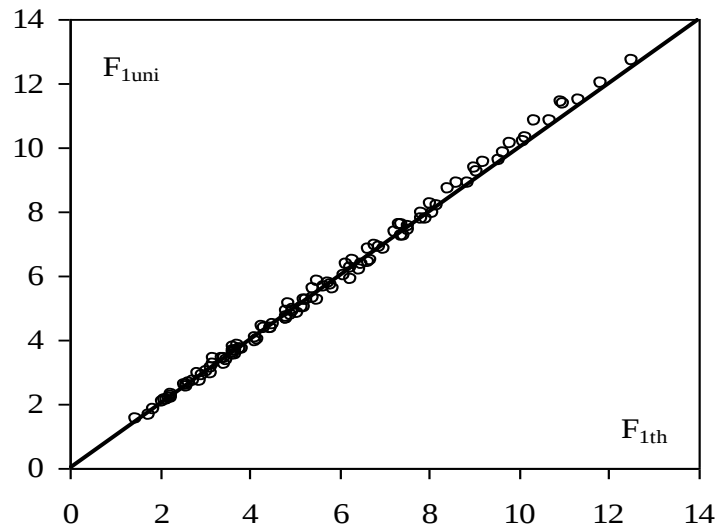


Figure 2.3 : Variation du nombre de Froude F_{1uni} selon la relation universelle en fonction du nombre de Froude théorique F_{1th} calculée selon la relation (2.21).

(—) Première bissectrice.

La figure 2.3 montre que les points obtenus suivent parfaitement la première bissectrice.

Par ailleurs, les écarts relatifs entre les nombres de Froude universelle F_{1uni} et les nombres de Froude théorique F_{1th} sont calculés et présentés au tableau 2.2, afin d'examiner la validité de la relation semi théorique (2.21) issue de notre développement théorique. Les valeurs de F_{1uni} sont calculées par la relation (2.14) en se basant sur les données expérimentales du tableau 2.1. Les valeurs de F_{1th} sont calculées par la relation (2.21) en se basant sur ces mêmes données. Le tableau 2.2, montre clairement que les écarts relatifs entre F_{1uni} et F_{1th} sont en leur majorité inférieure à 5%, on peut donc conclure à la fiabilité de la relation proposée (2.21). Cependant, celle-ci étant implicite en Y , nous allons essayer dans ce

qui suit, d'ajuster expérimentalement la relation (2.21), afin de trouver une relation approchée explicite en Y.

Tableau 2.2: Ecart relatifs en (%) entre F_{1uni} universelle et F_{1th} théorique

tang (a) = 0,005			tang (a) = 0,01			tang (a) = 0,015			tang (a) = 0,02		
F_{1uni}	F_{1th}	$(\Delta F_1/F_1)$ %	F_{1uni}	F_{1th}	$(\Delta F_1/F_1)$ %	F_{1uni}	F_{1th}	$(\Delta F_1/F_1)$ %	F_{1uni}	F_{1th}	$(\Delta F_1/F_1)$ %
2,26	2,28	-0,88	1,52	1,49	1,97	2,08	2,08	0	1,66	1,76	-6,02
2,28	2,28	0	2,14	2,17	-1,4	2,2	2,28	-3,64	1,82	1,88	-3,3
3,21	3,2	0,31	2,53	2,6	-2,77	2,58	2,6	-0,78	2,11	2,14	-1,42
3,39	3,41	-0,59	2,56	2,56	0	3,02	3,05	-0,99	2,16	2,2	-1,85
3,67	3,71	-1,09	2,66	2,67	-0,38	3,39	3,22	5,01	2,71	2,77	-2,21
3,81	3,75	1,57	2,9	2,94	-1,38	3,4	3,45	-1,47	2,72	2,9	-6,62
4,91	4,97	-1,22	2,92	2,88	1,37	3,55	3,62	-1,97	2,96	3,17	-7,09
5,25	5,29	-0,76	3,12	3,13	-0,32	3,69	3,79	-2,71	3,24	3,45	-6,48
5,75	5,79	-0,7	3,59	3,66	-1,95	3,96	4,13	-4,29	3,34	3,48	-4,19
6,02	6,09	-1,16	3,69	3,8	-2,98	4,06	4,15	-2,22	3,51	3,71	-5,7
7,33	7,24	1,23	3,76	3,64	3,19	4,5	4,54	-0,89	3,64	3,64	0
7,55	7,56	-0,13	4,37	4,47	-2,29	4,62	4,82	-4,33	3,69	3,86	-4,61
7,96	7,85	1,38	4,42	4,29	2,94	4,78	4,95	-3,56	3,98	4,2	-5,53
9,22	9,09	1,41	4,7	4,82	-2,55	4,99	5,23	-4,81	4,37	4,36	0,23
9,79	9,68	1,12	4,91	4,98	-1,43	5,09	4,88	4,13	4,38	4,48	-2,28
10,28	10,15	1,26	5,21	5,25	-0,77	5,29	5,42	-2,46	4,62	4,81	-4,11
10,85	10,7	1,38	5,58	5,42	2,87	5,69	5,84	-2,64	4,81	5,06	-5,2
11,49	11,35	1,22	6,35	6,15	3,15	5,82	5,54	4,81	4,87	4,84	0,62
11,98	11,82	1,34	6,37	6,52	-2,35	6,18	6,44	-4,21	5,01	5,19	-3,59
12,68	12,52	1,26	6,85	6,68	2,48	6,47	6,29	2,78	5,26	5,51	-4,75
			7,23	7,43	-2,77	6,49	6,72	-3,54	5,59	5,87	-5,01
			7,61	7,37	3,15	6,81	7,01	-2,94	5,67	5,66	0,18
			7,77	7,82	-0,64	6,94	6,79	2,16	5,9	6,24	-5,76
			7,95	8,06	-1,38	7,23	7,41	-2,49	6,24	6,27	-0,48
			8,72	8,43	3,33	7,62	7,42	2,62	6,4	6,63	-3,59
			9,35	9,04	3,32	7,79	7,91	-1,54	6,87	6,89	-0,29
			11,35	11	3,08	8,26	8,04	2,66	7,44	7,55	-1,48
						8,91	8,63	3,14	8,16	8,2	-0,49
						9,51	9,22	3,05	8,87	8,85	0,23
						10,11	9,83	2,77	9,59	9,54	0,52
						10,81	10,37	4,07	10,19	10,09	0,98
						11,39	10,94	3,95			

II.3.2. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle α d'inclinaison du canal

L'équation semi théorique (2.21) étant implicite en Y , il serait préférable de trouver une relation approchée permettant de trouver aisément le rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident et de l'angle d'inclinaison α du canal. En connaissant F_1 , h_1 , et α , la relation recherchée permet l'évaluation de Y et par conséquent de la hauteur conjuguée h_2 .

Les figures 2.4 à 2.8 montrent l'ajustement de la relation $Y = a F_1$ pour les cinq inclinaisons du canal.

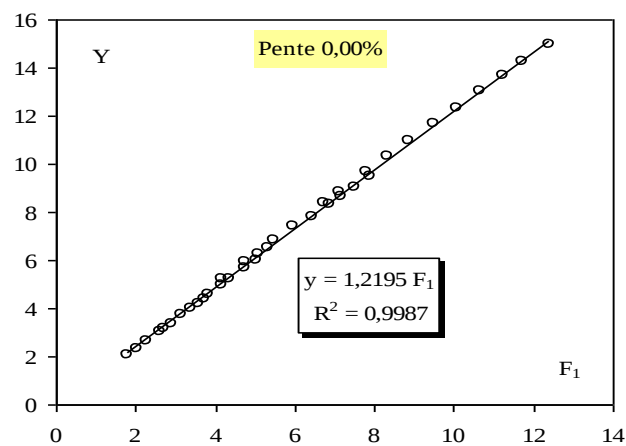


Figure 2.4 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,00$.

(o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.

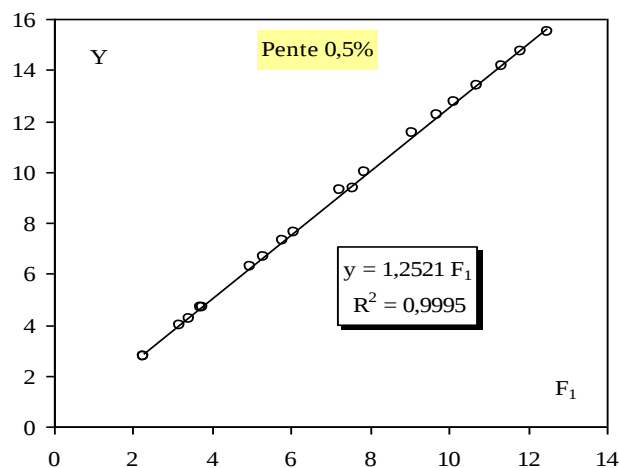


Figure 2.5 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,005$.

(o) points expérimentaux; (—) Courbes d'ajustement.

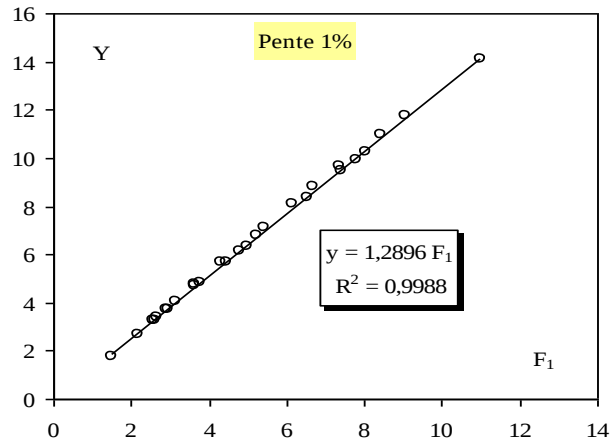


Figure 2.6 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,01$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.

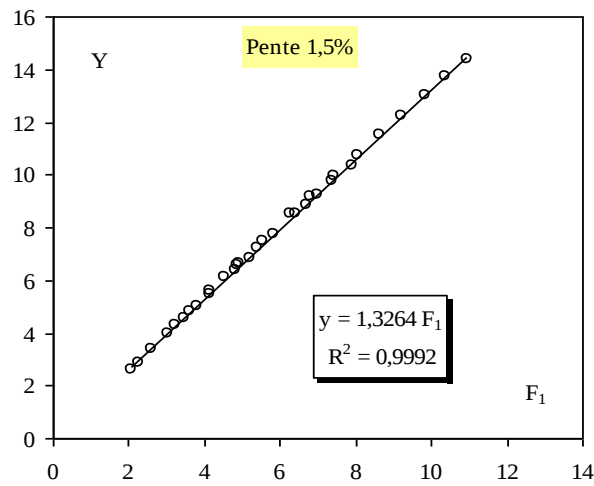


Figure 2.7 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,015$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.

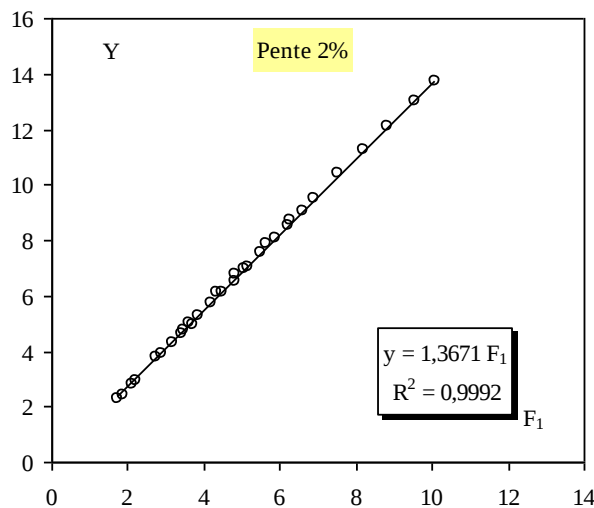


Figure 2.8 : Variation de $Y(F_1)$ pour $\tan(\alpha) = 0,02$. (o) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement.

Les données ayant servi au traçage des figures 2.4 à 2.8 sont groupées au tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes de Y en fonction de F_1

tang (a) = 0,00		tang (a) = 0,005		tang (a) = 0,01		tang (a) = 0,015		tang (a) = 0,02	
F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y
1,805	2,033	2,281	2,74	1,49	1,733	2,08	2,633	1,761	2,25
2,043	2,333	2,276	2,767	2,17	2,7	2,283	2,88	1,883	2,4
2,271	2,617	3,202	4	2,6	3,24	2,605	3,4	2,142	2,8
2,694	3,133	3,409	4,225	2,56	3,267	3,047	4	2,205	2,92
2,61	3,06	3,71	4,667	2,67	3,375	3,224	4,267	2,77	3,75
2,902	3,383	3,75	4,65	2,94	3,725	3,455	4,55	2,899	3,9
3,149	3,72	4,969	6,267	2,88	3,7	3,624	4,833	3,174	4,28
3,399	4,02	5,294	6,667	3,13	4,033	3,795	5,025	3,451	4,64
3,567	4,22	5,788	7,267	3,66	4,733	4,133	5,475	3,475	4,725
3,719	4,4	6,092	7,633	3,8	4,85	4,152	5,567	3,707	4,96
3,81	4,575	7,238	9,25	3,64	4,75	4,543	6,1	3,636	5
4,164	5	7,559	9,367	4,47	5,7	4,825	6,35	3,857	5,25
4,374	5,25	7,848	10	4,29	5,65	4,948	6,633	4,201	5,725
4,175	5,2	9,094	11,5	4,82	6,125	5,227	6,85	4,356	6,1
4,756	5,7	9,681	12,2	4,98	6,325	4,878	6,6	4,484	6,1
5,102	6,233	10,15	12,75	5,25	6,8	5,423	7,233	4,808	6,525
4,762	5,95	10,7	13,4	5,42	7,15	5,837	7,767	5,059	6,967
5,035	6,025	11,35	14,15	6,15	8,1	5,543	7,5	4,835	6,75
5,324	6,5	11,82	14,7	6,52	8,367	6,436	8,5	5,186	7
5,476	6,85	12,52	15,5	6,68	8,8	6,292	8,5	5,506	7,567
5,958	7,45			7,43	9,467	6,723	8,867	5,87	8,033
6,454	7,833			7,37	9,65	7,008	9,233	5,659	7,85
6,858	8,3			7,82	9,933	6,789	9,15	6,237	8,5
6,73	8,4			8,06	10,23	7,409	9,733	6,275	8,7
7,149	8,633			8,43	11	7,417	9,95	6,635	9,067
7,1	8,85			9,04	11,75	7,914	10,33	6,891	9,5
7,5	9,033			11	14,1	8,044	10,75	7,547	10,4
7,914	9,5					8,626	11,5	8,198	11,25
7,807	9,7					9,223	12,25	8,85	12,1
8,353	10,35					9,826	13	9,541	13
8,862	10,95					10,37	13,7	10,09	13,7
9,504	11,7					10,94	14,4		
10,07	12,35								
10,68	13,05								
11,25	13,7								
11,74	14,25								
12,42	15								

Le tableau 2.4 regroupe les valeurs des paramètres 'a' pour les cinq valeurs de pentes considérées.

Tableau 2.4 : Valeurs des paramètres 'a'

tang (α)	a
0,000	1,2195
0,005	1,2521
0,010	1,2896
0,015	1,3264
0,020	1,3671

Le tableau 2.4 montre clairement l'augmentation progressive des paramètres 'a' avec la pente du canal tang (α).

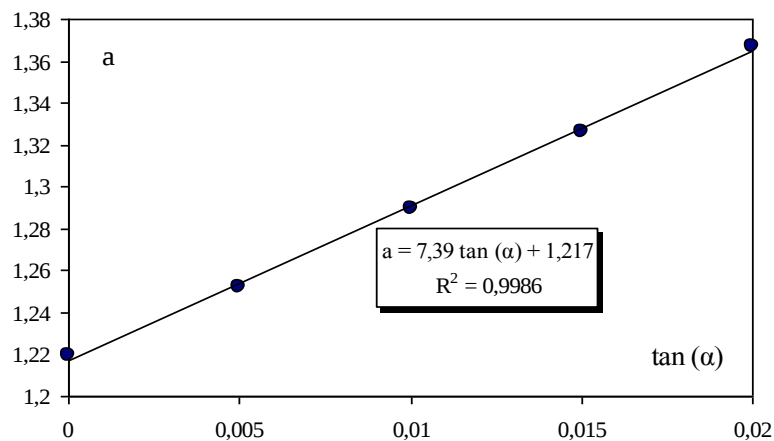


Figure 2.9 : Variation des paramètres 'a' en fonction de tang (α).

La figure 2.9 montre bien que l'ajustement statistique des couples des valeurs (a, tang (α)) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire selon la relation suivante :

$$a = 7,39 \tan (\alpha) + 1,217 ; \quad R^2 = 0,9986 \quad (2.22)$$

En effet, en remplaçant les paramètres 'a' par son expressions dans la relation $Y = a F_1$, l'équation liant les hauteurs conjugué $Y=h_2/h_1$ au nombre de Froude théorique F_1 devient:

$$Y = (7,39 \tan (\alpha) + 1,217) F_1 \quad (2.23)$$

La figure 2.10 montre que les points obtenus suivent parfaitement la première bissectrice.

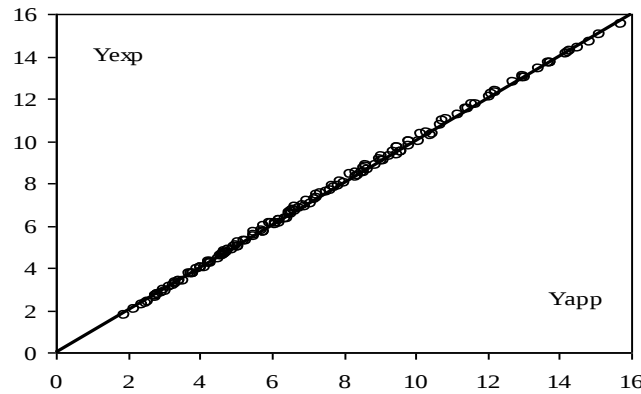


Figure 2.10 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction
Du rapport des hauteurs conjuguées théorique Y_{th} calculée selon la relation (2.23).
(—) Première bissectrice.

La relation approchée (2.23) étant explicite en Y_{th} , nous fournit un moyen simple et pratique pour la détermination du rapport Y_{th} des hauteurs conjuguées, connaissant le nombre de Froude incident F_1 et l'angle d'inclinaison α du canal. Cette relation s'applique pour des nombres de Froude F_1 variant entre 1,49 et 12,52.

La figure 2.11 montre les courbes d'ajustements issues de la relation (2.23), selon les points expérimentaux.

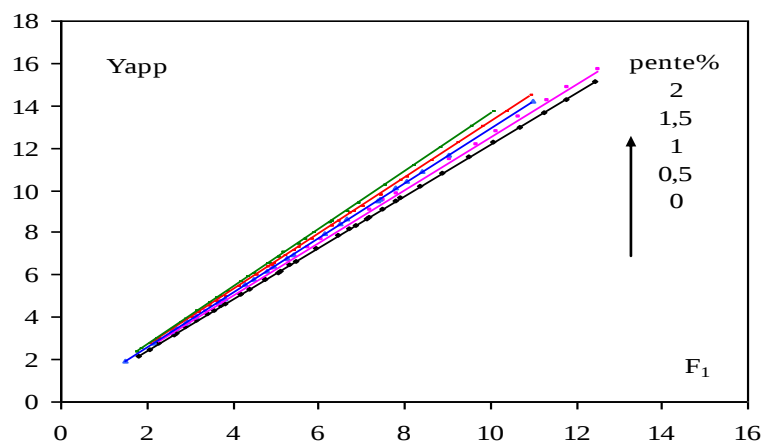


Figure 2.11: Variation expérimentale de $Y(F_1)$ pour différentes valeurs de $\tan(\alpha)$.
(—) courbe tracé selon la relation (4.23).

La relation approchée (4.23) est donc proposée en remplacement de la relation théorique implicite (2.21). Concernant la précision des calculs, la relation (2.23) occasionne des écarts relatifs inférieurs à 5 % dans leur majorité, par rapport à la relation implicite (2.21). Le tableau 2.5 illustre parfaitement ces constatations. En effet, pour obtenir le rapport des hauteurs conjuguées Y_{ap} issu de la relation approchée 2.23, on a utilisé les couples de valeurs (F_1, Y) du tableau 2.3.

**Tableau 2.5 : Ecart relatifs entre Y_{th} déterminés par la relation théorique (2.21)
et Y_{ap} calculés par la relation approchée (2.23)**

Pente 0%			Pente 0,5%			Pente 1%			Pente 1,5%			Pente 2%		
Y	Y_{app}	$\frac{\Delta Y}{Y}$ %	Y	Y_{app}	$\frac{\Delta Y}{Y}$ %	Y	Y_{app}	$\frac{\Delta Y}{Y}$ %	Y	Y_{app}	$\frac{\Delta Y}{Y}$ %	Y	Y_{app}	$\frac{\Delta Y}{Y}$ %
2,03	2,2	-8,37	2,74	2,86	-4,38	1,73	1,92	-10,98	2,63	2,76	-4,94	2,25	2,4	-6,67
2,33	2,49	-6,87	2,77	2,85	-2,89	2,7	2,8	-3,7	2,88	3,03	-5,21	2,4	2,57	-7,08
2,62	2,76	-5,34	4	4,02	-0,5	3,24	3,36	-3,7	3,4	3,46	-1,76	2,8	2,92	-4,29
3,13	3,28	-4,79	4,23	4,27	-0,95	3,27	3,31	-1,22	4	4,05	-1,25	2,92	3,01	-3,08
3,06	3,18	-3,92	4,67	4,65	0,43	3,38	3,45	-2,07	4,27	4,28	-0,23	3,75	3,78	-0,8
3,38	3,53	-4,44	4,65	4,7	-1,08	3,73	3,8	-1,88	4,55	4,59	-0,88	3,9	3,96	-1,54
3,72	3,83	-2,96	6,27	6,23	0,64	3,7	3,72	-0,54	4,83	4,81	0,41	4,28	4,33	-1,17
4,02	4,14	-2,99	6,67	6,64	0,45	4,03	4,04	-0,25	5,03	5,04	-0,2	4,64	4,71	-1,51
4,22	4,34	-2,84	7,27	7,26	0,14	4,73	4,72	0,21	5,48	5,49	-0,18	4,73	4,74	-0,21
4,4	4,53	-2,95	7,63	7,64	-0,13	4,85	4,9	-1,03	5,57	5,51	1,08	4,96	5,06	-2,02
4,58	4,64	-1,31	9,25	9,08	1,84	4,75	4,7	1,05	6,1	6,03	1,15	5	4,96	0,8
5	5,07	-1,4	9,37	9,48	-1,17	5,7	5,77	-1,23	6,35	6,41	-0,94	5,25	5,26	-0,19
5,25	5,32	-1,33	10	9,84	1,6	5,65	5,54	1,95	6,63	6,57	0,9	5,73	5,73	0
5,2	5,08	2,31	11,5	11,4	0,87	6,13	6,22	-1,47	6,85	6,94	-1,31	6,1	5,94	2,62
5,7	5,79	-1,58	12,2	12,14	0,49	6,33	6,43	-1,58	6,6	6,48	1,82	6,1	6,12	-0,33
6,23	6,21	0,32	12,75	12,72	0,24	6,8	6,77	0,44	7,23	7,2	0,41	6,53	6,56	-0,46
5,95	5,8	2,52	13,4	13,42	-0,15	7,15	6,99	2,24	7,77	7,75	0,26	6,97	6,9	1
6,03	6,13	-1,66	14,15	14,23	-0,57	8,1	7,94	1,98	7,5	7,36	1,87	6,75	6,6	2,22
6,5	6,48	0,31	14,7	14,83	-0,88	8,37	8,42	-0,6	8,5	8,55	-0,59	7	7,08	-1,14
6,85	6,66	2,77	15,5	15,7	-1,29	8,8	8,62	2,05	8,5	8,36	1,65	7,57	7,51	0,79
7,45	7,25	2,68				9,47	9,59	-1,27	8,87	8,93	-0,68	8,03	8,01	0,25
7,83	7,85	-0,26				9,65	9,51	1,45	9,23	9,31	-0,87	7,85	7,72	1,66
8,3	8,35	-0,6				9,93	10,09	-1,61	9,15	9,02	1,42	8,5	8,51	-0,12
8,4	8,19	2,5				10,23	10,41	-1,76	9,73	9,84	-1,13	8,7	8,56	1,61
8,63	8,7	-0,81				11	10,88	1,09	9,95	9,85	1,01	9,07	9,06	0,11
8,85	8,64	2,37				11,75	11,67	0,68	10,33	10,51	-1,74	9,5	9,41	0,95
9,03	9,13	-1,11				14,1	14,2	-0,71	10,75	10,68	0,65	10,4	10,3	0,96
9,5	9,63	-1,37							11,5	11,45	0,43	11,25	11,19	0,53
9,7	9,5	2,06							12,25	12,25	0	12,1	12,08	0,17
10,35	10,17	1,74							13	13,05	-0,38	13	13,02	-0,15
10,95	10,78	1,55							13,7	13,77	-0,51	13,7	13,77	-0,51
11,7	11,57	1,11							14,4	14,53	-0,9			
12,35	12,25	0,81												
13,05	13	0,38												
13,7	13,69	0,07												
14,25	14,29	-0,28												
15	15,11	-0,73												

II.4. CONCLUSION

Nous avons abordé dans ce chapitre une analyse théorique et une analyse expérimentale de l'équation semi théorique.

Comme il a été cité précédemment, ce chapitre a été consacré en premier lieu à un développement théorique qui nous a mené à exprimer la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, \lambda, M, \alpha) = 0$. Cette approche a mené à l'établissement d'une relation semi-théorique. Ceci a été rendu possible par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections aval et amont du ressaut hydraulique. En second lieu une analyse expérimentale de la relation semi-théorique a été établie. En effet, les mesures expérimentales ont permis d'estimer le coefficient de correction k . Une valeur moyenne constante $k=1,09$ a été trouvée, pour les quatre pentes étudiées. Les écarts relatifs entre le nombre de Froude théorique et son homologue expérimental étant en leurs majorités inférieures à 5%, permettant de conclure à la fiabilité de la relation théorique obtenue. Une relation approchée explicite en Y a été proposée, permettant la détermination du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal.

CONCLUSION GENERALE

Notre étude a été dédiée à l'analyse théorique du ressaut hydraulique, contrôlé par seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique, à fond incliné, formant une pente positive avec l'horizontale. Deux grandes chapitre ont été nécessaires : un premier chapitre bibliographique à travers le quelle nous avons passé en revue les travaux actuels entrepris dans ce domaine, et un deuxième chapitre qui a concerné notre propre contribution.

✓ Le premier chapitre, a permis d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire et triangulaire horizontal et incliné.

✓ Le second chapitre, s'est intéressé à l'analyse théorique et expérimentale du ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite trapézoïdal symétrique horizontale et incliné.

A travers le premier chapitre nous avons abordé en premier temps la classification proposée par Bradley et Peterka (1957), concernant la forme du ressaut. Dans un second temps nous avons passé en revue l'étude de Hager (1989) relative aux caractéristiques du ressaut classique. Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau de fond. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. L'étude expérimentale a eu pour objectif d'évaluer la variation de la longueur relative L_r/h_2 en fonction de F_1 . En effet, une caractéristique particulière de ressaut trapézoïdal pour $F_1 > 4$ est l'apparition d'un rouleau de fond, et des zones d'écoulement de retour latérale. L'expérimentation montre aussi qu'aucun rouleau de surface n'existe dans ce type de ressaut.

Pour le ressaut hydraulique dans un canal incliné à pente positive, nous avons montré que la première étude approfondie du ressaut hydraulique incliné était celle de Bakhmeteff et Matzké (1938), qui ont évoqué dans leurs études, le profile de surface, la longueur du ressaut et la distribution des vitesses. En outre Kindsvater (1944), a classifié les ressauts inclinés à pente positive en quatre principaux types; type A, type B, type C et type D. En outre il a proposé une approche pour le rapport des hauteurs conjuguées pour le ressaut de type C. Par ailleurs, la littérature montre que le ressaut en contre pente est classé en quatre configurations principales : type F, type FI, type FII et type F-S. Il a été montré également que plusieurs auteurs ont abordé la question du ressaut en contre pente, mais uniquement pour le canal rectangulaire, nous avons présenté les travaux de Mc Corcodal et Mohamed (1994), qui ont

étudié le cas limite d'existence des ressauts en contre pente, une relation théorique a été proposée pour le type D. Les auteurs confirment que ce type de ressaut est très sensible à la variation des profondeurs conjuguées pour des nombres de Froude $F_1 < 4$. Cependant, pour les nombres de Froude $F_1 < 9$, le ressaut limite en contre pente (type D) est difficile à établir.

Finalement ce chapitre a traité deux types de ressauts hydrauliques : le ressaut évoluant dans un canal triangulaire à pente nulle et son homologue à pente positive. Pour le ressaut hydraulique classique, nous avons exposé en premier lieu la démarche expérimentale de Hager et Wanoschek (1987) qui extrapolent les résultats issus d'un profil semi triangulaire à angle d'ouverture de 45° au canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° . L'étude montre que les rapports Y expérimentaux des hauteurs conjuguées du ressaut sont légèrement inférieurs à ceux calculés par l'équation de la quantité de mouvement. Cette différence est attribuer, selon les auteurs à l'effet des frottements sur les parois du canal, et l'équation de la quantité de mouvement est alors modifiée en conséquence. Hager et Wanoschek (1987) proposent une relation générale au calcul des longueurs caractéristiques du ressaut L_r/h_2 et L_j/h_2 , en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de la cotangente m . Une équation représentative du profil de surface généralisé le long de l'axe du canal est aussi proposée. Toujours pour cette configuration de ressaut, l'étude de Debabeche et Achour (2007), relative à l'analyse de l'influence du seuil sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire. Les auteurs ont fait une étude comparative, d'une part, entre le ressaut contrôlé par seuil mince et par seuil épais, et d'autre part entre le ressaut contrôlé et le ressaut forcé de type B-min. L'analyse des mesures expérimentales montre que la mise en place d'un seuil n'a pas d'effet réducteur significatif sur le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut. Un léger écart est cependant observé en Y^* et Y désignant les rapports des hauteurs conjuguées respectivement du ressaut sans obstacle à l'aval "ressaut classique" et ceux du ressaut contrôlé. L'écart est par contre important, entre les valeurs de Y du ressaut forcé et du ressaut contrôlé. En effet, pour des nombres de Froude IF_1 supérieurs à 3, le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut forcé est nettement inférieur à celui du ressaut contrôlé. Une loi de type logarithmique est proposée pour évaluer le rapport Y en fonction du nombre de Froude IF_1 , pour les trois types de ressaut. En outre, la représentation graphique des mesures expérimentales montre que $(Y-1)$ augmente au fur et à mesure que la hauteur relative S du seuil croît, suivant une courbe unique linéaire de pente 0,96 pour le cas du ressaut contrôlé par seuil mince, de pente 1,02 pour le cas du ressaut contrôlé par seuil épais et la pente est de 0,82

pour le ressaut forcé par seuil mince. L'interdépendance des paramètres adimensionnel S et IF_1 est alors mise en évidence.

Le deuxième chapitre de notre travail a concerné notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal de section droite trapézoïdale symétrique à pente positive variable.

Comme il a été cité précédemment, ce chapitre a été consacré en premier lieu à un développement théorique qui nous a mené à exprimer la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, \lambda, M, \alpha) = 0$. Cette approche a mené à l'établissement d'une relation semi-théorique. Ceci a été rendu possible par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections aval et amont du ressaut hydraulique. En second lieu une analyse expérimentale de la relation semi-théorique a été établie. En effet, les mesures expérimentales ont permis d'estimer le coefficient de correction k . Une valeur moyenne constante $k=1,09$ a été trouvée, pour les quatre pentes étudiées. Les écarts relatifs entre le nombre de Froude théorique et son homologue expérimental étant en leurs majorités inférieures à 5%, permettant de conclure à la fiabilité de la relation théorique obtenue. Une relation approchée explicite en Y a été proposée, permettant la détermination du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achour, B., Debabeche, M., (2003), Control of Hydraulic jump by sill in a triangular channel, J. Hydraulic Research, Vol. 41, No. 3, pp. 97-103
- Argyropoulos, P., A., (1962), General solution of the hydraulic jump in sloping channels, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, Vol. 88, HY4, pp. 61-75.
- Beiram, M., K., Chamani, M., R., (2006), Hydraulic Jumps in Sloping Channels: Sequent Depth Ratio, J. Hydraulic Engrg., vol 32(10), pp. 1061-1068.
- Bradley, J.N., Peterka, A.J., (1957), The hydraulic design of stilling basins: Hydraulic jumps on a horizontal apron, paper 1401, proc. Amer. Soc. Civ. Engrs., J. Hydraulic. Division, Vol.83, HY5.
- Cherhabil, S., (2010), Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à pente variable, Doctorat en sciences, Département de Génie Civil et Hydraulique, Université de Biskra.
- Chow, V. T., (1958), Open channel hydraulics, McGraw-Hill, New York.
- Chow, V.T., (1959), Open channel Hydraulics, McGraw Hill, New York, NY.
- Debabeche, M., (2003), Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques, Doctorat d'état, Département d'Hydraulique, Université de Biskra.
- Debabeche, M., (2008), Les écoulements brusquement variés, cours de 1ère année magister, photocopié, Université de Biskra.
- Debabeche, M., Achour, B., (2007), Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel, J. Hydraulic Research Vol. 45, No. 1, pp. 135–139.
- Debabeche, M., Cherhabil, S., Hafnaoui, A. et Achour, B. (2009), Hydraulic jump in a sloped triangular channel, Can. J. Civ; Eng. 36: 655-658 (2009).
- Hager, W.H., Wanoschek, R (1989), Hydraulic jump in trapezoidal channel, J. hydraulic research, Vol. 27, 1989, N.3.
- Hager, W.H., Bretz, N.V., (1988), Sill-controlled stilling basin, the international symposium on hydraulics for high dams, 273-280.

Hager, W.H., Sinniger, R., (1985,1986), Flow Characteristics of the hydraulic Jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise, J. Hydraulic Research, Vol. 23, pp. 101-113, 1985, Vol. 24, pp. 207-215, 1986.

Hager, W.H., Sinniger, R., (1987), Construction hydraulique, Ecoulement stationnaire, Edition suisse romande.

Hager, W.H., Wanoschek, R., (1987), Hydraulic Jump in Triangular Channel, J. Hydraulic Research, Vol. 25, Nr. 5, pp. 549-564.

Mc Corcodal, 1994, Journal of Hydraulic Research, VOL. 32, 1994, NO.1; 119-130.

Ohashi et al. (1973): Design of Combined Hydraulic Jump and Ski-Jump Energy Dissipator of Flood Spillway. XIII ICOLD Congress Madrid Q.41, R.19: 311-333.

Okada, A., et Aki, S. (1955). Experimental study of hydraulic jump on reversed slope apron. J. Tech. Lab., 5(6), Tokyo (in Japanese).

Pagliara, S. et peruginelli, A. 2000, Journal of Hydraulic Engineering/ November 2000/ 847-850.

Rajartnam, N. (1963): Discussion to "General Solution of the Hydraulic Jump in sloping Channels" by P.A. Argyropoulos. Proc. ASCE, J. Hydraulics Division 89(HY1) : 258-261.

Rajaratnam, N., (1965), Hydraulic Jump in horizontal conduit, Water Power, 17, pp. 80-83.

Rajaratnam, N., (1966), Hydraulic jump in sloping channel, J. irrigation and Power (India), 23(Apr): pp.137-149, Discussion, 1967, 24(Jump): pp.285-293.

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

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

Rajaratnam, N., Subramania, K., (1968, 1969, 1970), Profil of the hydraulic jump, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, vol. 94, 1968, HY3 663-673; vol. 95, 1969, HY1 546-557, HY2 725-727; vol. 96, 1970, HY2 579-581.

Rajaratnam, N., (2002), Hydraulic jump on corrugated beds, J. Hydraulic Engrg., Volume 128, Issue 7, 656-663.

Rand, W., (1957), An approach to generalised design of stilling basin, Trans. New-York, Academy of Sciences, Vol. 20(2), 173-191.

Rand, W., (1965), Flow over a vertical sill in an open channel, Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, vol. 91, HY4 97-122.
