

Chapitre VII

ETUDE EXPERIMENTALE

VII.1 Introduction

Ce chapitre se propose d'analyser expérimentalement les caractéristiques de deux types de ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° , muni d'une marche positive, à savoir, le ressaut contrôlé et le ressaut type A. En effet, le ressaut hydraulique est considéré comme contrôlé lorsque le rouleau de surface se présente à l'amont du seuil de sorte que la hauteur conjuguée aval se mesure au droit de la marche positive. Il est dit de type A lorsque la fin du rouleau de surface coïncide verticalement avec le début de la marche positive.

Dans ce chapitre nous aborderons deux sous chapitres : la description des essais et les résultats expérimentaux.

VII.2 Description des essais

VII.2.1 Position du problème

Les caractéristiques étudiées dans un ressaut hydraulique provoqué par marche positive sont : le débit volume Q , la hauteur initiale h_1 , mesurée au pied du ressaut, la hauteur finale h_2 , mesurée au droit de la marche positive pour le cas du ressaut contrôlé et sur la marche pour le ressaut type A, la hauteur s de la marche, la longueur L_r du rouleau, mesurée à l'amont immédiat de la marche pour le cas du ressaut contrôlé et au droit de la marche pour le cas du ressaut type A et la position x de la marche. Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, le rapport $Y=h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut, la hauteur relative $S=s/h_1$ de la marche positive, la longueur relative $\lambda=L/h_1$ du bassin, la position relative de la marche $X = x/h_1$.

En effet, le ressaut hydraulique est considéré de type contrôlé lorsque le rapport x/L_r est supérieur à l'unité et il est dit de type A lorsque ce dernier rapport est égal à l'unité. Ce dernier type de ressaut a été défini ainsi en vertu de la classification de Hager et Bretz (1986).

VII.2.2 Procédé d'étalonnage du diaphragme

Comme il a été indiqué plus haut, le canal de mesure de section triangulaire est relié, dans sa partie aval, à un second canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un

déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale (figure 6.4), réalisé et testé par Hachemi Rachedi L. (2006), permettant l'étalonnage du diaphragme (où la mesure directe du débit).

En effet, lors du passage d'un écoulement à débit Q , il se produit dans l'étranglement du diaphragme une chute de pression, celle-ci est traduite par la différence de niveau Δh lue sur les deux tubes piézométriques du manomètre. Cette différence est engendrée par la vitesse de l'écoulement et par conséquent par le débit.

Par ailleurs, la hauteur h de la lame d'eau traversant le déversoir rectangulaire sans échancrure avec contraction latérale (figure 6.4), est obtenue par la lecture sur un limnimètre placé au-dessus de l'ouverture du déversoir. Ainsi, le débit volume est obtenu en insérant la hauteur h dans l'équation (7.1) du déversoir.

Ainsi à chaque débit volume Q passant par le diaphragme, correspond une différence de niveau Δh lue sur le manomètre et une hauteur h de la lame d'eau traversant le dit déversoir.

$$Q = 0,3794B\sqrt{2g}\beta\left(1 + 0,16496\beta^{2,0716}\right)^{3/2} h^{3/2} \quad (7.1)$$

Avec : $\beta = \frac{b}{B}$.

Q : le débit en (m^3/s);

B : la largeur du canal en (m) ;

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

β : rapport de forme ;

b : Largeur de l'échancrure en (m) ;

h : la hauteur de la lame d'eau en (m).

La condition d'application de cette relation est : $\beta < 0,45$

L'objectif est de trouver la courbe d'ajustement $Q = f(\Delta h)$, afin de connaître le débit volume traversant le diaphragme, par simple lecture sur le manomètre différentiel.

Tableau 7.1 : Mesures ayant servi à l'étalonnage du débitmètre à diaphragme.

Δh (cm)	h (cm)	Q (l/s)
2,30	2,442	1,443
2,50	2,562	1,550
2,90	2,586	1,572
3,70	2,712	1,689
5,00	2,898	1,865
11,40	4,202	3,257
12,70	4,24	3,301
13,40	4,592	3,720
20,10	4,916	4,121
24,30	5,232	4,525
28,00	5,608	5,021
32,00	5,702	5,148
35,00	5,894	5,410
43,00	6,302	5,981
46,00	6,494	6,257
50,00	6,602	6,414
62,00	7,134	7,204
71,00	7,306	7,466
80,00	7,746	8,151
62,40	7,176	7,268
98,70	8,312	9,060
123,20	8,978	10,171
154,40	9,602	11,249
170,30	9,968	11,899
192,40	10,132	12,193
223,60	10,466	12,801
255,10	11,392	14,537
263,30	11,476	14,698
279,30	12,098	15,909

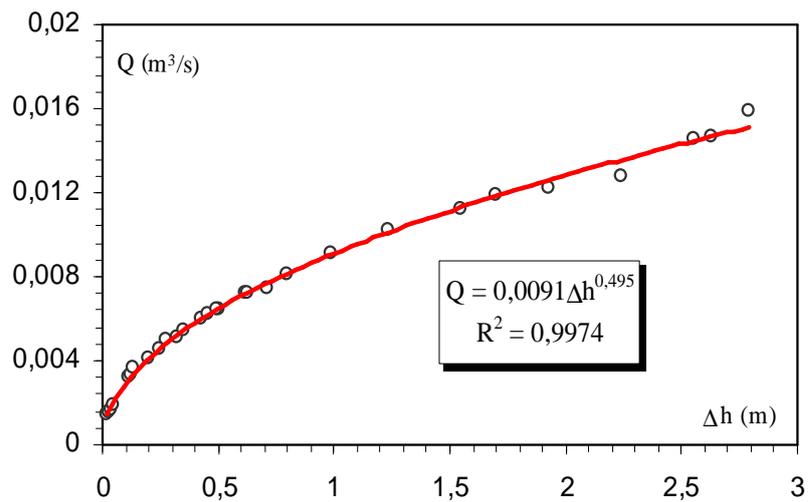


Figure 7.1 : Courbe d'ajustement $Q = f(\Delta h)$. (o) points de mesures issues du tableau 7.1.

Le débit volume traversant le diaphragme est exprimé par la relation 7.2.

$$Q = 0,0091(\Delta h)^{0,4950} \quad (7.2)$$

Pour les débits volumes relativement grands il est préférable d'utiliser la relation (7.1), celle-ci a une erreur relative maximale sur le débit de 3%. Quant au diaphragme, à cause des fluctuations au niveau du manomètre, la lecture de la différence de niveau Δh devient imprécise.

VII.2.3 Procédure expérimentale

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique provoqué par marche positive, dans un canal triangulaire symétrique à angle d'ouverture de 90° .

L'expérimentation a été menée sous sept hauteurs initiales : $h_1(\text{mm}) = 18 ; 25 ; 28 ; 34 ; 40 ; 44 ;$ et 50 . Une large gamme des nombres de Froude incident a été ainsi obtenue : $2 < F_1 < 20$.

La formation du ressaut est conditionnée par la mise en place d'une marche positive au travers de l'écoulement, pour cela 12 marches ont été confectionnées et testées, de hauteur géométrique allant de $3,8$ à 14 cm et d'une longueur $L_0 = 100$ cm.

Un échantillon constitué d'une soixantaine de points de mesures expérimentales, pour chaque caractéristique et pour les deux types de ressaut étudiés, a permis ainsi d'aboutir à des résultats assez significatifs.

Comme il a été cité plus haut, le ressaut hydraulique est considéré de type contrôlé lorsque le rapport x/L_r est supérieur à l'unité et il est dit de type A lorsque ce dernier rapport est égal à l'unité.

Ainsi lorsque nous obtenons une configuration du ressaut (figure. 7.2), nous effectuons, pour une hauteur s et une position x de la marche positive, les opérations suivantes :

1. Lecture de la différence Δh des côtes des ménisques dans les tubes manométriques reliés aux prises de pression sortant du débitmètre à diaphragme, ou mesure de la lame d'eau au-dessus du déversoir rectangulaire ;
2. Calcul du débit volume correspondant, par application de la relation (7.1) ou (7.2) ;
3. Calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par application de la relation : $F_1^2 = 2Q^2 / (gh_1^5)$;
4. Mesure de la longueur x de la position de la marche positive ;
5. Mesure de la longueur L_r du rouleau ;
6. Mesure de la hauteur géométrique s de la marche positive ;
7. Mesure de la hauteur conjuguée aval h_2 du ressaut.

L'accroissement du nombre de Froude F_1 entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval ainsi que l'augmentation de la longueur L_r de son rouleau. Pour ramener le pied du

ressaut à sa position d'origine (à la sortie de l'écoulement), il est nécessaire de déplacer la marche vers l'aval et d'augmenter sa hauteur s .

Les figures 7.2 et 7.6 illustrent des configurations typiques de ressaut hydraulique respectivement contrôlé et de type A, provoqué par marche positive en canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° , pour la même hauteur initiale $h_1 = 50$ mm et à débit volume croissant.

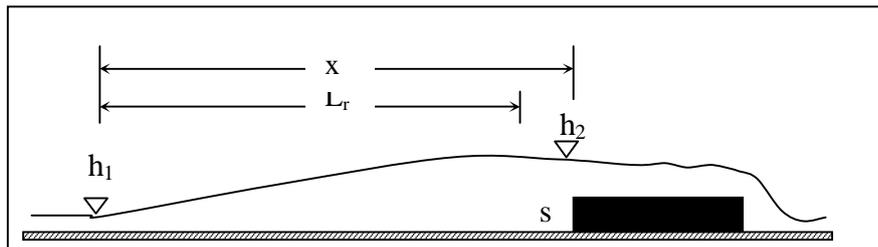


Figure 7.2 : Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive.



Figure 7.3 : Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive.
 $F_1 = 5,28$, $s = 7$ cm, $x = 101,2$ cm, $L_r = 72,8$ cm, $h_2 = 12,57$ cm



Figure 7.4 : Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive.
 $F_1 = 9,82$, $s = 13$ cm, $x = 161,5$ cm, $L_r = 126,8$ cm, $h_2 = 20,074$ cm.



Figure 7.5 : Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive.
 $F_1 = 11,38$, $s = 13,5$ cm, $x = 171,7$ cm, $L_r = 132,1$ cm, $h_2 = 21,1$ cm

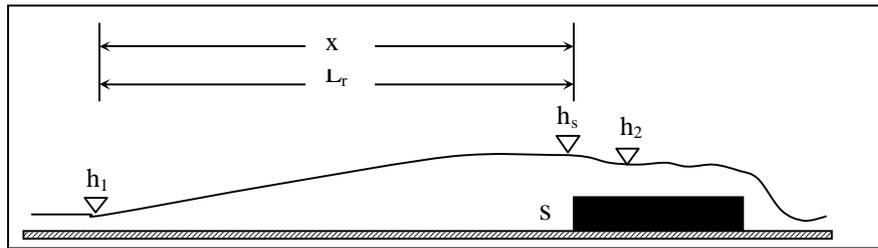


Figure 7.6 : Ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive.



Figure 7.7 : Photographie d'un ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive.

$F_1 = 6,87$, $s = 9$ cm, $x = 111,3$ cm, $h_2 = 14,87$ cm



Figure 7.8 : Photographie d'un ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive.

$F_1 = 6,61$, $s = 10$ cm, $x = 116,2$ cm, $h_2 = 15,51$ cm.



Figure 7.9 : Photographie d'un ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive.

$F_1 = 12,08$, $s = 14$ cm, $x = 160,2$ cm, $h_2 = 20,01$ cm

VII.3 Résultats expérimentaux

VII.3.1 Ressaut hydraulique contrôlé

VII.3.1.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure (7.10) représente la variation du rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

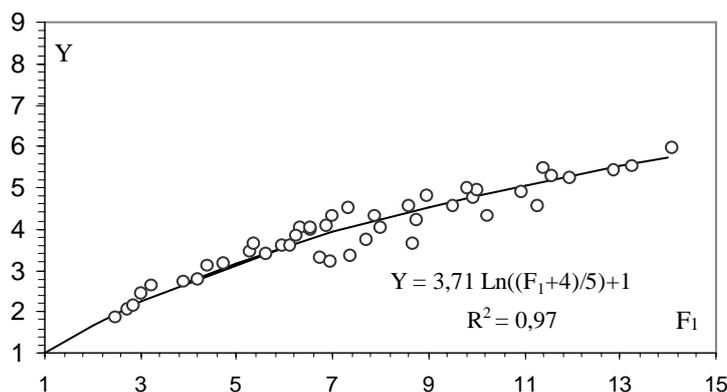


Figure 7.10 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour le ressaut contrôlé. (o) Points expérimentaux (—) Courbe d'ajustement.

L'ajustement des valeurs expérimentales, a montré que la loi de variation de Y en fonction de F_1 est de type logarithmique :

$$Y = 3,71 \operatorname{Ln}\left(\frac{F_1 + 4}{5}\right) + 1 \quad (7.3)$$

pour $2,45 < F_1 < 15$

"Ln" désigne le logarithme népérien.

Les points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la figure 7.10 sont présentés dans le tableau 7.2.

Tableau 7.2 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de Y en fonction de F_1 .

F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y
2,45	1,87	6,34	4,04	8,96	4,79
2,72	2,08	6,52	4,04	9,50	4,56
2,83	2,14	6,55	3,97	9,82	5,02
3,03	2,46	6,76	3,32	9,92	4,78
3,23	2,63	6,88	4,11	10,00	4,97
3,90	2,75	6,96	3,24	10,21	4,32
4,18	2,81	7,00	4,32	10,93	4,89
4,39	3,14	7,31	4,53	11,25	4,56
4,75	3,18	7,39	3,35	11,38	5,48
5,28	3,48	7,72	3,77	11,55	5,30
5,36	3,66	7,89	4,30	11,94	5,26
5,63	3,39	8,01	4,03	12,88	5,41
5,95	3,62	8,59	4,56	13,24	5,52
6,11	3,61	8,66	3,65	14,07	5,94
6,25	3,84	8,75	4,24		

Par ailleurs, La représentation graphique des points expérimentaux du rapport Y-1 en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive a abouti à une courbe unique, comme le montre la figure 7.11.

Celle-ci montre clairement que les points expérimentaux obtenus s'alignent suivant une droite passant par l'origine. Un ajustement des couples de valeurs (Y-1, s/h_1), par la méthode des moindres carrés linéaire, a permis d'aboutir à la relation (7.4) représentée sur la figure 7.11 :

$$Y = 1 + 1,23S \quad (7.4)$$

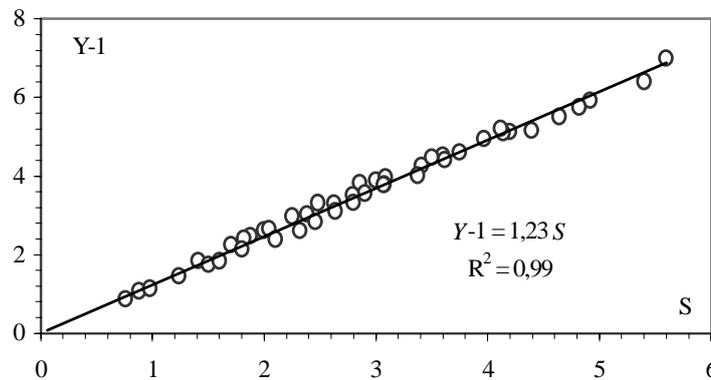


Figure 7.11 : Variation expérimentale du rapport Y-1 en fonction de la hauteur relative S de la marche positive. (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (7.4).

Les points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la figure 7.11 sont consignés dans le tableau 7.3.

Tableau 7.3 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de Y-1 en fonction de S.

Y-1	S	Y-1	S	Y-1	S
3,32	2,48	4,41	3,62	3,04	2,39
3,89	3,00	4,94	3,97	3,11	2,64
4,52	3,60	5,21	4,12	3,53	2,80
5,13	4,20	2,48	1,88	3,78	3,07
5,51	4,64	2,62	2,00	0,88	0,76
5,93	4,92	2,97	2,25	1,08	0,88
6,41	5,40	3,30	2,63	1,14	0,98
7,00	5,60	3,56	2,90	1,46	1,24
3,83	2,86	3,79	3,08	1,75	1,50
4,61	3,75	4,02	3,38	1,84	1,60
5,10	4,14	4,48	3,50	2,14	1,80
5,17	4,39	1,84	1,41	2,39	2,10
5,76	4,82	2,25	1,70	2,61	2,32
3,97	3,09	2,42	1,82	2,84	2,46
4,26	3,41	2,66	2,05	3,32	2,80

VII.3.1.2 Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de Froude

L'analyse des valeurs expérimentales a permis d'établir une relation unique, liant la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive et le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. Cette relation permettra essentiellement de déterminer la hauteur géométrique S de la marche positive ; les paramètres connus du problème sont le débit volume Q ainsi que la hauteur initiale h_1 du ressaut.

La Figure 7.12 montre en effet que les points 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, a donné la relation (7.5):

$$S = 3,016 \operatorname{Ln} \left(\frac{F_1 + 4}{5} \right) \quad (7.5)$$

"Ln" désigne le logarithme népérien.

La relation (7.5) peut être déduite également à partir des équations (7.3) et (7.4).

La relation ci-dessus indiquée ainsi que les points expérimentaux obtenus pour différentes valeurs de la hauteur initiale h_1 du ressaut sont représentés sur la figure 7.12.

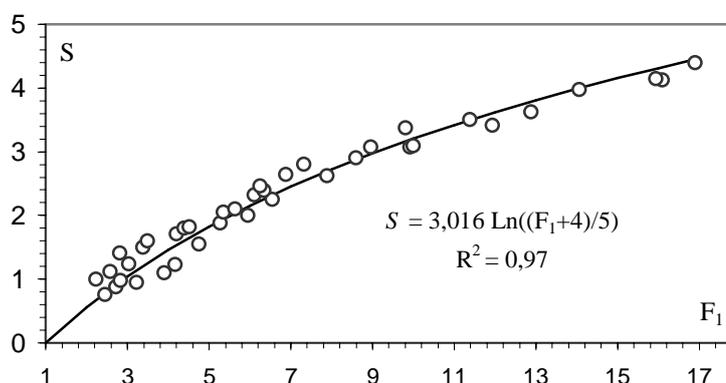


Figure 7.12 : Variation expérimentale de la hauteur relative S de la marche positive, en fonction du nombre de Froude F_1 . (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (7.5).

Les points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la figure 7.12 sont regroupés dans le tableau 7.4.

Tableau 7.4 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de S en fonction de F_1 .

F_1	$S=s/h_1$	F_1	$S=s/h_1$	F_1	$S=s/h_1$
2,23	1,00	4,39	1,80	7,89	2,63
2,45	0,76	4,52	1,82	8,59	2,90
2,58	1,11	4,75	1,55	8,96	3,08
2,72	0,88	5,28	1,88	9,82	3,38
2,82	1,41	5,36	2,05	9,92	3,07
2,83	0,98	5,63	2,10	10,00	3,09
3,03	1,24	5,95	2,00	11,38	3,50
3,23	0,95	6,11	2,32	11,94	3,41
3,38	1,50	6,25	2,46	12,88	3,62
3,49	1,60	6,34	2,39	14,07	3,97
3,90	1,10	6,55	2,25	15,94	4,14
4,18	1,23	6,88	2,64	16,09	4,12
4,20	1,70	7,31	2,80	16,91	4,39

VII.3.1.3 Relation générale régissant le contrôle du ressaut

Dans cette étape de notre étude, nous avons établi la relation générale régissant le contrôle du ressaut par la mise en place d'une marche positive. 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 7.13. Les points expérimentaux se situent 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.

L'analyse des mesures expérimentales a montré que les trois variables adimensionnelles F_1 , $S=s/h_1$ et x/h_1 intervenant au phénomène sont liées par la relation (7.6) :

$$S + F_1^{0,4} = 0,123 \left(\frac{x}{h_1} \right) + 0,561 \quad (7.6)$$

Cette relation ainsi que les points expérimentaux, sont représentés sur la Figure 7.13.

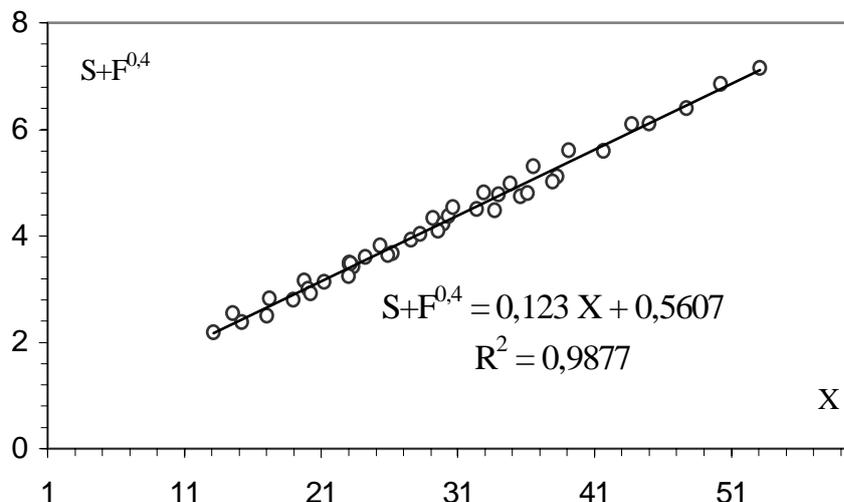


Figure 7.13 : Variation de $(S + F_1^{0,4})$ en fonction de la position relative $X=x/h_1$ de la marche positive. Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (7.6).

Les points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la figure 7.13 sont consignés dans le tableau 7.5.

Tableau 7.5 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $S+F_1^{0,4}$ en fonction de X .

$S+F_1^{0,4}$	$X=x/h_1$	$S+F_1^{0,4}$	$X=x/h_1$	$S+F_1^{0,4}$	$X=x/h_1$
2,19	13,12	3,82	25,30	4,98	34,84
2,55	14,53	3,65	25,86	4,73	35,62
2,37	15,22	3,67	26,21	4,80	36,14
2,50	17,04	4,12	26,56	5,31	36,54
2,82	17,20	3,92	27,57	5,86	37,56
2,80	18,96	4,04	28,23	5,01	37,93
3,16	19,74	4,33	29,16	5,11	38,29
3,00	20,05	4,09	29,56	5,61	39,14
2,92	20,25	4,23	29,93	6,41	41,12
3,13	21,22	4,37	30,30	5,60	41,65
3,77	22,72	4,54	30,60	6,10	43,75
3,25	23,00	5,01	31,16	7,03	44,40
3,47	23,03	4,50	32,41	6,11	45,00
3,50	23,04	4,82	32,90	6,40	47,74
3,48	23,16	4,48	33,73	7,62	47,84
3,42	23,33	4,78	34,00	6,85	50,24
3,61	24,22	5,60	34,16	7,16	53,09

VII.3.2 Ressaut de type A

VII.3.2.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure 7.14 représente la variation de (Y_A-1) en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, tel que $Y_A=(h_2+s)/h_1$ est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut de type A. La courbe en trait continu représente la relation $Y_A-1=f(F_1)$, qui est exprimée par la relation (7.7).

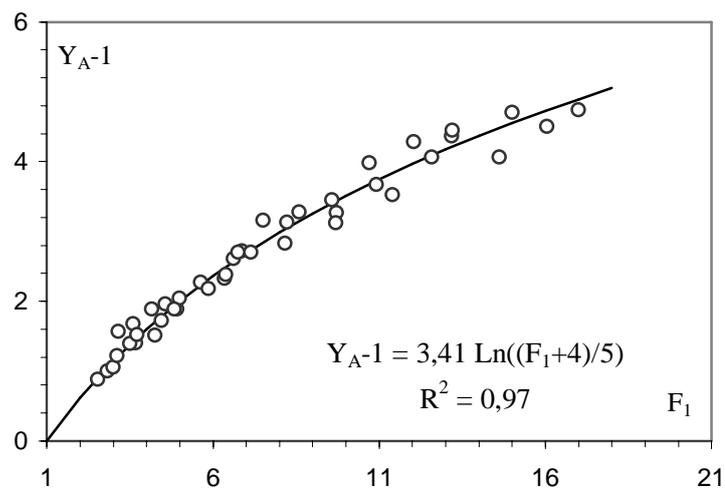


Figure 7.14 : Variation expérimentale de (Y_A-1) en fonction du nombre de Froude F_1 , pour le ressaut de type A. (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon l'équation (7.7).

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

$$Y_A - 1 = 3,41 \text{Ln} \left(\frac{F_1 + 4}{5} \right) \quad (7.7)$$

Les points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la figure 7.14 sont regroupés dans le tableau 7.6.

Tableau 7.6 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de (Y_A-1) en fonction de F_1 .

F_1	Y_A-1	F_1	Y_A-1	F_1	Y_A-1
2,53	0,88	4,91	1,89	9,57	3,45
2,82	1,00	5,00	2,04	9,70	3,12
3,01	1,05	5,63	2,27	9,72	3,26
3,11	1,22	5,86	2,18	10,70	3,98
3,16	1,57	6,35	2,32	10,91	3,67
3,50	1,40	6,39	2,38	11,41	3,52
3,60	1,68	6,62	2,61	12,04	4,28
3,67	1,41	6,75	2,70	12,59	4,06
3,72	1,52	6,87	2,72	13,19	4,37
4,15	1,88	7,14	2,70	13,20	4,45
4,26	1,51	7,51	3,15	14,61	4,06
4,46	1,72	8,17	2,82	15,01	4,70
4,57	1,96	8,22	3,13	16,06	4,50
4,84	1,88	8,60	3,28	17,00	4,74

VII.3.2.2 Hauteur relative de la marche en fonction du nombre de Froude

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

$$S_A = s/h_1 = 2,94 \text{Ln} \left(\frac{F_1 + 4}{5} \right) \quad (7.8)$$

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

Sur la Figure 7.15 sont représentées à la fois les mesures expérimentales de la hauteur relative S_A de la marche positive en fonction de F_1 et la courbe expérimentale en trait continu traduisant la variation de la hauteur relative S_A de la marche positive du ressaut nécessaire pour avoir un ressaut de type A.

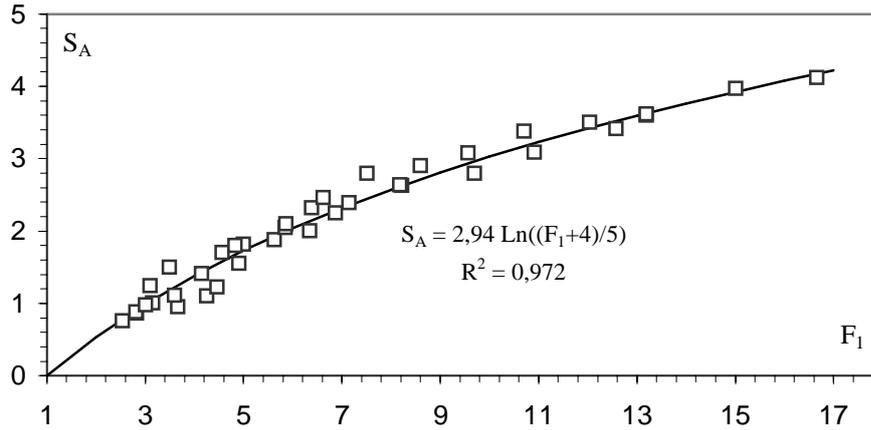


Figure 7.15 : Variation de la hauteur relative S_A de la marche positive en fonction du nombre de Froude F_1 . (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon l'équation (7.8).

Les points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la figure 7.15 sont présentés dans le tableau 7.7.

Tableau 7.7 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de S_A en fonction de F_1 .

F_1	$S_A=s/h_1$	F_1	$S_A=s/h_1$	F_1	$S_A=s/h_1$
2,53	0,76	4,84	1,80	8,22	2,63
2,82	0,88	4,91	1,55	8,60	2,90
2,83	0,86	5,00	1,82	9,57	3,08
3,01	0,98	5,63	1,88	9,70	2,80
3,11	1,24	5,86	2,05	10,70	3,38
3,16	1,00	5,86	2,10	10,91	3,09
3,50	1,50	6,35	2,00	12,04	3,50
3,60	1,11	6,39	2,32	12,59	3,41
3,67	0,95	6,62	2,46	13,19	3,60
4,15	1,41	6,87	2,25	13,20	3,62
4,26	1,10	7,14	2,39	15,01	3,97
4,46	1,23	7,51	2,80	16,66	4,12
4,57	1,70	8,17	2,64		

Comme pour le cas du ressaut contrôlé par marche positive, on a établi une relation unique reliant la hauteur relative S_A de la marche positive et le rapport des hauteurs conjuguées Y_A du ressaut de type A.

La représentation graphique de la relation $Y_{A-1} = f(S_A)$ a abouti à une courbe unique, comme l'indique la figure 7.16. Un ajustement linéaire a permis d'écrire que :

$$Y_A = 1 + 1,16 S_A \quad (7.9)$$

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

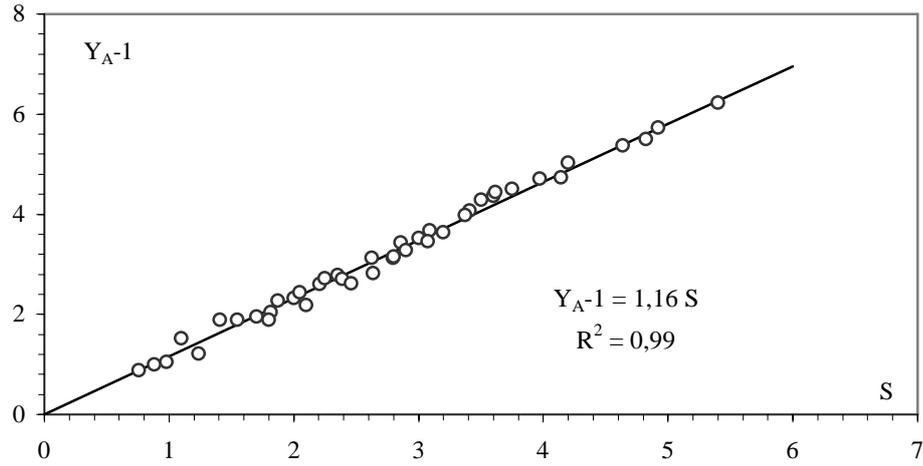


Figure 7.16 : Variation de (Y_A-1) en fonction de la hauteur relative S_A de la marche Positive. (o) Points expérimentaux. (—) Droite d'équation : $Y_A-1=1,16 S_A$.

La droite de la relation (7.9) peut également être retrouvée, en faisant le rapport des équations (7.7) et (7.8) :

$$\frac{(Y_A-1)}{S_A} = \frac{3,41}{2,94} \approx 1,16$$

d'où : $Y_A=1,16S_A+1$

Les points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la figure 7.16 sont regroupés dans le tableau 7.8.

Tableau 7.8 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de (Y_A-1) en fonction de S_A .

Y_A-1	$S_A=s/h_1$	Y_A-1	$S_A=s/h_1$	Y_A-1	$S_A=s/h_1$
0,88	0,76	2,60	2,21	3,67	3,09
1,00	0,88	2,61	2,46	3,98	3,38
1,05	0,98	2,70	2,39	4,06	3,41
1,22	1,24	2,72	2,25	4,28	3,50
1,51	1,10	2,78	2,35	4,37	3,60
1,88	1,80	2,82	2,64	4,45	3,62
1,88	1,41	3,12	2,80	4,50	3,75
1,89	1,55	3,13	2,63	4,70	3,97
1,96	1,70	3,15	2,80	4,74	4,14
2,04	1,82	3,28	2,90	5,03	4,20
2,18	2,10	3,43	2,86	5,38	4,64
2,27	1,88	3,45	3,08	5,50	4,82
2,32	2,00	3,52	3,00	5,72	4,92
2,43	2,05	3,64	3,20	6,23	5,40

VII.3.2.3 Position relative de la marche positive

Comme pour le cas du ressaut contrôlé par marche positive, nous avons établi une relation générale pour le ressaut de type A. Cette relation peut également s'écrire sous la forme $\phi(S_A, F_1, X_A)=0$, tels que $S_A=s/h_1$ et $X_A=x/h_1$. Pour le ressaut de type A, la position x

de la marche correspond à la longueur L_r du rouleau de surface. L'analyse des mesures expérimentales obtenues a montré que la meilleure représentation graphique adimensionnelle de la fonction ϕ est celle indiquée par la figure 7.17. Les points expérimentaux se situent sur une droite d'équation : $S_A + F_1^{0,4} = c X_A + d$. Les valeurs des constantes c et d ont été obtenues par un ajustement linéaire.

L'analyse des mesures expérimentales a montré que les trois variables adimensionnelles F_1 , S_A et X_A intervenant au phénomène sont liées par la relation (7.10) :

$$S_A + F_1^{0,4} = 0,14 X_A + 0,82 \quad (7.10)$$

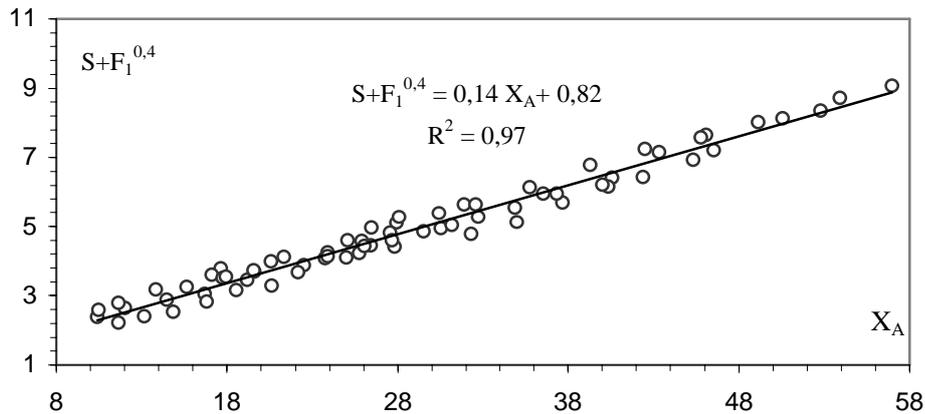


Figure 7.17 : Variation de $(S_A + F_1^{0,4})$ en fonction de la position relative $X_A = x/h_1$ de la marche positive (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (7.10).

Les points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la figure 7.17 sont consignés dans le tableau 7.9.

Tableau 7.9 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $(S + F_1^{0,4})$ en fonction de X_A .

$S + F_1^{0,4}$	$X_A = x/h_1$						
2,38	10,41	3,72	19,57	4,59	27,68	6,79	39,32
2,58	10,50	3,69	19,62	4,41	27,83	6,21	40,03
2,78	11,64	3,98	20,57	5,11	27,92	6,17	40,38
2,21	11,64	3,29	20,64	5,28	28,09	6,41	40,60
2,63	12,03	4,11	21,35	4,85	29,52	6,42	42,38
2,39	13,18	3,68	22,18	5,39	30,43	7,25	42,50
3,18	13,84	3,87	22,53	4,95	30,53	7,15	43,36
2,88	14,48	4,07	23,75	5,04	31,16	6,93	45,35
2,53	14,86	4,24	23,89	5,65	31,88	7,58	45,79
3,25	15,65	4,13	23,90	4,78	32,29	7,64	46,08
3,04	16,70	4,09	24,98	5,64	32,57	7,20	46,56
2,81	16,82	4,58	25,07	5,26	32,70	8,02	49,14
3,60	17,11	4,22	25,76	5,54	34,90	8,13	50,56
3,77	17,64	4,56	25,91	5,13	35,03	8,35	52,79
3,50	17,76	4,42	26,06	6,14	35,79	8,71	53,92
3,54	17,93	4,44	26,44	5,95	36,56	9,06	57,00
3,15	18,56	4,95	26,48	5,96	37,35		
3,44	19,18	4,80	27,57	5,69	37,71		

VII.3.2.4 Longueur relative du bassin

Une relation générale a été également établie entre la longueur relative λ du bassin, la hauteur relative S_A de la marche positive et le nombre de Froude F_1 . La longueur L étant la distance qui sépare le pied du ressaut de l'aval du rouleau où s'effectue la mesure de la profondeur conjuguée h_2 .

Sur la figure 7.18 sont représentées à la fois les mesures expérimentales et la courbe expérimentale en trait continu traduisant la variation de $(S_A + F_1^{0,4})$ en fonction de la longueur relative $\lambda = L/h_1$ du bassin, du ressaut type A.

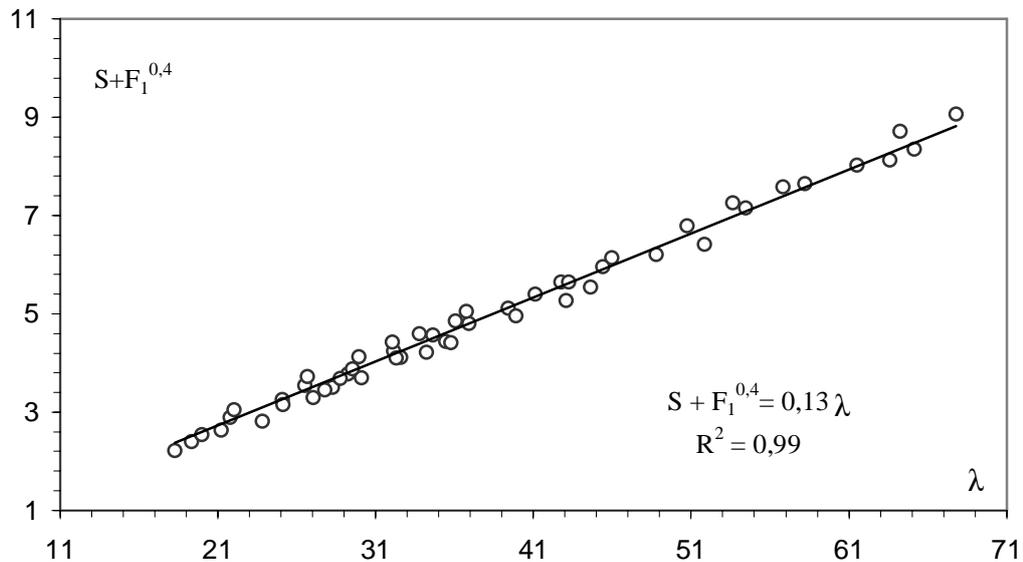


Figure 7.18 : Variation de $(S_A + F_1^{0,4})$ en fonction de la longueur relative $\lambda = L/h_1$ du bassin. (o) Points expérimentaux. (—) Courbe tracée selon la relation (7.11).

L'analyse statistique des mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés linéaires a montré que les trois variables adimensionnelles F_1 , S_A et λ intervenant au phénomène sont liées par la relation (7.11) :

$$S_A + F_1^{0,4} = 0,13 \lambda \quad (7.11)$$

Les points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la figure 7.18 sont consignés dans le tableau 7.10.

Tableau 7.10 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $(S+F_1^{0,4})$ en fonction de λ .

$S+F_1^{0,4}$	$\lambda=L/h_1$	$S+F_1^{0,4}$	$\lambda=L/h_1$	$S+F_1^{0,4}$	$\lambda=L/h_1$
3,77	29,28	7,58	56,82	5,96	45,40
4,22	34,24	8,02	61,54	6,21	48,80
4,44	35,48	8,35	65,14	3,54	26,55
5,11	39,40	3,25	25,09	3,72	26,70
5,65	42,76	3,50	28,26	2,21	18,28
6,41	51,84	3,69	30,12	2,39	19,36
7,15	54,48	4,11	32,62	2,53	20,02
7,64	58,24	4,56	34,65	2,81	23,82
8,13	63,60	2,63	21,23	3,15	25,16
8,71	64,24	2,88	21,80	3,29	27,08
9,06	67,80	3,04	22,05	3,68	28,78
4,24	32,18	3,44	27,78	4,13	29,94
4,80	36,93	3,87	29,55	4,42	32,08
5,39	41,14	4,09	32,33	4,59	33,78
5,64	43,25	4,41	35,80	4,85	36,06
6,14	46,00	4,95	39,90	5,04	36,78
6,79	50,75	5,26	43,08		
7,25	53,64	5,54	44,63		

VII.3.3 Étude comparative

Cette présente étape de notre étude expérimentale, consiste à faire une étude comparative entre le ressaut contrôlé par seuil mince, le ressaut contrôlé par seuil épais, le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut de type A forcé par marche positive.

VII.3.3.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure 7.19 montre la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les quatre configurations citées précédemment, représentées par des courbes de couleurs différentes.

La courbe en traitillé représente la variation du rapport Y^* théorique du ressaut classique triangulaire en fonction du nombre de Froude incident F_1 , issu de l'application de l'équation de quantité de mouvement, en vertu de l'équation 7.12 :

$$F_1^2 = \frac{2Y^{*2}(Y^{*2} + Y^* + 1)}{3(Y^* + 1)} \quad (7.12)$$

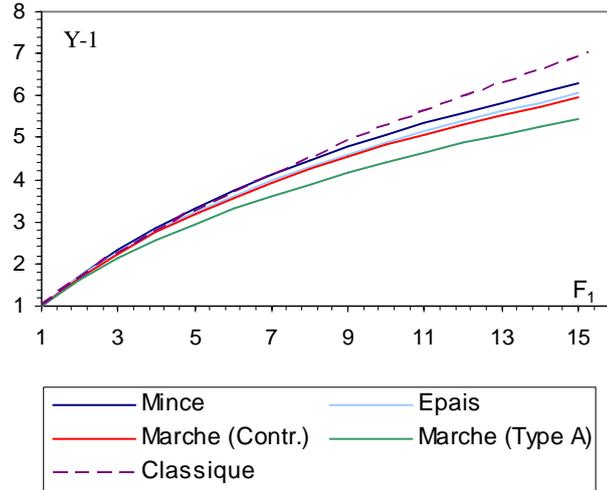


Figure 7.19 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.
 (—) Courbes tracées selon la relation (7.12)

La figure 7.19 montre que pour le ressaut contrôlé, l'influence de la marche positive sur le rapport des hauteurs conjuguées apparaît à partir des valeurs du nombre de Froude F_1 supérieures à 5,0 environ. Cette influence s'accroît avec l'augmentation de F_1 . Cependant les courbes des ressauts contrôlé par seuil épais et par marche positive sont quasi-confondues pour pratiquement toute la gamme des nombres de Froude. Par ailleurs, un décalage important est perceptible pour le ressaut de type A forcé par marche positive. En effet, pour un nombre de Froude pratique $F_1=9$, nous avons pu observer que l'écart relatif $\Delta Y/Y$ entre le ressaut contrôlé par marche positive et son homologue de type A est approximativement égal à 10 % . Par ailleurs, pour une large gamme des nombre de Froude F_1 ($2 \leq F_1 \leq 15$), un ajustement des valeurs expérimentales a montré que la variation de $Y=f(F_1)$ est de type logarithmique pour les quatre configurations étudiées, l'équation 7.13 le montre bien :

$$Y = a \operatorname{Ln} \left[\frac{F_1 + 4}{5} \right] + 1 \quad (7.13)$$

$a = 3,96$: ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

$a = 3,78$: ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse.

$a = 3,71$: ressaut contrôlé par marche positive.

$a = 3,41$: ressaut de type A forcé par marche positive.

La condition de criticité est ainsi satisfaite puisque $Y(F_1=1)=1$.

VII.3.3.2 Hauteur relative du seuil et de la marche

La figure 7.20 montre la variation de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les quatre configurations du ressaut.

Un décalage assez important est visible entre les courbes des ressauts contrôlés par seuil et leur homologues contrôlé et forcé par marche positive. En effet, pour le même nombre de Froude incident F_1 , la formation d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil nécessite une hauteur relative de seuil plus élevée que son homologue utilisant une marche positive. L'écart relative $\Delta S / S$ peut atteindre les 20 % pour un nombre de Froude $F_1=9$.

En outre, on remarque que les courbes des ressauts forcé de type A et contrôlé par marche positive sont quasi-confondues pour toute la gamme des nombres de Froude.

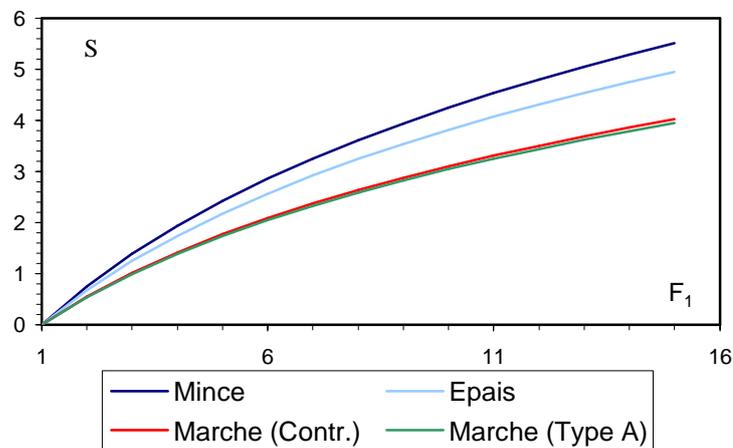


Figure 7.20 : Variation de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbes tracées selon la relation (7.14)

Par ailleurs, un ajustement des valeurs expérimentales a montré que la variation de $S=f(F_1)$ est de type logarithmique pour les quatre configurations étudiées, l'équation 7.14 le montre bien :

$$S = b \text{Ln} \left[\frac{F_1 + 4}{5} \right] \quad (7.14)$$

$b = 4,13$: ressaut contrôlé par seuil à paroi mince.

$b = 3,71$: ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse.

$b = 3,016$: ressaut contrôlé par marche positive .

$b = 2,94$: ressaut de type A forcé par marche positive.

VII.3.3.3 Longueur relative du bassin

La figure 7.21 montre la variation de la longueur relative $X = x/h_1$ du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les quatre configurations étudiées. Il ressort que l'effet réducteur de la marche positive, commence à se faire sentir à partir du nombre de Froude $F_1=9$. En effet, pour les nombres de Froude supérieurs à 9, le ressaut contrôlé et forcé par marche positive évolue dans un bassin plus court que son homologue contrôlé par seuil.

En outre, l'ajustement des valeurs expérimentales a montré que la relation $X=f(F_1)$ est de la même forme pour les quatre configurations étudiées. Celle-ci s'écrit comme suit :

$$S + F_1^{0,4} = aX + b \quad (7.15)$$

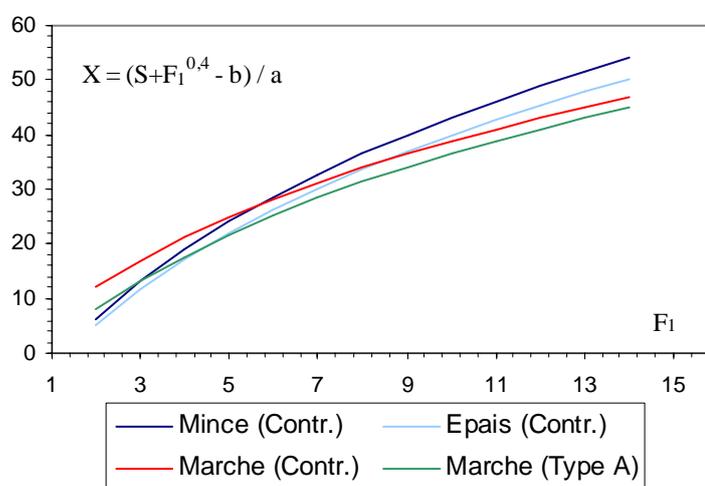


Figure 7.21 : Variation de la longueur relative $X = x/h_1$ du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbes tracées selon la relation (7.15)

Tableau 7.11 : Valeurs des constantes a et b de l'équation (7.15) pour les quatre types de ressaut

	Ressaut Contrôlé			Ressaut de type A
	Seuil mince	Seuil épais	Marche positive	Forcé par marche positive
a	0,127	0,125	0,123	0,14
b	1,278	1,341	0,561	0,82

VII.3.3.4 Rendement du ressaut hydraulique

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

$$\eta = \Delta H/H_1 \quad \text{Avec : } \Delta H = H_1 - H_2 \quad (7.16)$$

H_1 et H_2 désignent respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut. Celles-ci sont définies par les relations (7.17) et (7.18):

$$H_1 = h_1 + V_1^2/(2g) \quad (7.17)$$

$$H_2 = h_2 + V_2^2/(2g) \quad (7.18)$$

En tenant compte de l'équation de continuité ($Q=VA$), ces deux dernières relations s'écrivent :

$$H_1 = h_1 + Q^2/(2gA_1^2)$$

$$H_2 = h_2 + Q^2/(2g A_2^2)$$

$$\text{Avec } A_1 = mh_1^2 \quad \text{et} \quad A_2 = mh_2^2$$

Le nombre de Froude de l'écoulement incident dans un canal à section droite triangulaire est défini par la relation (7.19) :

$$F_1^2 = \frac{2Q^2}{gm^2 h_1^5} \quad (7.19)$$

En tenant compte des relations précédentes, le rendement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique, s'écrit comme suit :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}} \quad (7.20)$$

$Y = h_2/h_1$ étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

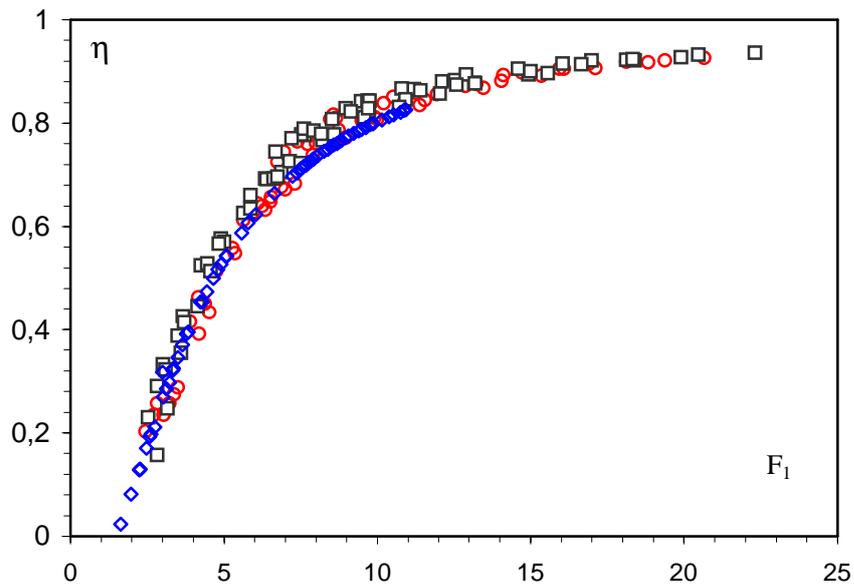


Figure 7.22 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 ,
 (\diamond) Ressaut contrôlé par seuil épais. (o) Ressaut contrôlé par marche positive.
 () Ressaut de type A forcé par marche positive

La figure 7.22 montre que pour la gamme des nombres de Froude incident $5 < F_1 < 11$, les points de mesure du ressaut de type A forcé par marche positive sont au-dessus de ceux contrôlé par marche positive et contrôlé par seuil épais. Cependant pour des nombres de Froude $F_1 > 11$, tous les points de mesures se rejoignent pour former un seul nuage de points,

montrant ainsi que quelque soit la forme du seuil, l'effet de dissipation de la charge hydraulique est le même pour les trois configurations du ressaut.

Celà dit, le décalage n'étant pas significatif, on peut dire que le rendement est indépendant de S.

Les points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la figure 7.22 sont consignés dans les tableaux 7.12, 7.13 et 7.14.

Tableau 7.12 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de F_1 en fonction de η , pour le cas du ressaut hydraulique contrôlé par marche positive .

F_1	η (%)	F_1	η (%)	F_1	η (%)
7,63	78,77	19,38	92,11	11,38	83,49
8,58	81,66	6,96	74,45	4,20	39,14
8,66	80,98	7,39	76,43	4,52	43,37
10,21	83,77	7,72	75,87	5,36	54,79
10,93	83,98	8,01	76,01	6,34	63,15
11,55	84,44	8,75	78,66	6,88	67,68
13,24	87,57	9,50	80,44	7,31	68,28
13,48	86,73	10,00	80,75	9,92	81,15
15,35	89,08	11,94	85,50	2,45	20,28
17,11	90,62	12,88	87,15	2,72	23,44
18,84	91,71	14,07	88,14	2,83	25,63
20,66	92,55	16,09	90,48	3,03	23,48
6,76	72,49	3,23	25,66	3,38	27,45
8,46	80,75	3,90	41,46	3,49	28,78
9,69	84,31	4,18	46,35	4,39	45,10
10,52	85,00	4,75	51,33	5,63	61,29
11,25	85,80	5,28	55,75	6,11	64,49
12,54	87,85	5,95	62,67	6,25	63,91
14,13	89,32	6,55	65,71	6,52	64,86
14,73	89,74	7,89	73,77	7,00	67,11
15,94	90,48	8,59	76,35		
16,91	91,42	8,96	77,11		
18,13	91,83	9,82	79,84		

Tableau 7.13 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de F_1 en fonction de η , pour le cas du ressaut hydraulique de type A .

F_1	η (%)	F_1	η (%)	F_1	η (%)
2,53	22,98	6,75	69,61	11,18	86,56
2,82	28,99	6,87	70,45	11,41	86,28
2,83	15,72	7,14	72,59	12,04	85,70
3,01	33,20	7,20	77,05	12,11	88,02
3,11	32,24	7,51	72,18	12,55	88,31
3,16	24,69	7,52	77,73	12,59	87,38
3,50	38,73	7,60	78,85	12,92	89,38
3,60	35,40	7,63	77,67	13,19	87,82
3,67	42,59	7,92	78,46	13,20	87,67
3,72	41,39	8,17	77,96	14,61	90,54
4,15	44,53	8,22	76,63	14,95	89,32
4,26	52,48	8,54	80,70	15,01	89,95
4,46	52,90	8,60	77,75	15,58	89,60
4,57	51,39	8,97	82,87	16,06	91,49
4,84	56,69	9,14	82,25	16,66	91,31
4,91	57,68	9,47	84,14	17,00	92,07
5,00	57,09	9,57	81,13	18,13	92,27
5,63	62,59	9,68	84,31	18,33	92,29
5,86	63,51	9,70	82,86	18,40	92,10
5,86	65,99	9,72	82,38	19,90	92,74
6,35	69,30	9,74	84,34	20,47	93,22
6,39	69,12	10,70	83,04	22,32	93,58
6,62	69,29	10,79	86,61		
6,68	74,44	10,91	84,63		

Tableau 7.14 : Mesures expérimentales ayant servi au traçage du graphique de F_1 en fonction de η , pour le cas du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince .

F_1	η	F_1	η	F_1	η
1,64	10,54	4,44	62,12	8,38	82,67
1,96	19,18	4,65	64,11	8,47	82,91
2,24	26,32	4,79	65,36	8,58	83,20
2,26	26,77	4,90	66,25	8,67	83,41
2,27	26,99	5,08	67,64	8,75	83,62
2,47	31,79	5,09	67,70	8,82	83,79
2,58	34,28	5,57	71,03	8,95	84,09
2,62	35,12	5,78	72,35	9,05	84,32
2,75	37,65	6,03	73,71	9,23	84,72
2,99	43,08	6,64	76,66	9,38	85,03
3,02	43,04	7,23	79,04	9,47	85,21
3,12	44,79	7,37	79,55	9,62	85,51
3,22	46,42	7,50	80,01	9,77	85,82
3,34	48,43	7,58	80,28	9,85	85,96
3,35	48,61	7,66	80,53	10,14	86,48
3,49	50,71	7,75	80,83	10,38	86,89
3,64	52,87	7,83	81,09	10,52	87,13
3,78	54,75	7,89	81,28	10,75	87,48
3,83	55,33	7,93	81,38	10,86	87,66
4,24	60,16	8,05	81,75	10,92	87,75
4,29	60,57	8,26	82,34		

VII.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'analyse expérimentale des deux types de ressaut étudiés. Nous avons abordé dans ce chapitre en premier lieu, la description des essais, nous avons entamé par la suite la procédure suivie lors des expérimentations. Cette partie nous a permis enfin d'étudier expérimentalement les caractéristiques des deux types de ressaut hydraulique cités précédemment. L'étude a montrée que la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type logarithmique. Par ailleurs, une étude comparative avec le ressaut contrôlé par seuil mince et épais a montré que l'influence de la marche positive sur le rapport des hauteurs conjuguées apparaît à partir des valeurs du nombre de Froude F_1 supérieures à 5,0 environ. Cette influence s'accroît avec l'augmentation de F_1 . Cependant les courbes des ressauts contrôlé par seuil épais et par marche positive sont quasi-confondues pour pratiquement toute la gamme des nombres de Froude. Par ailleurs, un décalage important est perceptible pour le ressaut de type A forcé par marche positive. En outre, pour un nombre de Froude $F_1=9$, l'écart relatif $\Delta Y/Y$ entre le ressaut contrôlé par marche positive et son homologue de type A est approximativement égal à 10 % .

L'étude a entamé en second lieu, la variation de la hauteur relative du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les quatre configurations de ressaut, à savoir : le ressaut contrôlé par seuil mince, le ressaut contrôlé par seuil épais, le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut de type A forcé par marche positive. Un décalage assez important est visible entre les courbes des ressauts contrôlés par seuil et leur homologues contrôlé et forcé par marche positive. En effet, l'étude a montré que pour le même nombre de Froude incident F_1 , la formation d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil nécessite une hauteur relative de seuil plus élevée que son homologue utilisant une marche positive. L'écart relative $\Delta S/S$ peut atteindre les 20 % pour un nombre de Froude $F_1=9$. En outre, les courbes des ressauts forcé de type A et contrôlé par marche positive sont quasi-confondues pour toute la gamme des nombres de Froude. Par ailleurs, un ajustement des valeurs expérimentales a montré que la variation de la hauteur relative S du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude F_1 est de type logarithmique pour les quatre configurations étudiées.

L'étude expérimentale a été consacré par la suite à la variation de la longueur relative $X = x/h_1$ du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les quatre configurations étudiées. Il ressort que pour les nombres de Froude supérieurs à 9, le ressaut contrôlé et le ressaut de type A forcé par marche positive évolue dans un bassin plus court que sont

homologue contrôlé par seuil. Par ailleurs, l'ajustement des valeurs expérimentales, par la méthode des moindres carrés non linéaire, a montré qu'une relation puissance liant les caractéristiques F_1 , X et S est possible pour représenter les quatre configurations de ressaut étudiées.

L'étude a évalué enfin, la variation du rendement η en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, pour trois types de ressaut hydraulique : le ressaut contrôlé par seuil épais, le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut de type A forcé par marche positive. L'analyse a montré que pour une gamme pratique des nombres de Froude incidents, les points de mesure du ressaut de type A forcé par marche positive se présentent au-dessus de ceux contrôlé par marche positive et par seuil épais, l'effet de dissipation de la charge hydraulique est le même pour les trois configurations de ressaut.

Cependant, le décalage n'étant pas significatif, on peut dire que le rendement est indépendant de S .