

#### V.4.2.2.Limnimètre

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à l'ouverture due à la section de sortie du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été évaluées par un Limnimètre (photo 5.5).

L'instrument est formé d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnimétrique) dont le rôle est d'effleurer la surface de l'eau.

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



Photo 5.5 : Limnimètre



Photo 5.6 : Une série de tamis placés sur un vibreur.



Photo 5.7: Palmer numérique

#### V.4.2.3.Tamiseuse

Afin d'obtenir les cinq rugosités absolues : 3,55 mm ; 4,30 mm ; 5,63 mm ; 7,14 mm et 9,11mm, nous avons procédé au tamisage du sable de concassage au moyen d'une tamiseuse (photo 5.6).

#### V.4.2.4.Palmer

Pour mesurer la hauteur des aspérités des particules de sable près-tamisées, étalées et collées, nous avons utilisé un Palmer à affichage digital (photo 5.7)

### V.4.3. Description des essais

#### V.4.3.1. Procédure expérimentale des essais

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut contrôlé par seuil à paroi mince dans un canal profilé en "U", à fond demi-circulaire rugueux. (Photo 5.10).

L'expérimentation a été menée sous quatre hauteurs initiales ( $h_1$  (cm) = 2,3 ; 3,40 ; 5,20 ; 6,10). Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue ( $2 < F_1 < 20$ ).

Des seuils de différentes hauteurs 's' ont été testés (Photo 5.8), afin d'observer leur influence sur le contrôle du ressaut ; treize seuils ont ainsi été confectionnés, dont la hauteur s varie entre 3,2 cm et 13,5 cm.

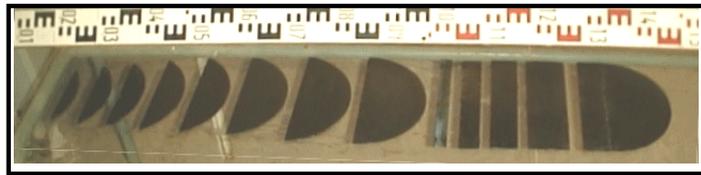


Photo 5.8 : Série de seuils minces ayant servi au contrôle du ressaut.

Pour une hauteur  $s$  et une position  $x$  du seuil et pour une hauteur  $h_1$  de l'écoulement incident, l'augmentation du débit volume  $Q$ , provoque l'apparition d'un ressaut. Le couple de valeur ( $Q, h_1$ ) permet en outre le calcul du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. L'accroissement de  $F_1$  entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval et l'augmentation de sa longueur de ressaut  $L_j$ . La distance  $\Delta x$  sur laquelle le ressaut s'étend augmente également et pour ramener celui-ci dans sa position initiale, c'est à dire à environ 5 cm de la sortie du convergent, le seuil de hauteur  $s$  doit être surélevé. Ainsi à chaque valeur du nombre de Froude  $F_1$  correspond une valeur de la longueur  $L_j$  du ressaut et une valeur de la hauteur  $s$  du seuil.

Un échantillon constitué d'une quarantaine de points de mesures expérimentales, pour chaque caractéristique, a permis ainsi d'aboutir à des résultats significatifs. Ces paramètres sont : le débit  $Q$ , la hauteur initiale  $h_1$ , la hauteur finale  $h_2$ , la hauteur  $s$  du seuil, la longueur  $L_r$  du rouleau de surface et la longueur  $L_j$  du ressaut, compté à partir du début du ressaut.

Ceux-ci permettent de composer les produits adimensionnels suivants :

- le débit relatif  $q$  ou le nombre de Froude incident  $F_1$ ,

$$F_1 = \frac{Q^2 D \sin \alpha}{\sqrt{g \left[ \frac{D^2}{4} (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) \right]^3}}$$

$$F_1 = \frac{8q\sqrt{\sin \alpha}}{(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)^{3/2}}$$

$$\alpha(rd) = \arccos(1 - 2y_1)$$

$$q = \frac{Q}{\sqrt{gD^5}}$$

- la hauteur relative amont  $y_1 = h_1/D$ ,
- la hauteur relative aval  $y_2 = h_2/D$ ,
- le rapport  $y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées du ressaut.
- la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil,
- la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut,
- la longueur relative  $L_j/h_2$  du ressaut.
- la rugosité relative  $\varepsilon/D$  du fond du canal.



**Photo 5.9** : Ressaut hydraulique évoluant dans un canal profilé en "U" à fond rugueux.  
a) Vue à l'amont du ressaut. b) Vue à l'aval du ressaut

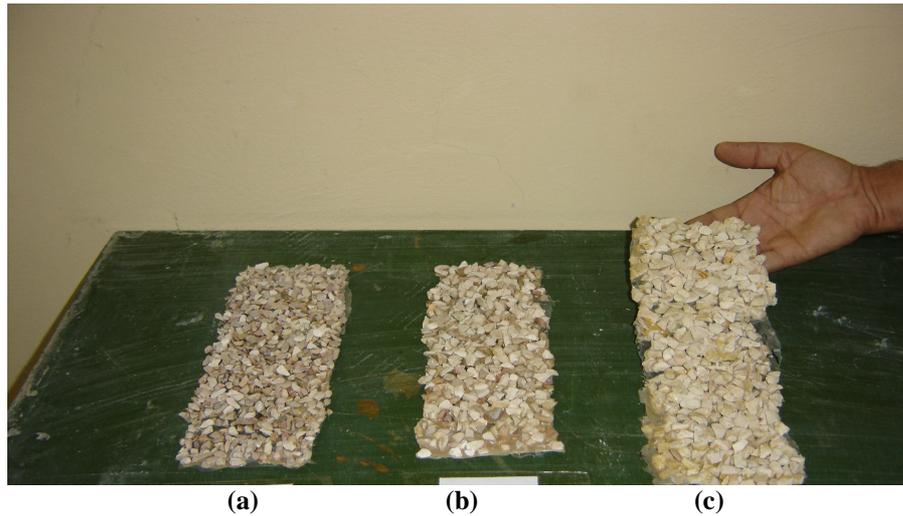
#### V.4.3.2. Mode de préparation de la rugosité utilisée

Afin d'obtenir un fond demi-circulaire rugueux, avec une répartition uniforme de la rugosité, nous avons procédé selon les étapes suivantes :

- Le tamisage du sable ou gravier de granulométrie différente est effectué par le moyen d'un appareil électrique composé par plusieurs tamis de différents diamètres normalisés variant entre 3 et 12,5 mm (photo 5.11), avec des temps de tamisage bien fixés en relation avec la gamme de gravier à tamisé (moins de 5 minutes).
- Après l'obtention de la gamme de gravier voulue, ce dernier est lavé puis séché.
- La gamme choisie, varie entre 3 et 12,5 mm selon le refus du tamis normalisé. Les particules obtenues sont ensuite uniformément réparties sur une toile en plastique, puis collées par le moyen d'une colle forte (Becta 10000).
- A la fin de la préparation de la toile rugueuse, nous évaluons la valeur de la rugosité équivalente par un appareil de mesure dit : "PALMER NUMERIQUE ", de précision 1/1000.
- Enfin, les rugosités équivalentes obtenues sont :  $\varepsilon = 3,55\text{mm}$  ;  $\varepsilon = 4,3\text{mm}$  ;  $\varepsilon = 5,63\text{mm}$  ;  $\varepsilon = 7,14\text{mm}$  et  $\varepsilon = 9,11\text{mm}$ .



**Photo 2.10** : Echantillon de grains de gravier de rugosité absolue  $\varepsilon=4,30\text{ mm}$ .



**Photo 5.11** : Echantillons de grains de gravier de rugosité absolue :  
a)  $\varepsilon = 5,63$  mm ; b)  $\varepsilon = 7,14$  mm ; c)  $\varepsilon = 9,11$  mm.

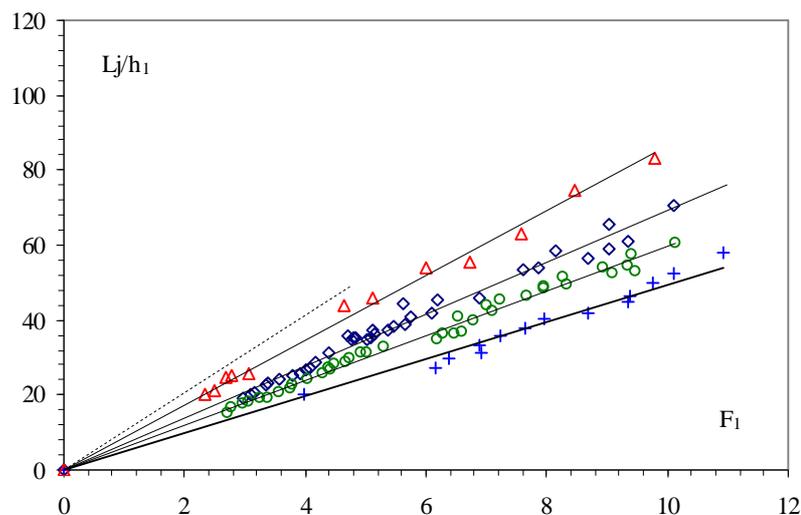
#### V.4.4. Résultats expérimentaux

##### V.4.4.1. Longueur relative de ressaut $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$

La Figure (5.10) montre la représentation graphique de la variation de  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude pour quatre valeurs de rugosités absolues  $\varepsilon = 4,30$  mm;  $\varepsilon = 5,63$  mm;  $\varepsilon = 7,14$  mm et  $\varepsilon = 9,11$  mm.

On remarque aussi quatre nuages de points, où chacun dépend d'une rugosité bien déterminée. Par ailleurs, l'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut à fond rugueux, montre qu'à chaque valeur de rugosité " $\varepsilon$ " correspond une courbe de type linéaire de la

forme  $\frac{L_j}{h_1} = a_1(F_1)$ .



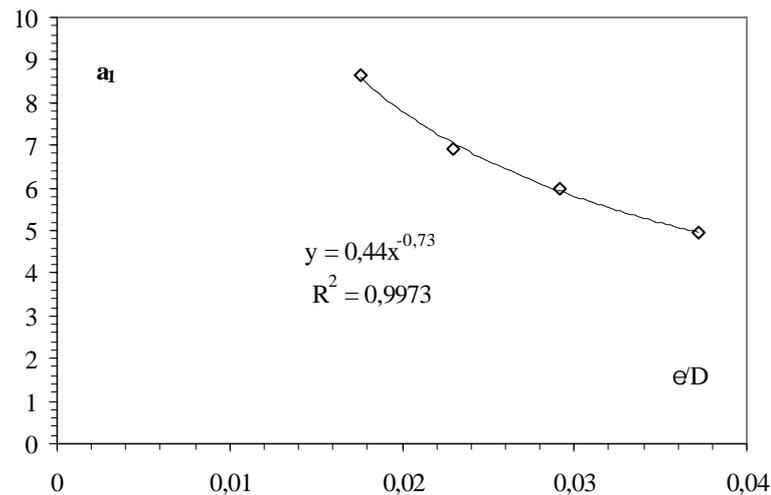
**Figure 5.10** : Ressaut contrôlé dans un canal en U à fond rugueux. Variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude, pour quatre rugosités différentes " $\varepsilon$ ": ( $\Delta$ ) 4,30mm ; ( $\circ$ ) 5,63mm ; ( $\square$ ) 7,14mm et ( $\times$ ) 9,11mm. (---) courbe du ressaut contrôlé lisse selon Debabeche (2003). (—) Courbes d'ajustements.

L'analyse de ces courbes montre que la longueur relative  $L_j/h_1$  augmente au fur et à mesure que le nombre de Froude augmente et ceci pour toutes les rugosités. En outre, la rugosité  $\varepsilon$  augmente avec la diminution du rapport de la longueur relative  $L_j/h_1$ , ceci est dû à la rugosité du fond du canal, qui provoque une dissipation d'énergie.

Le tableau 5.5 regroupe les valeurs du coefficient  $a_1$ .

**Tableau 5.5:** coefficients  $a_1$  des courbes d'ajustements.

$\varepsilon/D$	Coefficients $a_1$	$R^2$
0,0176	8,66	0,99
0,0229	6,93	0,98
0,0291	5,98	0,99
0,0371	4,96	0,98



**Figure 5.11 :** Variation du coefficient "  $a_1$  " en fonction de la rugosité relative  $\varepsilon/D$

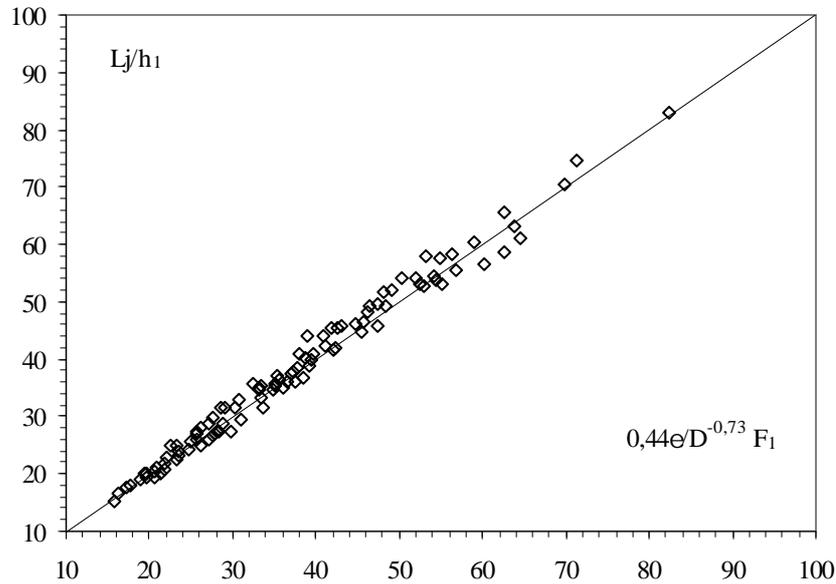
L'ajustement des couples de valeurs ( $a_1$ ,  $\varepsilon/D$ ) du tableau 5.5 a permis d'aboutir avec une bonne corrélation à la relation puissance suivante :  $a_1 = 0,44\varepsilon/D^{-0,73}$ . Cette équation est présentée à la figure 5.11.

L'équation liant la longueur relative amont  $\frac{L_j}{h_1}$ , le nombre de Froude  $F_1$  et la rugosité relative  $\varepsilon/D$  s'écrit alors :

$$\frac{L_j}{h_1} = 0,44 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{-0,73} F_1 \quad (5.11)$$

pour  $0,0175 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$

La Figure (5.12) montre aussi que la relation  $Lj/h_1 = f(\varepsilon/D, F_1)$  ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice.



**Figure (5.12) :** Variation de la longueur relative  $Lj/h_1$  en fonction de  $f(\varepsilon/D, F_1)$ .

(□) Les points expérimentaux du ressaut contrôlé à fond rugueux. (—) Première bissectrice.

Par ailleurs, les écarts relatifs entre les valeurs des mesures expérimentales  $Lj/h_1$  avec les mesures issues de l'équation globale d'ajustement (5.11) sont évalués et montrés au tableau 5.5, dans but de justifier la fiabilité de l'équation empirique. Le tableau 5.5, montre nettement que les écarts relatifs sont dans la plus part inférieur à 5%.

**Tableau 5.5** : Ecart relatifs entre  $L_j/h_1$  expérimentale et  $L_j/h_1$  d'ajustement

$L_j/h_1$ exp.	$L_j/h_1$ relation.	$\Delta L_j/L_j$ (%)	$L_j/h_1$ exp.	$L_j/h_1$ relation.	$\Delta L_j/L_j$ (%)
45,87	43,13	5,97	35,50	33,47	5,71
54,13	50,38	6,93	35,38	35,08	0,86
55,65	56,72	-1,91	37,47	37,08	1,04
63,04	63,76	-1,13	37,21	35,28	5,18
74,78	71,30	4,66	38,97	39,09	-0,30
83,04	82,35	0,83	40,88	39,69	2,92
25,00	23,36	6,55	41,68	42,09	-1,00
20,25	19,60	3,18	45,41	42,69	5,98
21,23	20,96	1,27	45,88	47,50	-3,54
25,90	25,68	0,86	56,50	60,13	-6,43
27,05	27,74	-2,56	58,76	62,54	-6,42
27,38	28,40	-3,72	61,15	64,54	-5,55
53,26	52,52	1,40	20,19	21,31	-5,56
58,26	56,42	3,16	20,71	21,75	-5,01
65,43	62,50	4,49	22,50	23,23	-3,24
70,43	69,88	0,79	23,08	23,40	-1,41
35,15	33,27	5,33	24,29	24,62	-1,37

**Tableau 5.5** (suite) : Ecart relatifs entre  $L_j/h_1$  expérimentale et  $L_j/h_1$  d'ajustement

$L_j/h_1$ exp.	$L_j/h_1$ relation	$\Delta L_j/L_j$ (%)	$L_j/h_1$ exp.	$L_j/h_1$ relation	$\Delta L_j/L_j$ (%)
25,00	26,10	-4,40	48,24	46,18	4,27
25,87	27,06	-4,61	49,41	48,37	2,12
27,42	28,19	-2,79	54,12	51,91	4,09
28,92	28,80	0,44	54,41	54,26	0,27
31,44	30,36	3,43	57,65	54,77	4,99
34,77	33,06	4,92	60,29	58,98	2,17
34,75	34,80	-0,14	15,29	15,87	-3,81
36,38	35,67	1,97	16,75	16,23	3,10
38,37	37,67	1,81	17,52	17,24	1,62
26,80	27,71	-3,38	17,98	17,81	0,95
36,09	37,58	-4,15	19,08	18,96	0,62
40,78	37,95	6,95	19,29	19,68	-2,02
42,17	41,23	2,23	20,58	20,68	-0,51
45,43	41,96	7,64	21,73	21,83	-0,46
49,13	46,34	5,67	22,69	22,05	2,84
51,65	48,17	6,75	23,96	23,56	1,70
52,61	52,91	-0,57	25,58	24,92	2,57

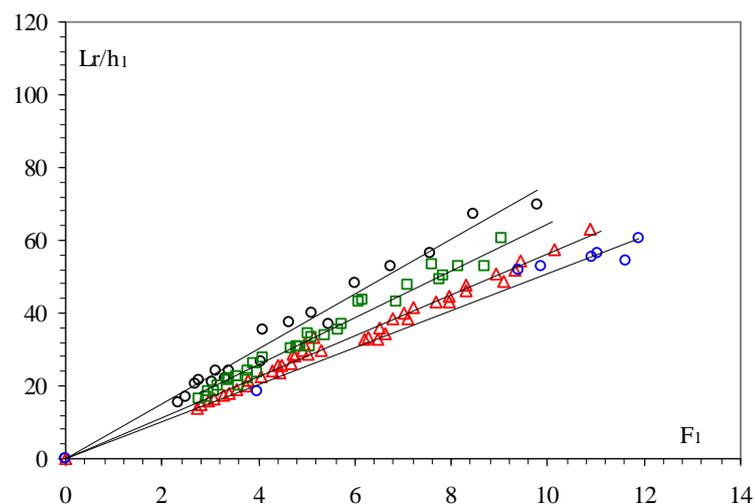
**Tableau 5.5** (suite et fin) : Ecart relatif entre  $L_j/h_1$  expérimentale et  $L_j/h_1$  d'ajustement

$L_j/h_1$ exp.	$L_j/h_1$ relation	$\Delta L_j/L_j$ (%)	$L_j/h_1$ exp.	$L_j/h_1$ relation	$\Delta L_j/L_j$ (%)
53,04	55,10	-3,88	29,50	31,03	-5,20
26,88	25,78	4,09	31,47	33,57	-6,68
28,24	26,12	7,49	33,41	33,43	-0,06
28,88	27,13	6,06	35,88	35,12	2,11
31,47	29,15	7,36	37,94	37,24	1,85
32,94	30,84	6,38	40,29	38,79	3,73
35,00	36,06	-3,04	42,06	42,32	-0,62
36,18	36,57	-1,09	44,71	45,42	-1,60
36,76	38,42	-4,51	46,32	45,70	1,34
39,76	39,43	0,83	49,71	47,40	4,64
44,12	40,78	7,56	52,21	49,09	5,97
46,18	44,66	3,29	20,00	19,41	2,94

#### V.4.4.2. Longueur relative de rouleau $L_r/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$

La Figure (5.13) présente la variation de la longueur du rouleau de surface  $L_r/h_1$  en fonction du nombre de Froude incident pour les quatre valeurs de rugosités absolues testées :  $\varepsilon = 4,30$  mm ;  $\varepsilon = 5,63$  ;  $\varepsilon = 7,14$  mm et  $\varepsilon = 9,11$  mm. L'analyse des points de mesures expérimentales, montre que chaque valeur de rugosité " $\varepsilon$ " correspond une courbe de type

linéaire de la forme :  $\frac{L_r}{h_1} = a_2(F_1)$ .



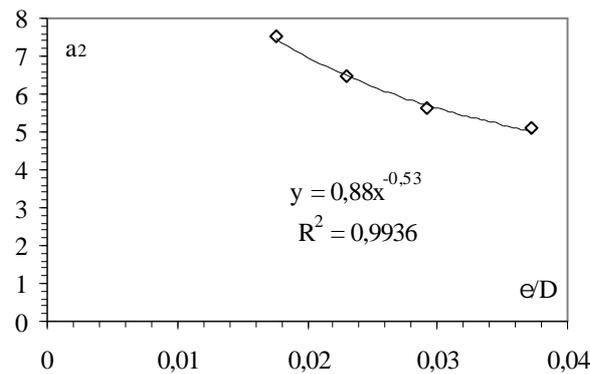
**Figure 5.13** : Variation de la longueur relative du rouleau de surface  $L_r/h_1$  en fonction de nombre Froude, pour quatre rugosités différentes " $\varepsilon$ ": (o) 4,30mm ; (□) 5,63mm ; (△) 7,14mm et (○) 9,11mm.

(—) Courbes d'ajustements.

Pour chaque allure de nuage de points on remarque que la longueur relative du rouleau de surface  $Lr/h_1$  augmente au fur et à mesure que le nombre de Froude augmente et ceci pour toutes les rugosités testées. Cependant, la rugosité augmente avec la diminution de la longueur relative. Le tableau 5.6 regroupe les valeurs du coefficient  $a_2$ .

**Tableau 5.6:** Coefficients  $a_2$  des courbes d'ajustements.

$\varepsilon/D$	Coefficients $a_2$	$R^2$
0,0176	7,52	0,98
0,0229	6,47	0,98
0,0291	5,61	0,98
0,0371	5,09	0,98



**Figure 5.14 :** Variation du coefficient "  $a_2$ " en fonction de la rugosité relative  $\varepsilon/D$

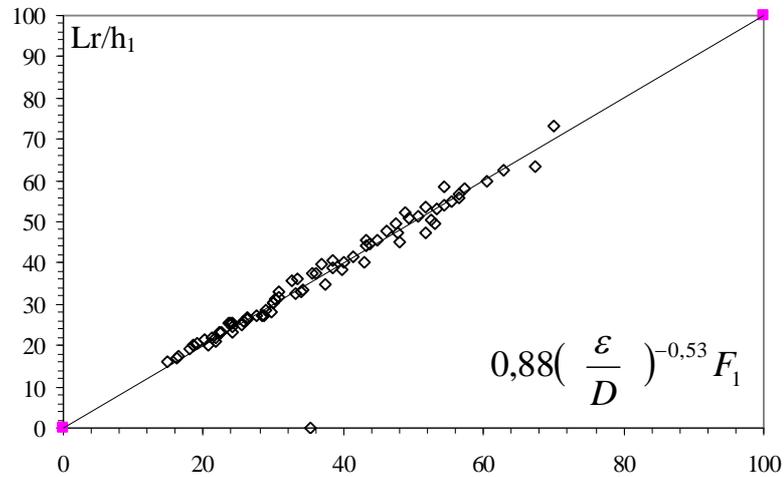
L'ajustement des couples de valeurs ( $a_2, \varepsilon/D$ ) du tableau 5.6 par une relation de type puissance est :  $a_2 = 0,88 \varepsilon/D^{-0,53}$ . Cette relation est illustrée à la Figure (5.14).

La relation définitive représentant la longueur du rouleau de surface en fonction de la rugosité relative et le nombre de Froude incident est la suivante :

$$\frac{Lr}{h_1} = 0,88 \frac{\varepsilon}{D}^{-0,53} F_1 \quad (5.12)$$

pour  $0,0175 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$

La figure (5.15) présente clairement la relation  $L_r/h_1 = f(\varepsilon/D, F_1)$  qui ajuste les points de mesures expérimentales avec une très bonne corrélation. Ces derniers suivent parfaitement la première bissectrice.



**Figure 5.15 :** Variation de la longueur relative  $L_r/h_1$  du rouleau de surface en fonction de  $f(\varepsilon/D, F_1)$ .

(□) Points expérimentaux du ressaut contrôlé à fond rugueux. (—) Première bissectrice.

En effet, les écarts relatifs entre les mesures expérimentales  $L_r/h_1$  avec celles issues de la relation générale d'ajustement (5.13) sont estimés et indiqués au tableau 5.7, dans le but de montrer la fiabilité de cette dernière. Le tableau 5.7, montre nettement que les écarts relatifs sont en majorité inférieur à 5%.

**Tableau 5.7 :** Ecart relatifs entre  $L_r/h_1$  expérimentale et  $L_r/h_1$  relation d'ajustement

$L_r/h_1$ exp.	$L_r/h_1$ relation	$\Delta L_r/L_r$ (%)	$L_r/h_1$ exp.	$L_r/h_1$ relation	$\Delta L_r/L_r$
39,78	38,43	3,40	43,03	40,15	6,70
48,04	44,89	6,56	43,74	44,67	-2,14
52,61	50,54	3,94	49,35	51,08	-3,50
56,52	56,81	-0,51	21,63	22,01	-1,72
67,39	63,53	5,73	22,25	23,15	-4,06
70,00	73,38	-4,83	24,00	25,44	-6,01
21,73	20,82	4,21	26,15	26,51	-1,35
24,23	23,28	3,93	27,50	27,08	1,53
20,74	20,17	2,72	33,21	32,72	1,47
24,10	25,30	-4,99	34,12	33,54	1,68
47,61	49,38	-3,73	36,00	37,42	-3,95
53,39	53,06	0,63	38,48	40,66	-5,68
30,00	30,54	-1,78	41,30	41,38	-0,19
30,29	31,29	-3,29	43,17	45,70	-5,85
30,74	31,48	-2,42	47,74	47,50	0,50
33,82	33,17	1,92	48,91	52,18	-6,67
35,44	37,32	-5,30	25,65	25,76	-0,44

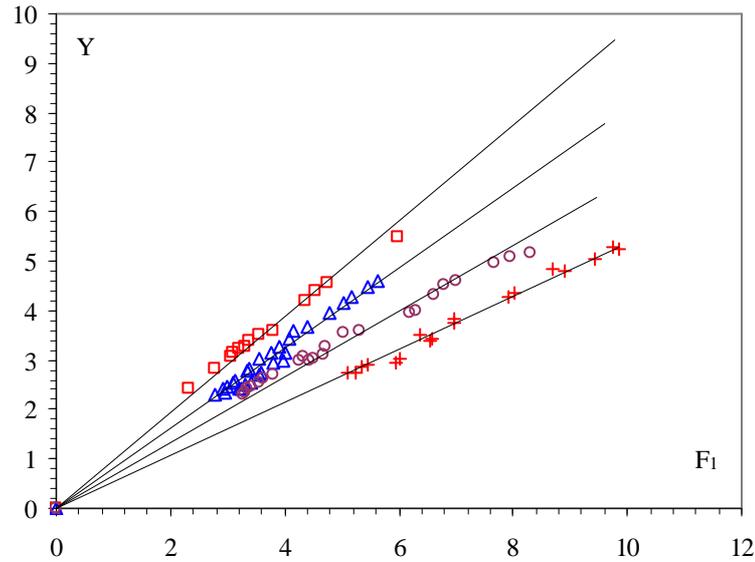
**Tableau 5.7** (suite et fin) : Ecart relatifs entre  $Lr/h_1$  expérimentale et  $Lr/h_1$  de la relation d'ajustement.

$Lr/h_1$ exp.	$Lr/h_1$ relation	$\Delta Lr/Lr$ (%)
26,18	26,76	-2,21
28,53	27,09	5,05
28,82	28,75	0,25
30,00	30,41	-1,37
38,53	38,89	-0,93
40,00	40,22	-0,54
43,24	44,04	-1,86
44,71	45,54	-1,86
46,18	47,70	-3,29
50,59	51,19	-1,18
51,76	53,51	-3,38
54,41	54,01	0,74
57,21	58,17	-1,68
62,94	62,32	0,99
16,06	17,00	-5,85
16,56	17,56	-6,07
20,19	21,53	-6,62
21,35	21,74	-1,85
22,58	23,23	-2,89
24,15	24,57	-1,74
25,58	25,21	1,43
28,46	27,19	4,45
29,71	28,26	4,90
53,04	49,65	6,40
55,43	55,03	0,74
56,52	55,66	1,53
60,44	59,88	0,92

#### V.4.4.3. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut $Y$ en fonction du nombre de Froude $F_1$

La Figure (5.16) montre la représentation graphique de la variation de  $Y$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  incident pour quatre valeurs de rugosités absolues :  $\varepsilon = 4,3$  mm ;  $\varepsilon = 5,63$  ;  $\varepsilon = 7,14$  mm, et  $\varepsilon = 9,11$  mm.

On remarque quatre nuages de points distincts, correspondant chacun à une rugosité fixée. Par ailleurs, l'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut à fond rugueux, montre qu'à chaque rugosité " $\varepsilon$ ", correspond une courbe de type linéaire de la forme :  $Y = a_3 F_1$



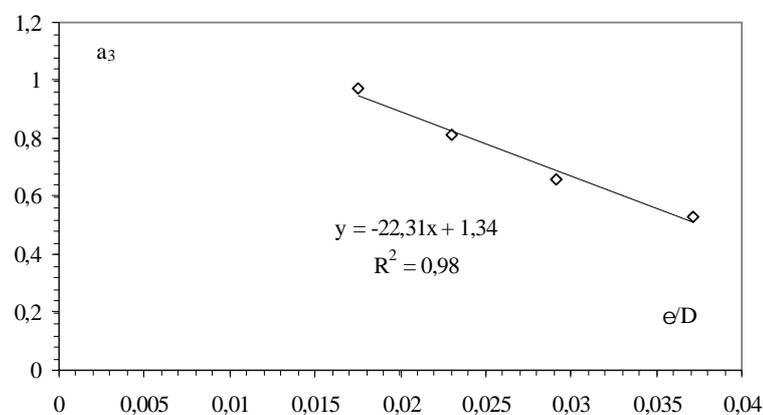
**Figure 5.16** : Ressaut contrôlé dans un canal en "U" à fond rugueux. Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut  $h_2/h_1$  en fonction du nombre de Froude, pour quatre valeurs différentes de " $\varepsilon$ ": ( $\square$ ) 4,3mm ; ( $\Delta$ ) 5,63mm ; ( $\circ$ ) 7,14mm et ( $\times$ ) 9,1mm. (—) Courbes d'ajustements.

Le tableau 5.8 regroupe les valeurs du coefficient  $a_3$ .

**Tableau 5.8**: coefficient  $a_3$  des courbes d'ajustement.

$\varepsilon / D$	Coefficient $a_3$	$R^2$
0,0175	0,97	0,99
0,0229	0,81	0,98
0,0291	0,66	0,98
0,0371	0,53	0,99

Un ajustement des couples de valeurs ( $a_3, \varepsilon/D$ ) du tableau 5.7, donne avec une bonne corrélation, la relation linéaire suivante :  $a_3 = -22,31 \varepsilon/D + 1,34$ . Cette équation est issue de la figure (5.17).



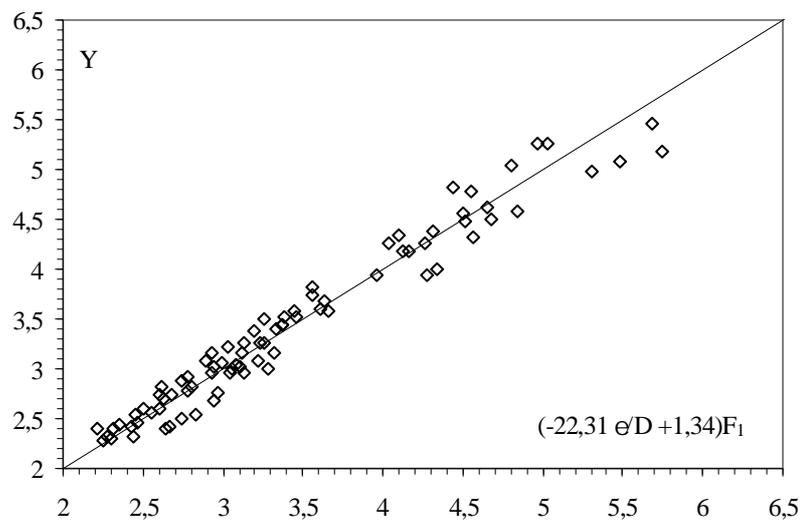
**Figure 5.17**: Variation du coefficient " $a_3$ " en fonction de la rugosité " $\varepsilon/D$ ".

En remplaçant le coefficient  $a_3$  par son expression dans la relation :  $Y = a_3 F_1$ , l'équation liant le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre Froude  $F_1$  et la rugosité relative  $\varepsilon/D$  s'écrit alors comme suit :

$$Y = (-22,31 \varepsilon/D + 1,34) F_1 \quad (5.13)$$

pour  $0,0175 \leq \varepsilon/D \leq 0,0371$

La Figure (5.18) illustre aussi que la relation  $Y=f(\varepsilon/D, F_1)$  ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ces derniers suivent également la première bissectrice.



**Figure (5.18) :** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre Froude  $F_1$  incident pour quatre valeurs de rugosité relative " $\varepsilon/D$ ". (◇) Points expérimentaux du ressaut contrôlé en canal profilé en "U" à fond rugueux. (—) Première bissectrice .

En outre, les écarts relatifs entre les valeurs des mesures expérimentales  $Y_{exp.}$  avec celles obtenues par la relation d'ajustement (5.13) sont estimés et présentés au tableau 5.6. Le tableau 5.6, montre que les écarts relatifs sont en majorité inférieur à 5%, ce qui justifie la fiabilité de la relation 5.13.

**Tableau 5.6 :** Ecartés relatifs entre Y de la relation d'ajustement et Y expérimentale

Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y(\%)$	Y relation	Yexp.	$\Delta Y/Y(\%)$
5,68	5,47	3,74	3,46	3,53	-2,00
3,03	3,23	-6,53	3,66	3,59	1,97
3,39	3,52	-3,95	4,28	3,94	7,92
2,89	3,08	-6,33	4,34	4,00	7,84
3,13	3,26	-4,19	4,56	4,32	5,19
3,20	3,39	-5,89	4,68	4,50	3,85
3,61	3,60	0,26	4,84	4,59	5,21
4,12	4,18	-1,25	5,30	4,97	6,22
4,32	4,39	-1,65	2,25	2,28	-1,42
4,50	4,55	-1,10	2,28	2,33	-2,19
2,30	2,31	-0,29	2,32	2,41	-4,08
2,43	2,42	0,12	2,35	2,44	-4,09
2,47	2,45	0,57	2,45	2,54	-3,86
2,55	2,56	-0,27	2,50	2,61	-4,15
2,60	2,60	0,26	2,63	2,70	-2,95
2,78	2,79	-0,31	2,93	2,97	-1,16
2,80	2,83	-0,94	3,00	3,07	-2,33
2,95	3,02	-2,47	3,04	2,96	2,88
3,12	3,15	-0,97	3,08	3,04	1,07
3,24	3,27	-0,96	3,33	3,39	-1,76
3,37	3,44	-2,04	3,36	3,43	-2,08
3,45	3,58	-3,79	3,56	3,74	-5,12
3,63	3,67	-1,09	4,04	4,26	-5,53
3,96	3,94	0,36	4,10	4,35	-6,00
4,16	4,17	-0,20	4,55	4,78	-5,10
4,27	4,27	-0,01	4,81	5,04	-4,92
4,51	4,48	0,61	5,03	5,26	-4,57
4,65	4,62	0,83	2,60	2,74	-5,01
2,44	2,33	4,58	2,68	2,74	-2,11
3,13	2,95	5,82	2,74	2,88	-5,27
3,28	3,00	8,48	2,78	2,91	-4,65
			4,97	5,26	-5,87

**V.4.4.4. Rendement du ressaut hydraulique dans un canal en "U" à fond rugueux**

L'intérêt technique du ressaut hydraulique est pratiquement dû à la dissipation d'énergie cinétique qu'il permet de réaliser. L'équation généralisée de Bernoulli entre la section amont et aval immédiats du ressaut impose :

$$H_1 = h_1 + Q^2 / (2.g.A_1^2) = h_2 + Q^2 / (2.g.A_2^2) + \Delta H \quad (5.14)$$

Le rendement  $\eta$  du ressaut hydraulique est défini par :

$$\eta = \Delta H / H_1, \quad \Delta H = H_1 - H_2 \quad (5.15)$$

avec  $H_1$  : la charge amont ,  $H_2$  : la charge aval Le rendement varie entre les limites 0 et 1 ( $0 < \eta < 1$ ).

- l'aire de la section amont est :  $A_1 = D^2/4(\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_1)$

. l'aire de la section aval, pour  $y_2 \leq 0,5$  est :  $A_2 = D^2/4(\theta_2 - \sin\theta_2 \cos\theta_2)$

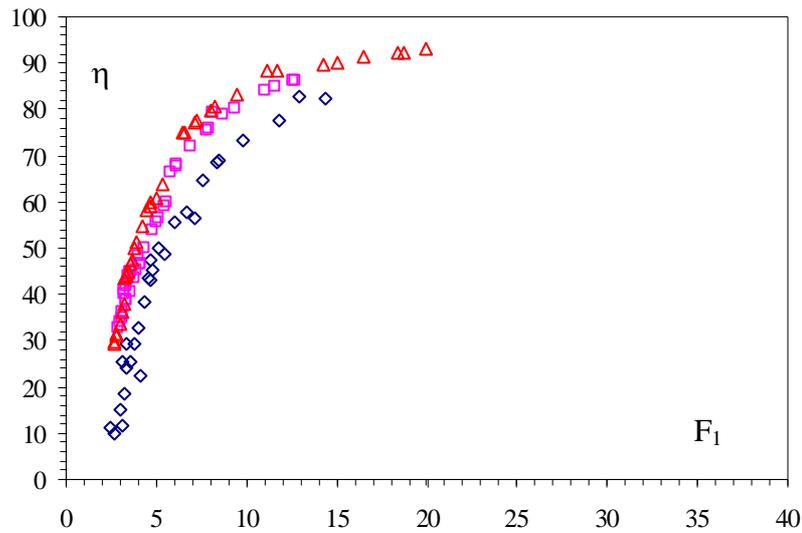
L'expression du rendement s'écrit dans ce cas :

$$\eta = \frac{h_1 - h_2 + \left[ \frac{8.D.q^2}{[(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2 - (\theta_2 - \sin(\theta_2)\cos(\theta_2))^2]} \right]}{h_1 + \left[ \frac{8.D.q^2}{[(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2]} \right]} \quad (5.16)$$

pour  $y_2 > 0,5 \Rightarrow A_2 = D^2 (\pi/8 + y_2 - 1/2)$  :

$$\eta = \frac{h_1 - h_2 + \frac{D.q^2}{2} \left[ \frac{16}{(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2} - \frac{1}{(\pi/8 + y_2 - 1/2)^2} \right]}{h_1 + \left[ \frac{8.D.q^2}{[(\theta_1 - \sin(\theta_1)\cos(\theta_1))^2]} \right]} \quad (5.17)$$

La variation du rendement du ressaut en fonction du nombre de Froude incident est représentée par la figure 5.19.



**Figure 5.19 :** Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . Les motifs représentent les points expérimentaux du ressaut en canal profilé en "U", à fond rugueux, de rugosité relative  $\varepsilon/D$  : ( $\square$ )= 0,0175 ; ( $\square$ )= 0,0229 et ( $\Delta$ )=0,0291.

La figure 5.19 montre que pour l'augmentation du nombre du Froude incident entraîne l'augmentation du rendement, par ailleurs pour le même nombre du Froude incident, le rendement augmente avec l'augmentation de la rugosité, ainsi la dissipation de l'énergie est importante avec l'augmentation de la rugosité équivalente.

#### V.4.4.5. Profil de surface généralisé du ressaut

L'expérimentation nous a permis de définir le profil de la surface libre du ressaut depuis son origine jusqu'à sa section finale dans un canal en "U", à fond rugueux.

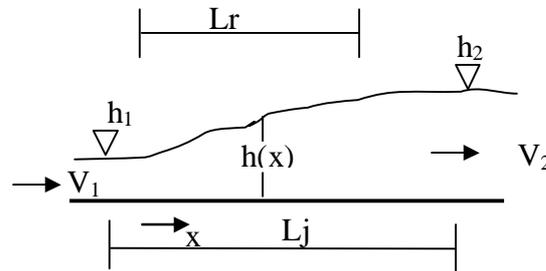


Figure 5.20 : Profil de surface du ressaut

Comme le montre le schéma simplifié de la Figure (5.20), la coordonnée longitudinale  $x$  est telle que  $0 \leq x \leq L_j$ , tandis que la profondeur  $h(x)$  est telle que  $h_1 \leq h(x) \leq h_2$ ;  $h_1$  et  $h_2$  sont les hauteurs conjuguées du ressaut.

Les paramètres  $x$  et  $h(x)$  peuvent servir à composer les variables adimensionnelles  $y$  et  $X$ , en écrivant que  $y = (h(x) - h_1) / (h_2 - h_1)$  et  $X = x / L_j$  variables adimensionnelles  $y$  et  $X$  sont limitées telles que :  $0 \leq X \leq 1$  et  $0 \leq y \leq 1$ .

La variation du rapport  $y$  en fonction du rapport  $X$  est représentée à la Figure (5.21), cette figure montre les points de mesure expérimentales pour différentes rugosités.

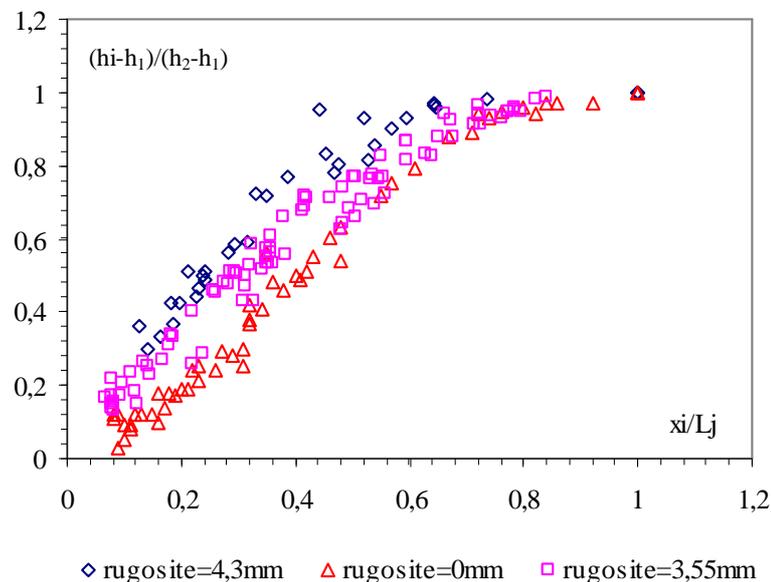


Figure 5.21 : Profil du surface généralisé du ressaut hydraulique dans un canal profilé en "U" à fond rugueux pour trois rugosités différentes : (◇) 4,3mm ; (□) 3,55mm et (△) 0,00mm.

D'après la Figure (5.21) on constate trois nuages de points distincts correspondant aux trois rugosités étudiées. Ainsi, pour le même rapport  $x/L_j$ , la valeur  $y$  augmente avec

l'augmentation de la rugosité absolue, ce qui montre clairement l'influence de la rugosité sur la diminution de la profondeur  $h_2$ .

#### V.4.4.6. Exemple d'application

Une application de calcul des relations obtenues, pour le cas du ressaut hydraulique évoluant en canal profilé en "U" à fond rugueux.

#### Exemple de calcul

-  $Q=110$  l/s, le débit volume passant par le bassin d'amortissement de section droite profilé en "U" à fond rugueux.

-  $h_1=12$  cm la hauteur initiale du ressaut.  $D=24,5$ cm et  $\varepsilon/D=0,03$

- Le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident est :

$$F_1^2 = Q^2 \cdot D \cdot \sin(\theta) / [9.81 \cdot (D^2/4(\theta_1 - \sin(\theta_1)) \cdot \cos(\theta_1))]^3 \text{ soit } F_1 \cong 5$$

- La longueur relative du ressaut est  $L_j/h_1 \cong 28,43$ , ainsi  $L_j=341,2$ cm.
- La longueur relative du rouleau du surface est  $L_r/h_1 \cong 28,20$  donc  $L_r=338,41$ cm.
- Le rapport des hauteurs conjuguées expérimental du ressaut est :  $Y = ((-23,57 \cdot \varepsilon/D + 1,37)) \cdot F_1 \cong 3,35$  par conséquent  $h_2 \cong 40,21$ cm.
- Selon l'approche semi théorique  $Y=1,38 \cdot F_1^{0,76} (1-18,14 \cdot \varepsilon/D)^{0,38} \cong 3,46$  donc  $h_2=41,73$ cm
- Ecart relatif entre  $Y_{exp}$  et  $Y$  théorique :  $\Delta Y/Y \cong 3,61\%$ .

#### V.5. CONCLUSION

Nous avons abordé dans ce chapitre une étude semi-théorique et une étude expérimentale.

Pour l'étude théorique on a tenté de trouver une relation approchée en remplacement à la relation semi théorique très implicite en  $Y$ . Celle-ci permet de trouver le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du coefficient  $C_r$  de résistance du fond du canal profilé en "U" et du nombre de Froude  $F_1$  incident de l'écoulement. D'autre part, nous avons pu évaluer la relation liant le coefficient  $C_r$  de résistance à la rugosité équivalente  $\varepsilon/D$  et l'expression semi théorique  $f(Y, F_1, C_r)$  devient de la forme  $f(Y, F_1, \varepsilon/D)$ .

Pour l'étude expérimentale on a entamé l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal profilé en "U" à fond rugueux. Cinq rugosités équivalentes ont alors été testées :  $\varepsilon=3,55$ mm ;  $\varepsilon=4,50$ mm ;  $\varepsilon=5,63$ mm ;  $\varepsilon=7,14$ mm et  $\varepsilon=9,11$ mm. Pour chacune des rugosités équivalentes étudiées, l'expérimentation a été menée sous quatre ouvertures de hauteurs :  $2,3\text{cm} \leq h_1 \leq 6,1\text{cm}$  avec plusieurs seuils minces. Une large gamme de débit et nombre de Froude a été ainsi obtenue.

Dans tous nos essais, les débits volumiques  $Q$  sont mesurés directement par un débitmètre à affichage numérique.

Dans un premier temps nous sommes intéressés à la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction de nombre de Froude  $F_1$  incident pour quatre valeurs de rugosité. On remarque quatre nuages de points différents correspond chacun à une valeurs bien déterminée de la rugosité. Par ailleurs, la longueur relative  $L_j/h_1$  augmente avec l'accroissement de nombre de Froude et réduit avec l'augmentation de la rugosité imposée.

D'autre part, l'analyse statistique des points de mesures expérimentales du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal profilé en "U" à fond rugueux, montre qu'un ajustement de type puissance est possible entre  $L_j/h_1$  et  $F_1$ .

En plus, nous avons aussi analysé expérimentalement les mesures des longueurs relatives du rouleau  $L_r/h_1$  de surface en fonction du nombre de Froude  $F_1$  incident de l'écoulement, ainsi cette analyse nous a permis d'obtenir une relation de type puissance entre la longueur relative du rouleau et du nombre de Froude de l'écoulement.

Dans un second temps, nous avons analysé la variation du rapport des hauteurs conjuguées  $h_2/h_1$  du ressaut en fonction de nombre de Froude  $F_1$  incident pour quatre valeurs différentes de rugosité :  $\varepsilon= 4,3\text{mm}$  ;  $\varepsilon=5,63\text{mm}$  ;  $\varepsilon= 7,14\text{mm}$  et  $\varepsilon=9,11\text{mm}$ . Quatre nuages de points distincts, correspond chacun à une rugosité bien déterminée. Par ailleurs, le rapport des hauteurs conjuguées augmente proportionnellement avec le nombre de Froude incident et démunie avec l'augmentation de la rugosité imposée.

En plus, l'ajustement statistique des points de mesures du ressaut contrôlé à fond rugueux, de type linéaire, a permis d'aboutir, avec une assez bonne corrélation, à une équation de type linéaire liant  $Y$ ,  $F_1$  et  $\varepsilon/D$ .

Aussi, l'étude expérimentale s'est intéressée à la dissipation d'énergie cinétique. Celle-ci étant représentée par le rendement. En conséquence, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident montre que le ressaut dans un canal profilé en "U" à fond rugueux dissipe mieux l'énergie quand la rugosité augmente.

Le dernier volet de cette étude expérimentale a abordé le profil généralisé du ressaut. En effet, pour trois rugosités équivalentes  $\varepsilon=0,00\text{mm}$  ;  $\varepsilon=3,55\text{mm}$  et  $\varepsilon= 4,30\text{mm}$ , la variation du rapport adimensionnel vertical  $y$  en fonction du rapport adimensionnel horizontal  $X$  montre que, pour le même  $X$ , la valeur de  $y$  augmente avec l'augmentation de la rugosité équivalente ce qui montre l'effet de la réduction des profondeurs et la compacité du ressaut.