

Ressauts Hydrauliques

[REDACTED] Nathan, [REDACTED] Edgar
[REDACTED] Ugo, [REDACTED] Wissal

Enseeiht, Toulouse, France



TOULOUSE
INP N7

Sommaire

I. Introduction	3
II. Aspect théorique	4
II.1 Ressaut statique	5
II.2 Ressaut mobile	6
III. Dispositif expérimental	8
III.1 Les canaux utilisés	8
III.2 Moyens et outils de mesure	8
IV. Ressaut statique	9
IV.1 Présentation des hypothèses d'étude et du canal	9
IV.1.1 Hypothèses d'études	9
IV.1.2 Présentation du canal	9
IV.2 Influence des différents paramètres sur la position du ressaut	10
IV.2.1 Influence du débit	10
IV.2.2 Influence de la vanne en amont	10
IV.2.3 Influence de la vanne en aval	11
IV.2.4 Influence de la différence des hauteurs de vannes	12
IV.3 Conclusion	13
V. Ressaut mobile	14
V.1 Résultats expérimentaux	14
V.1.1 Comparaison des vitesses dans le canal horizontal	14
V.1.2 Comparaison des vitesses dans le canal incliné	15
V.2 Conclusion	16
V.2.1 Vérification de l'hypothèse $W=constante$	16
V.2.2 Interprétation des résultats	16
VI. Conclusion	17

I. Introduction

Introduction

Les ressauts hydrauliques sont des phénomènes hydrodynamiques fascinants qui se produisent lorsque l'eau change brusquement de vitesse et de niveau. Ils apparaissent au point de contact entre un écoulement torrentiel et un écoulement fluvial. Ces occurrences naturelles, ou parfois artificielles, peuvent être observées dans diverses conditions et environnements, allant des rivières de montagne aux canaux d'irrigation en passant par les barrages. Les ressauts hydrauliques jouent un rôle essentiel dans la compréhension de la dynamique des fluides et ont des implications pratiques importantes dans des domaines tels que l'ingénierie hydraulique, la gestion des ressources en eau et la préservation de l'environnement.

L'élévation brutale du niveau d'eau est accompagnée d'une perte de charge irréversible et la formation de fortes turbulences créées par un empilement du flot sur lui-même dû à la différence de vitesse entre l'écoulement torrentiel et l'écoulement fluvial. Ce comportement peut être approximé grâce à des hypothèses négligeant la viscosité de l'eau et les facteurs extérieurs.

L'objectif de cette étude est d'étudier quantitativement l'impact de différents paramètres sur les ressauts statiques et mobiles et d'en évaluer l'écart avec la théorie en vue de discuter de la validité des hypothèses émises.

Pour cela, nous développerons d'abord cette partie théorique, nous présenterons le dispositif expérimental ainsi que les outils mis à disposition, puis nous traiterons individuellement les cas de ressauts statiques et de ressauts mobiles avant de conclure quant à la validité des résultats expérimentaux en comparaison à la théorie.



formation d'un ressaut hydraulique statique (en régime stationnaire) dans un évier

source:wikipedia

II. Aspect théorique

II. Aspect théorique

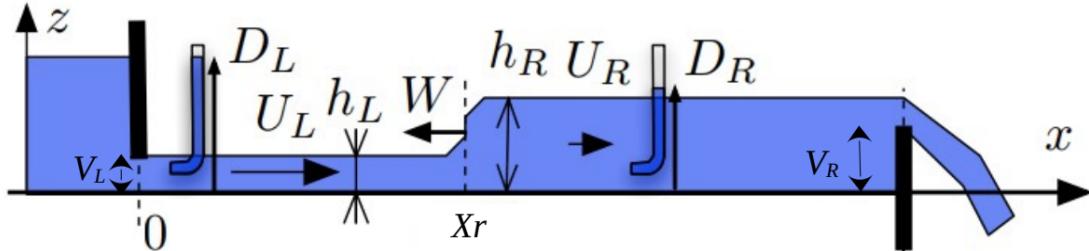


Figure 1: schéma du montage expérimental

source: sujet de TP

Dans cette partie, nous mettrons en place le cadre théorique nous permettant d'étudier le saut hydraulique.

Pour la suite de notre étude :

- h_1 sera la hauteur d'eau dans le bassin avant le saut en m
- h_r la hauteur d'eau dans le bassin après le saut en m
- U_l la vitesse de la couche fluide avant le saut en $m.s^{-1}$
- U_r la vitesse de la couche fluide après le saut en $m.s^{-1}$
- Q le débit volumique en $m^3.s^{-1}$
- W la vitesse du saut en $m.s^{-1}$ (nul dans le cas stationnaire)
- D_l la hauteur d'eau dans le tube de Pitot avant le saut
- D_r la hauteur d'eau dans le tube de Pitot après le saut
- D_n la hauteur d'eau dans le tube de Pitot n
- h_v la hauteur de la vanne à droite du système
- p_a la pression atmosphérique en Pa
- L la largeur du canal en m
- d la longueur totale du canal en m
- q le débit linéique en $m^2.s^{-1}$
- X_r la position du saut (dans le cas statique)

Toute l'étude se fera dans une base orthonormée directe (O , x , y , z) dont l'origine dépendra de l'expérience et sera explicitée.

II. Aspect théorique

II.1 Ressaut statique

Tout d'abord, le fluide étant supposé incompressible, on trouve en régime stationnaire, d'après la conservation de la masse, un débit linéique q constant.

$$q = h_l U_l = h_r U_r \quad (1)$$

En appliquant le principe fondamental de l'hydrostatique, on peut appliquer une hypothèse sur la pression et trouver une expression en fonction de la hauteur d'eau $h(x)$:

$$p(x, z) = p_a - \rho g [z - h(x)] \quad (2)$$

On en déduit une expression sur la résultante des forces de pression selon la direction x sur une section du canal en $h(x)$ en intégrant sur la toute la surface:

$$F = p_a h L + \frac{1}{2} \rho g h^2 L \quad (3)$$

Il y a 3 forces de pression s'exerçant sur le domaine D (figure 2) qui sont F_1 , la résultante des forces dans le sens de l'écoulement, F_a , F_r , la résultante des forces dans le sens inverse de l'écoulement, le poids est lui compensé par la réaction du canal.

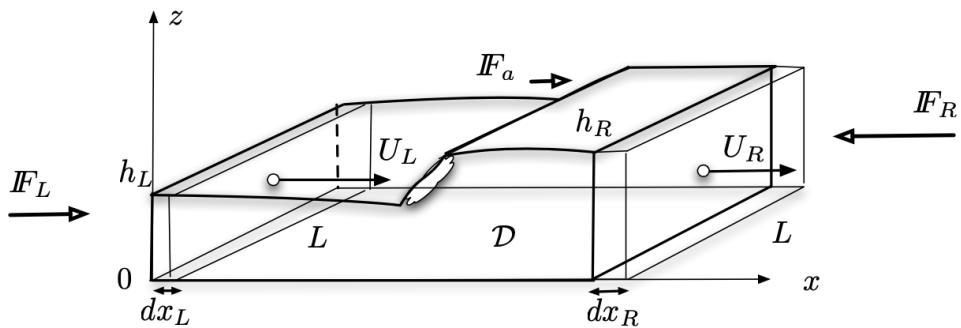


Figure 2: Schéma de l'écoulement au niveau du ressaut et bilan des forces
source: sujet de TP

On note ici qu'on a négligé les frottements sur le fond du canal, hypothèse qui aura son importance.

En appliquant ensuite le principe fondamental de la dynamique, on obtient, d'après ce qui précède, comme $h U^2 \rho L$ représente la quantité de mouvement qui passe par unité de temps à travers une section du canal, on peut alors écrire, par conservation de la quantité de mouvement et d'après (3):

$$h_L U_L^2 \rho L + \frac{1}{2} g h_L^2 \rho L = h_R U_R^2 \rho L + \frac{1}{2} g h_R^2 \rho L \quad (4)$$

II. Aspect théorique

L'expression (4) peut être simplifiée pour obtenir simplement, en injectant (1):

$$h_L U_L^2 + \frac{1}{2} g h_L^2 = h_R U_R^2 + \frac{1}{2} g h_R^2 \quad (5)$$

On peut enfin en déduire une conservation de l'impulsion $\mathcal{I}(q, h) = q^2/h + \frac{1}{2} g h^2$ qui représente la variation instantanée de la quantité de mouvement d'un fluide dans un ressaut hydraulique.

En utilisant $q = Uh$, on obtient $\mathcal{I}(q, h_L) = \mathcal{I}(q, h_R)$. (6)

On peut alors tracer l'impulsion en fonction de h pour différentes valeurs de q :

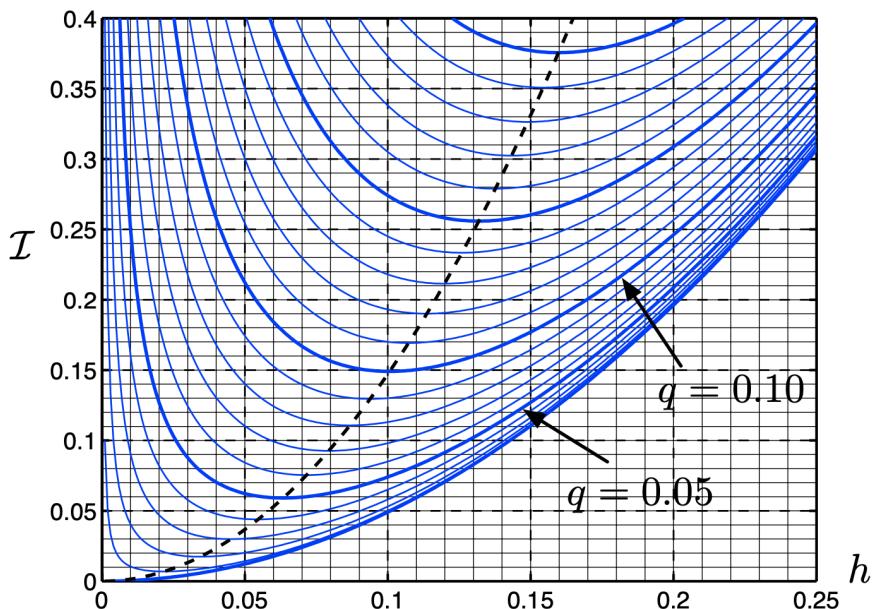


Figure 3: L'impulsion en fonction de h pour différents valeurs de q
source: sujet de TP

II.2 Ressaut mobile

Dans le cas d'un ressaut, la vitesse W de ce dernier a une importance, l'équation (1) est alors transformée en: $h_l(U_l - W) = h_r(U_r - W)$ (7)

L'équation bilan de quantité de mouvement se retrouve elle aussi modifiée, en tenant compte de la nouvelle écriture du débit linéique, on fait un bilan de quantité de mouvement entre deux sections en amont et en aval du ressaut mobile.

On obtient alors , de manière similaire au cas du ressaut statique

$$h_L U_L (U_L - W) + \frac{1}{2} g h_L^2 = h_R U_R (U_R - W) + \frac{1}{2} g h_R^2 \quad (8)$$

II. Aspect théorique

Cette équation permet alors de retrouver la conservation de l'impulsion, comme dans le cas du ressaut statique:

$$h_L (U_L - W)^2 + \frac{1}{2} g h_L^2 = h_R (U_R - W)^2 + \frac{1}{2} g h_R^2 \quad (9)$$

qui peut être mise simplement sous la forme: $\mathcal{I}(q', h_L) = \mathcal{I}(q', h_R)$ (10)

III. Dispositif expérimental et outils

III.1 Les canaux

Nous avions à disposition un canal d'une longueur $d = 12\text{m}$ et d'une largeur $L = 0,25\text{m}$ avec des vannes de hauteur réglables et un canal inclinable disposant d'un obstacle fixe et d'une vanne de hauteur réglable avec une distance entre obstacles de $d' = 3\text{m}$.

III.2 Moyens et outils de mesures:

Nous avions accès à plusieurs outils afin de prendre nos mesures: une règle et un mètre pour mesurer les hauteurs d'eau, les distances de mesure dans le cas du ressaut mobile ainsi que pour mesurer la hauteur du canal inclinable et déterminer la pente. Ces outils présentent une incertitude de $\Delta l = \Delta h = \pm 1\text{mm}$.

Pour mesurer la vitesse du ressaut mobile, nous avons utilisé le mètre et un chronomètre avec une incertitude de $\Delta T = \pm 0,1\text{s}$. Pour cela, un opérateur déclenche le chronomètre au moment de la fermeture de la vanne (moment que l'on confond avec la formation du ressaut mobile), on arrête le chronomètre lorsque le ressaut a dépassé un certain point à une distance l de la vanne fermée choisie par l'opérateur ce qui nous donne un temps T . Ici, on suppose donc que la vitesse du ressaut mobile est constante.

On accède alors à la vitesse en prenant $W = \frac{l}{T}$.

III.3 Incertitudes sur la mesure de la vitesse

Pour cette mesure, on doit considérer l'incertitude sur la largeur du canal et sur le temps ce qui nous donne $\Delta W = |(\frac{\delta W}{\delta l})|\Delta l + (\frac{\delta W}{\delta T})\Delta T$ (11)

$$\text{On obtient alors } \Delta W = \frac{\Delta l}{T} + \frac{l\Delta T}{T^2} \quad (12)$$

IV. Ressaut statique

IV.1 Présentation des hypothèses d'étude et du canal

IV.1.1 Hypothèses d'étude

Afin d'effectuer cette première étude, nous avons travaillé sur le grand canal hydraulique de l'ENSEEIHT (12 m de long). Ce canal est muni d'une vanne descendante en amont et d'une vanne montante en aval, ainsi que d'une pompe permettant de monter jusqu'à un débit de 30L/s.

Nous supposerons finalement tout au long de notre étude que l'eau est un fluide incompressible, homogène et de masse volumique $\rho = 1000\text{kg/m}^3$. Nous noterons également que $g = 9,81\text{m/s}^2$.

Dans cette partie, nous n'étudions que des ressauts statiques avec un angle d'inclinaison nul, ce qui permet d'écrire :

$$W = 0, \alpha = 0$$

IV.1.2 Présentation du canal

Rappel : Les différentes grandeurs ont été introduites en première partie du rapport.

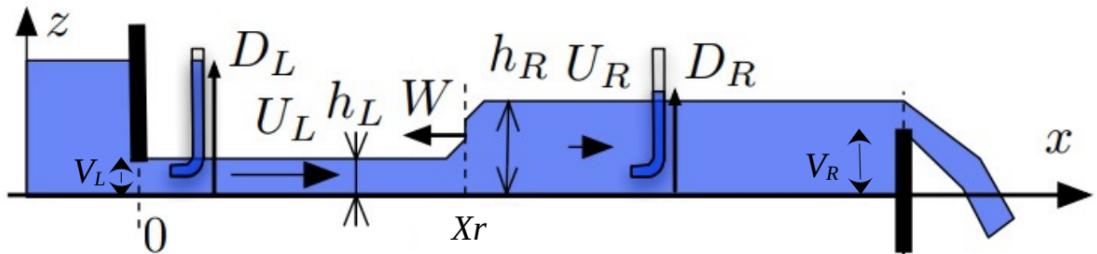


Figure 4 : Schéma du canal étudié

Les deux nouvelles grandeurs à introduire sont V_R et V_L , qui correspondent aux hauteurs de vannes en aval et en amont du canal.

- Pour V_L , cette hauteur correspond à la distance laissée entre la vanne en amont et le fond du canal (voir schéma ci-dessus).
- Pour V_R , cette hauteur correspond à la distance de laquelle dépasse la vanne en aval par rapport au fond du canal (voir schéma ci-dessus).

IV. Ressaut statique

Nous avons décidé de travailler avec ces deux paramètres là (en plus du débit) car ils sont pilotables informatiquement de manière très précise.

IV.2 Influence des différents paramètres sur la position du ressaut

Nous avons tout d'abord souhaité étudier les différents paramètres du canal (débit, hauteur des vannes en amont et en aval) afin de pouvoir prédire la position du ressaut statique.

Au cours des trois expériences suivantes, nous avons pris en compte des incertitudes sur nos mesures de la position X_r du ressaut. Nous avons évaluer une marge d'erreur de 3cm (positivement et négativement) sur la mesure de cette position, notamment à cause des fluctuations du ressaut lors des mesures.

Ces incertitudes sont modélisées par des barres d'erreurs sur les courbes suivantes.

IV.2.1 Influence du débit

Lors de cette première expérience, nous avons fixé les deux hauteurs de vannes afin d'avoir $V_R = 60$ mm et $V_L = 30$ mm. Seul le débit Q était modifié au cours de l'étude.

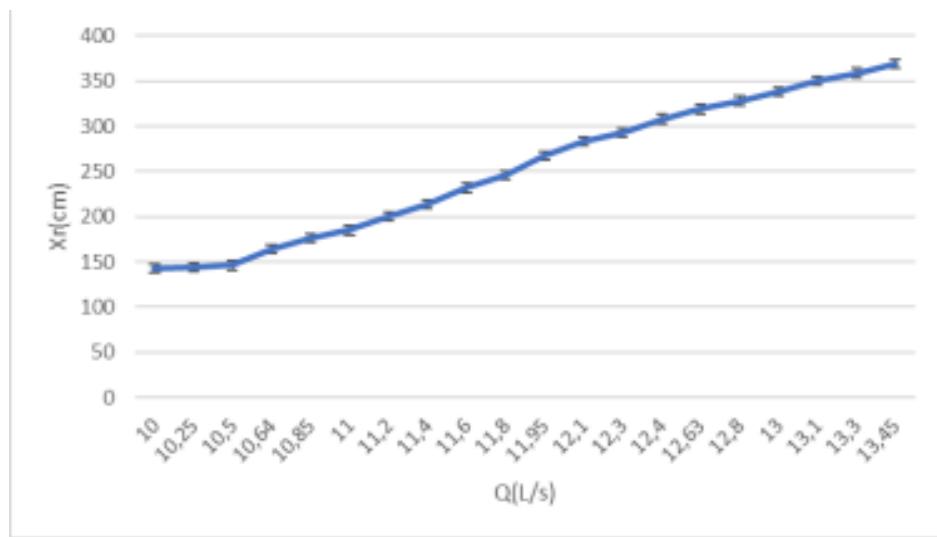


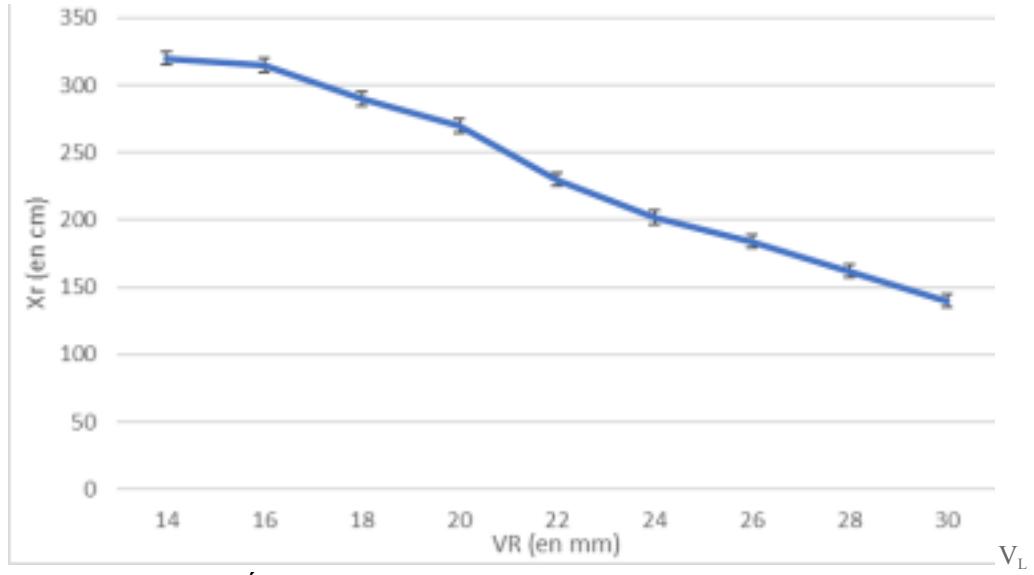
Figure 5 : Évolution de la position du ressaut en fonction du débit

Cette première expérience permet de mettre en évidence le fait que la position X_r est une fonction croissante du débit. Nous pouvons donc en déduire l'influence de ce débit sur la position du ressaut : un débit plus élevé fera avancer le ressaut statique le long du canal.

IV. Ressaut statique

IV.2.2 Influence de la vanne en amont

Lors de cette seconde expérience, nous avons fixé la hauteur de la vanne en aval ainsi que le débit afin d'avoir $V_R = 60$ mm et $Q = 10,1$ L/s. Seule la hauteur de la vanne en amont V_L était modifiée au cours de l'étude.



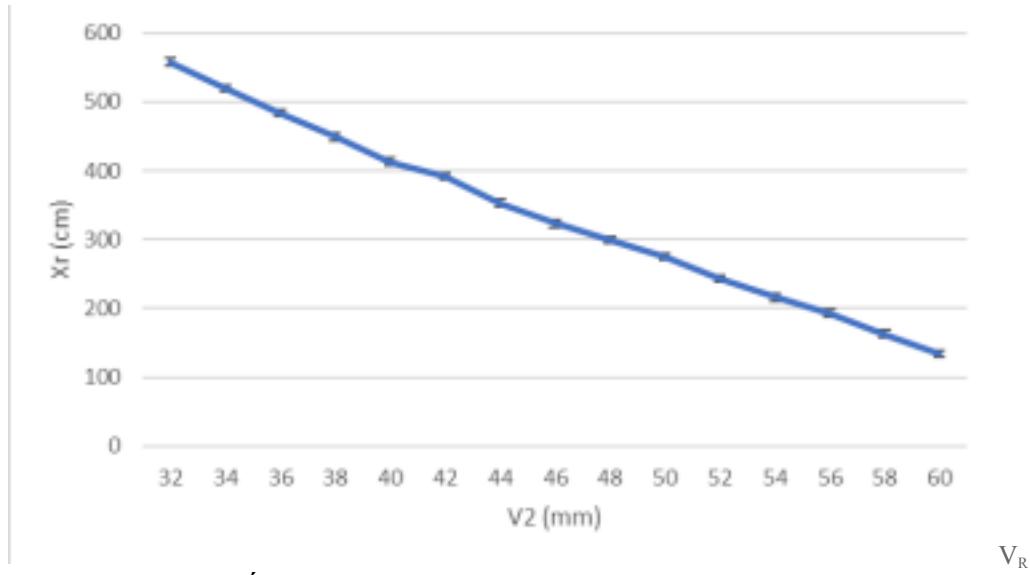
(en mm) Figure 6: Évolution de la position du ressaut en fonction de la hauteur de vanne en amont

Cette seconde expérience nous montre clairement que la position du ressaut statique est une fonction décroissante de la hauteur de vanne en amont V_L .

IV.2.3 Influence de la vanne en aval

Lors de cette troisième expérience, nous avons fixé la hauteur de la vanne en amont ainsi que le débit afin d'avoir $V_L = 60$ mm et $Q = 10,1$ L/s. Seule la hauteur de la vanne en aval V_R était modifiée au cours de l'étude.

IV. Ressaut statique



(en mm) *Figure 7 : Évolution de la position du ressaut en fonction de la hauteur de vanne en aval*

Cette troisième expérience met en évidence le caractère décroissant de la position du ressaut en fonction de la hauteur de vanne en aval. De plus, la courbe nous montre une évolution quasi linéaire de cette position lorsque l'on modifie V_R .

IV.2.4 Influence de la différence de hauteur des vannes

Lors de cette partie, nous avons voulu vérifier si la position du ressaut dépendait de la hauteur des deux vannes indépendamment ou si elle dépendait seulement de la différence de hauteur entre ces deux vannes.

Nous avons ainsi mesurer la position du ressaut statique en modifiant les hauteurs des deux vannes, mais en conservant la différence entre ces deux hauteurs $\Delta V = V_R - V_L$ ainsi que le débit Q constants.

Les mesures ont été effectuées à un débit $Q = 10 \text{ L/s}$ et à une différence de hauteur $\Delta V = 30 \text{ mm}$.

IV. Ressaut statique

V_L (en mm)	V_R (en mm)	X_r (en cm)
30	60	145
32	62	133
34	64	126

Évolution de X_r en fonction de la hauteur des deux vannes

Nous observons clairement avec ces résultats que la position du ressaut X_r n'est pas constante alors que la différence de hauteur entre les deux vannes ΔV l'est. Nous pouvons donc en déduire que la position du ressaut dépend de la hauteur des deux vannes indépendamment et non pas de la différence entre celles-ci.

Cependant, ce résultat est à nuancé. Comme expliqué dans la partie *IV.2.1*, nous avons fait le choix d'étudier l'influence de la hauteur des vannes (V_R et V_L) car ces grandeurs étaient facilement pilotables de manière très précises. Seulement, la hauteur V_R est différente de la hauteur d'eau en aval h_R (car l'eau passe par dessus la vanne, ce qui ajoute de la hauteur supplémentaire) alors que la hauteur V_L est égale à la hauteur d'eau en amont h_L (cela est facilement visible sur le schéma en *IV.2.1*).

Nos expériences nous permettent ainsi de conclure que la position du ressaut ne dépend pas de la différence de hauteur des vannes en amont et en aval, mais elles ne montrent pas si cette position dépend de la différence de hauteur d'eau en amont et en aval du ressaut.

IV.3 Conclusion

Ces diverses expériences ont permis d'évaluer l'influence des différents paramètres sur la position du ressaut statique :

- Le ressaut avance lorsque le débit augmente
- Le ressaut recule lorsque la hauteur de la vanne en amont ou en aval diminue •
- La position du ressaut ne dépend pas de la différence de hauteur entre les deux vannes

V Ressaut mobile

V.1 Résultats expérimentaux

V.1.1- Comparaison des vitesses dans le canal horizontal

On calcule la vitesse du ressaut à l'aide d'un chronomètre et de la distance parcourue par celui-ci le long du canal. On peut trouver l'incertitude de la vitesse réelle à l'aide de la différentielle de la formule suivante :

$$W = \frac{L}{T} \quad (13)$$

La différentielle de (13) est:

$$\delta W = \frac{\delta L}{L} W + \frac{\delta T}{T} W \quad (14)$$

En injectant (13) dans (14) on obtient:

$$\delta W = \frac{\delta L}{T} + \frac{\delta T}{T^2} L \quad (15)$$

Avec $\delta L = 1\text{mm}$ et $\delta T=0,1\text{s}$

$Q(\text{L/s})$	7	10	15	15	10	15	24,5
$h_L(\text{cm})$	5	4,2	3,8	3,2	4,5	4,4	6
$h_R(\text{cm})$	6	7,5	14	18,5	19,2	22,6	14,5
$W_{réel}(\text{m/s})$	0,48	0,52	0,47	0,38	0,51	0,46	0,6
$W_{théo}(\text{m/s})$	0,67	0,55	0,67	0,42	0,2	x	0,43
$h_{vanne}(\text{cm})$	6	6	6	5	7	7	7

Figure 8: valeurs expérimentales et théoriques sur le ressaut mobile

V. Ressaut mobile

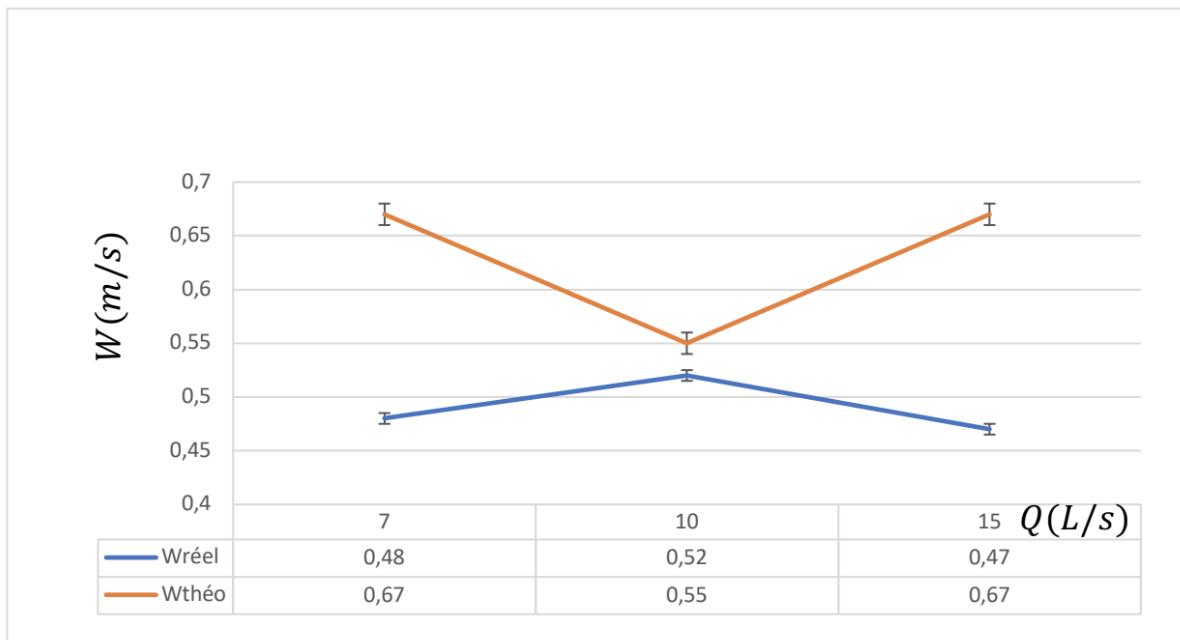


Figure 9: Vitesse du ressaut en fonction du débit pour une hauteur de vanne de 6cm

V.1.2 Comparaison des vitesses dans le canal incliné

Dans cette partie nous réaliserons la même étude que précédemment dans un canal incliné pour essayer de comprendre l'influence de la pente.

$\alpha(^{\circ})$	0	0	0	1,37	1,37	1,37	2	2	2
$Q(L/s)$	15	17	19	15	17	19	15	17	19
$W(m/s)$	0,37	0,43	0,47	0,36	0,37	0,42	0,33	0,36	0,38

Figure 10: Valeurs expérimentales sur le ressaut mobile incliné

On incline le canal manuellement et on trouve l'angle grâce à la formule suivante:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{h}{l} \right)$$

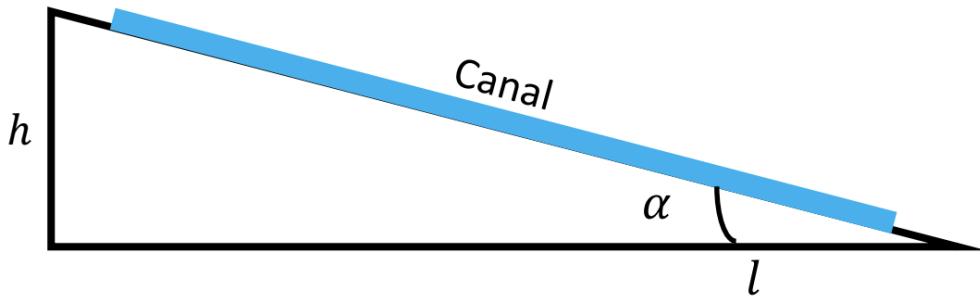


Figure 11: schéma du canal incliné

V. Ressaut mobile

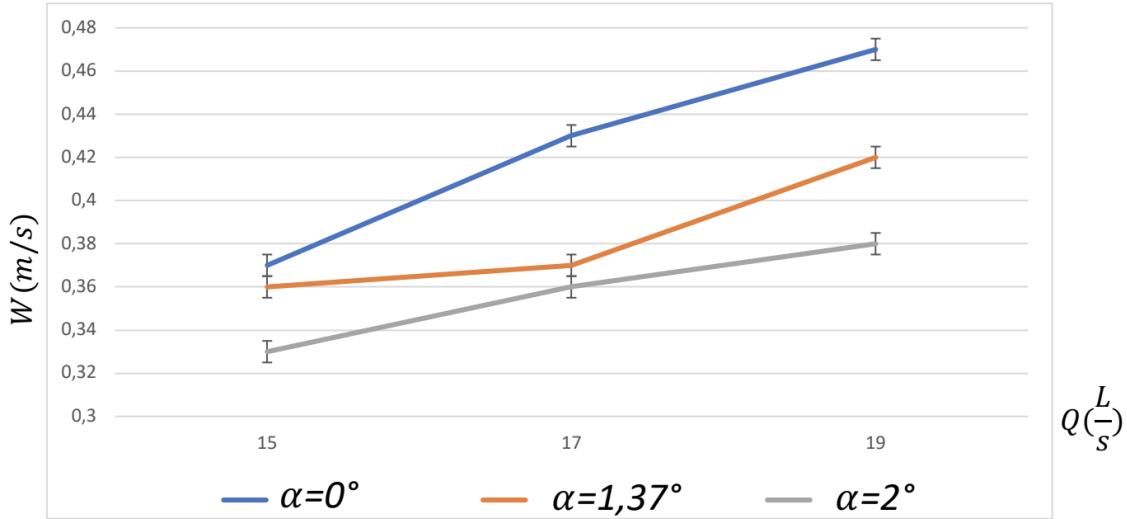


figure 12: Vitesse du ressaut en fonction du débit pour différentes inclinaisons

V.2 Conclusion

V.2.1 Vérification de l'hypothèse $W=\text{constante}$

Au début de l'étude pour effectuer la théorie, nous avons fait l'hypothèse d'une vitesse constante pour le ressaut. En reprenant nos valeurs expérimentales sur la figure 6 on remarque une variation de vitesse de l'ordre de 36% entre nos valeurs minimale et maximale pour le ressaut horizontal et une variation de 30% pour le ressaut incliné figure 8. Ainsi même si les vitesses restent du même ordre de grandeur on remarque une variation significative de celle-ci tout en prenant en compte l'incertitude de vitesse. Notre modèle théorique ne paraît pas parfait et pourrait être amélioré.

V.2.2 Interprétation des résultats

On remarque une légère surestimation de la vitesse théorique par rapport à la vitesse réel du ressaut pour le canal horizontal d'après la figure 7. Ce qui s'explique par le fait que nous avons supposé que U_R était nulle, alors que la vanne ne remonte pas assez rapidement et engendre des effets de remous qui rendent le ressaut mobile non linéaire et modifient sa vitesse. Enfin on remarque qu'il y a moins de phénomènes dispersifs dans le canal inclinés car la vitesse du ressaut est plus constante en moyenne, même à haut débit. Néanmoins le modèle théorique permet de fournir des résultats partiels sur la vitesse du ressaut en fonction de différents paramètres tels que le débit, la pente ou encore la taille de l'obstacle.

VI. Conclusion

Dans cette étude approfondie des ressauts hydrauliques, nous avons scruté l'impact de divers paramètres sur les ressauts statiques et mobiles. En analysant quantitativement ces phénomènes, nous avons pu établir des constats fascinants quant à l'écart entre la théorie et la réalité observée (bien que certains de nos résultats se trouvent très proches de la réalité).

Néanmoins, il est facile de prédire spatialement et temporellement la formation et l'évolution d'un ressaut hydraulique lorsqu'on connaît les conditions extérieures dans un fluide.

Malgré tout, négliger les phénomènes dissipatifs comme les frottements au fond du canal par exemple ne nous permet pas d'avoir une grande précision sur ces prédictions, mais cette étude peut permettre une application dans l'ingénierie civile, par exemple dans la planification des réseaux de canalisations, où la compréhension des phénomènes de ressauts est essentielle pour éviter les obstructions et les dommages structurels, en assurant un écoulement régulier des liquides et des débris.