



---

# Étude d'un ressaut hydraulique

---

ENSEEIHT - 2<sup>ème</sup> Année MFEE

Avril 2019

## Sommaire

<b>1 Étude d'un ressaut stationnaire</b>	<b>3</b>
1.1 Protocole expérimental . . . . .	3
1.2 Lignes d'eau expérimentales . . . . .	3
1.3 Énergie spécifique, nombre de Froude et régime d'écoulement . . . . .	4
1.4 Courbes de remous . . . . .	5
1.5 Impulsion . . . . .	7
1.6 Courbes caractéristiques . . . . .	7
<b>2 Pertes de charge dans un ressaut</b>	<b>9</b>
2.1 Présentation du phénomène . . . . .	9
2.2 Protocole expérimental . . . . .	9
2.3 Présentation des résultats . . . . .	9
2.4 Analyse des résultats . . . . .	10
<b>3 Vitesse de propagation du ressaut</b>	<b>11</b>
3.1 Protocole expérimental . . . . .	11
3.2 Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques . . . . .	11
3.3 Courbes caractéristiques . . . . .	11
3.4 Variation de la vitesse du ressaut . . . . .	12

## Introduction

Le ressaut hydraulique est décrit dans la littérature comme un phénomène qui se produit au moment de la transition entre un écoulement torrentiel et un écoulement fluvial. Il se produit lors d'une élévation abrupte du niveau de l'eau dans une petite région ou lors d'une perte importante de charge hydraulique localisée HAGER [1992].

Le premier scientifique à décrire ce phénomène fut le peintre et mathématicien Léonard de Vinci au XVI<sup>e</sup> siècle, qui depuis lors intrigue les scientifiques et les stimule dans le domaine des sciences hydrauliques. Même si plus de quatre siècles se sont écoulés depuis la description de Léonard de Vinci, de grands progrès dans l'étude du ressaut hydraulique et de ces effets corrélés continuent à se développer. En effet, au cours des 60 dernières années, la modernisation de nos connaissances sur ce sujet l'ont transformé en un sujet très actuel et d'une importance économique HAGER [1992].

La compréhension de ce phénomène est aujourd'hui d'une importance vitale dans diverses applications de l'ingénierie à fort impacts sociaux-économiques et environnementaux. L'un des exemples les plus classiques de son importance est la construction de barrages. Des études montrent qu'un déversoir bien conçu suivant les principes du ressaut hydraulique peut dissiper entre 60 et 70% de l'énergie. Ceci permet de minimiser les dommages faits à la structure et au lit de la rivière et donc de réduire les coûts de maintenance et les impacts environnementaux.

Dans ce travail, nous allons appliquer les connaissances acquises dans le cours d'hydraulique à surface libre pour l'étude des principales caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal de contrôle. Nous allons également analyser l'influence de variables telles que le débit ou la hauteur de la vanne aval sur ce phénomène.

Tout d'abord, nous analyserons la position ainsi que certaines valeurs caractéristiques d'un ressaut stationnaire pour différents débits. Ensuite, dans une seconde partie, nous étudierons plus précisément l'influence du débit sur les pertes de charge singulières liées au ressaut. Enfin dans une dernière partie, nous étudierons le cas d'un ressaut mobile en s'intéressant à sa vitesse de propagation.

# 1 Étude d'un ressaut stationnaire

Pour obtenir un ressaut hydraulique on peut comme première méthode utiliser le canal muni du seuil triangulaire puis fixer la hauteur de la vanne aval. L'autre méthode est d'utiliser le second canal en réglant la hauteur de la vanne située en amont et celle située en aval. Ensuite, en modifiant ces hauteurs de vanne ou en modifiant le débit, on peut régler la position du ressaut hydraulique et faire en sorte qu'il soit immobile. On obtient alors les relations de saut suivantes :

$$h_{amont}(U_{amont} - W) = h_{aval}(U_{aval} - W) \tag{1}$$

$$h_{amont}U_{amont}(U_{amont} - W) + \frac{1}{2}gh_{amont}^2 = h_{aval}U_{aval}(U_{aval} - W) + \frac{1}{2}gh_{aval}^2 \tag{2}$$

Dans le cas d'un ressaut stationnaire on a  $W = 0$ .

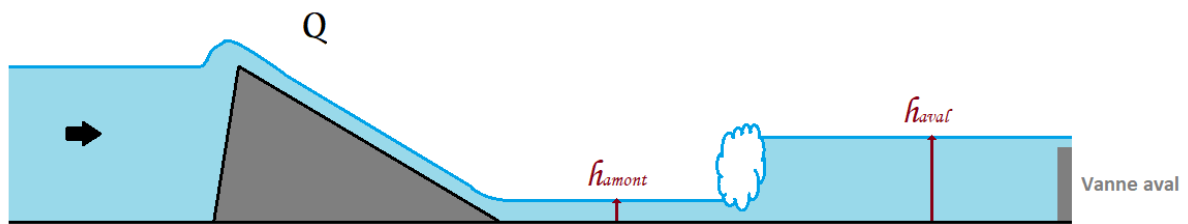


FIGURE 1 – Schéma d'un ressaut stationnaire

## 1.1 Protocole expérimental

Dans cette première expérience, on utilise le canal possédant le seuil. Pour différentes valeurs de débit et différentes hauteurs de vanne aval, on relève les hauteurs d'eau à plusieurs points de l'écoulement.

## 1.2 Lignes d'eau expérimentales

Pour chaque ressaut, on relève les hauteurs d'eau à différents points de l'écoulement et on obtient les profils en long suivants :

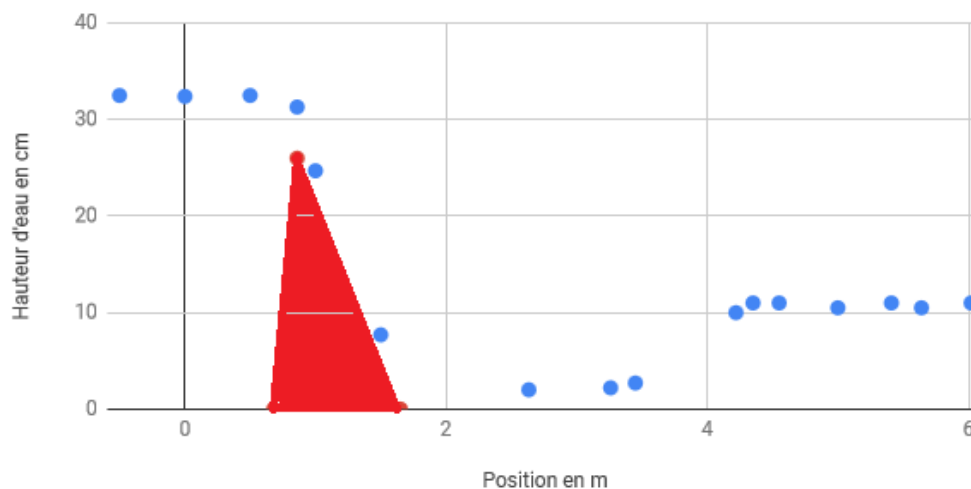


FIGURE 2 – Hauteur d'eau en fonction de la position pour  $Q = 8,79 \text{ L/s}$

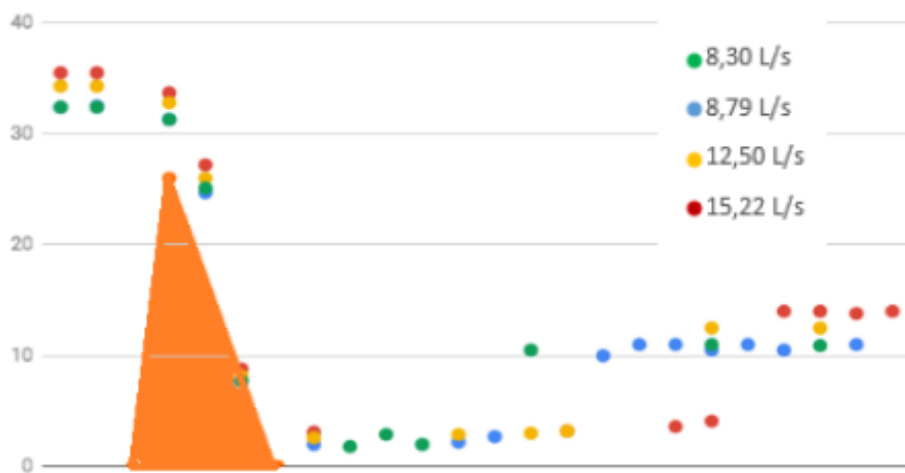


FIGURE 3 – Hauteur d’eau en fonction de la position x pour tous les ressauts étudiés

On peut observer une diminution très importante de la hauteur d’eau en pente forte (au niveau du seuil) qui illustre bien le régime torrentiel à cet endroit. De plus, la hauteur après le seuil est bien inférieure à la hauteur critique ce qui valide l’hypothèse d’un régime torrentiel après le seuil et avant le ressaut. Enfin, on remarque que pour une hauteur de vanne aval constante, le ressaut se rapproche de la vanne lorsque le débit augmente.

### 1.3 Énergie spécifique, nombre de Froude et régime d’écoulement

On connaît les hauteurs d’eau à différents points caractéristiques de l’écoulement et notamment les hauteurs amont et aval au ressaut. Ceci nous permet de connaître la hauteur critique. On peut aussi mesurer cette hauteur au niveau du seuil car il n’existe qu’une seule hauteur critique pour un écoulement donné.

On peut donc tracer l’énergie spécifique. Pour rappel, la formule permettant de connaître l’énergie spécifique pour une hauteur d’eau et un débit donné est la suivante :

$$E = h + \frac{q^2}{2gh^2} = h + \frac{h_c^3}{2h^2} \tag{3}$$

On trace les courbes d’énergie spécifique théorique pour les différents débits que nous avons utilisés.

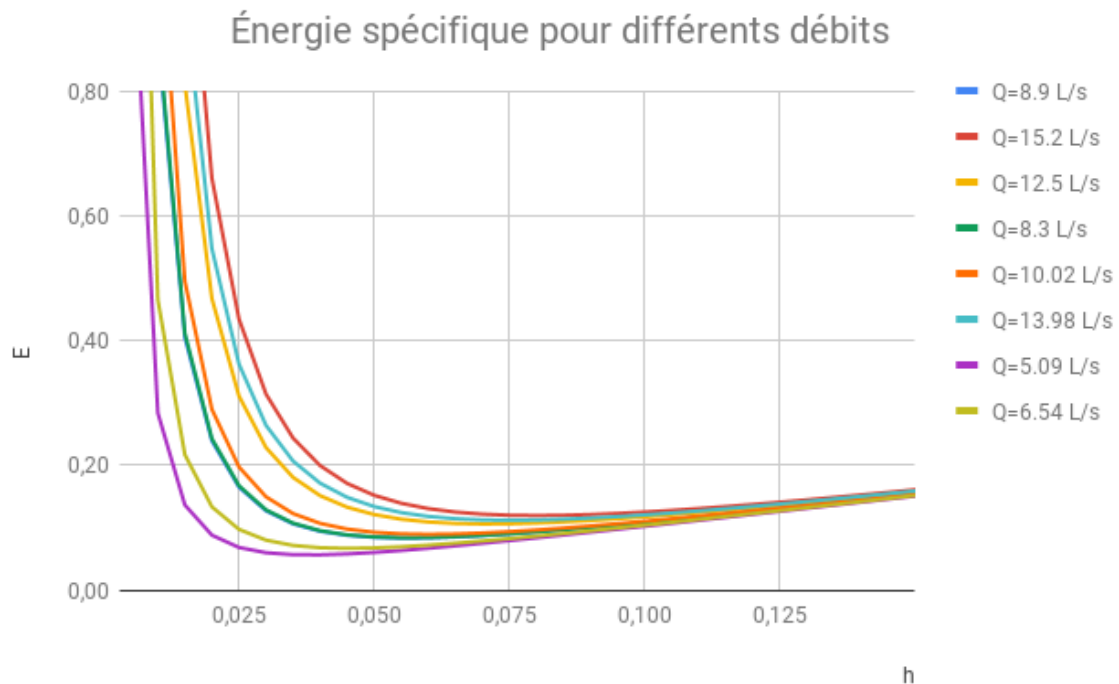


FIGURE 4 – Énergie spécifique théorique pour les débits considérés

L'énergie spécifique est minimale au point critique. C'est le point où notre écoulement passe du régime torrentiel au régime fluvial (donc le point où  $Fr = 1$ ). Le Froude diminue donc dans le sens de l'écoulement ici.

En régime torrentiel (ou supercritique), on a toujours une hauteur inférieure à la hauteur critique  $h < h_c$  et  $Fr > 1$ . À l'inverse, en régime fluvial (ou souscritique), on a  $h > h_c$  et  $Fr < 1$ . On observe bien ces variations de hauteur sur les lignes d'eau dans la partie précédente.

#### 1.4 Courbes de remous

Nous n'avons pas mis de pente dans le canal. Il en existe tout de même une, très faible, de sorte à ce que l'eau du canal puisse se vider plus facilement en fin d'utilisation. Nous sommes donc dans le cas des pentes faibles. On cherche à tracer les courbes de remous et les comparer en prenant une hauteur critique théorique et une hauteur expérimentale.

La hauteur critique est ici mesurée au pic du seuil car cette mesure est plus précise.

On crée donc un programme sur Matlab permettant de tracer les courbes de remous. Celles-ci sont obtenues en utilisant la formule :

$$\frac{dh}{ds} = F(h) = I \frac{1 - \left(\frac{h}{h_n}\right)^{-10/3}}{1 - \left(\frac{h}{h_c}\right)^{-3}} \quad (4)$$

On trace ensuite  $F/I$  en fonction de  $h/h_n$ , où  $I$  vaut 0,001, et on obtient :

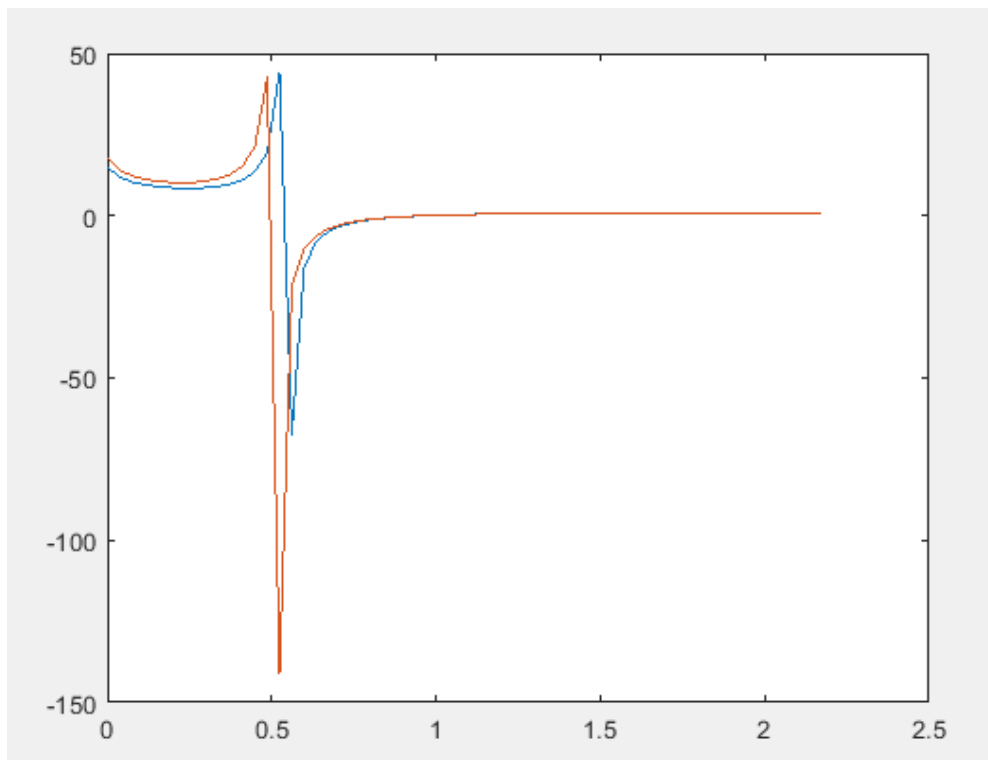


FIGURE 5 – Courbes de remous type M pour  $q = 0.03516$  pour  $h_c$  théorique et expérimental

On observe deux courbes très proches, ce qui est dû à la faible différence de hauteur critique. On reconnaît bien les trois parties M1, M2 et M3. Grâce à ces courbes, on illustre la discontinuité au niveau du ressaut ( $Fr=1$ ) et donc le changement brutal d'un régime torrentiel vers un régime fluvial.

Il est important de préciser que cette courbe montre l'existence possible, dans ce cas précis, d'un ressaut après le seuil. En effet un écoulement cherchera quoi qu'il arrive à atteindre le régime asymptotique ou la pente s'équilibre avec le frottement. Ainsi dans notre cas l'écoulement doit passer par une hauteur d'eau singulière pour  $F(h)$  avant d'atteindre la hauteur normale. Cela démontre donc que l'on peut faire apparaître un ressaut hydraulique entre la fin du seuil et la vanne aval.

### 1.5 Impulsion

L'impulsion se définit grâce à la formule suivante :

$$I(q, h) = \frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \tag{5}$$

Avec  $Q = qL$  le débit linéique,  $h$  la hauteur d'eau, et  $L$  la largeur du canal.

En régime stationnaire, il y a conservation de l'impulsion à travers un ressaut hydraulique à condition de négliger l'action tangentielle du fond sur le fluide en écoulement. Les hauteurs en amont et en aval du ressaut sont appelées des hauteurs conjuguées. Ainsi, à partir du tracé de l'impulsion à débit fixé et de nos mesures de hauteurs d'eau en amont et en aval, on peut vérifier s'il y a bien conservation de l'impulsion.

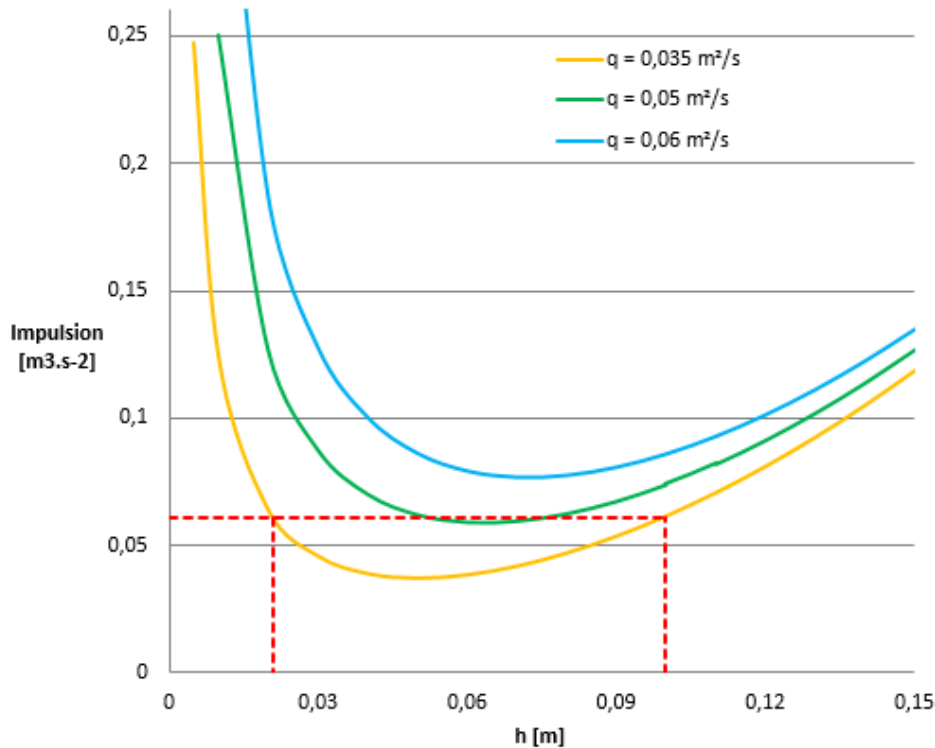


FIGURE 6 – Tracé de l'impulsion pour différents débits fixés

Pour le cas où  $q = 0,035 \text{ m}^2/\text{s}$ , on mesure  $h_{amont} = 0,021 \text{ m}$  et  $h_{aval} = 0,105 \text{ m}$ . Graphiquement, on observe bien qu'il y a conservation de l'impulsion dans le ressaut hydraulique.

D'autre part, on sait que le minimum de l'impulsion est atteint pour une hauteur d'eau égale à la hauteur critique  $h_c$ . On peut donc lire graphiquement que  $h_c = 5,1 \text{ cm}$ .

### 1.6 Courbes caractéristiques

On souhaite maintenant s'intéresser aux caractéristiques en amont et en aval du choc immobile. Pour cela, on détermine d'abord les inverses des pentes de chacune des caractéristiques. On précise que l'on se situe pour le plus petit débit de notre prise de mesure.

Pentes	Amont	Aval
$\lambda_1$	$c_{amont} - U_{amont}$ 2,20	$c_{aval} - U_{aval}$ 1,36
$\lambda_2$	$c_{amont} + U_{amont}$ 1,32	$c_{aval} + U_{aval}$ -0,72



Ces calculs nous permettent alors de tracer les caractéristiques de la forme  $t = t_0 + \frac{x}{\lambda}$ .

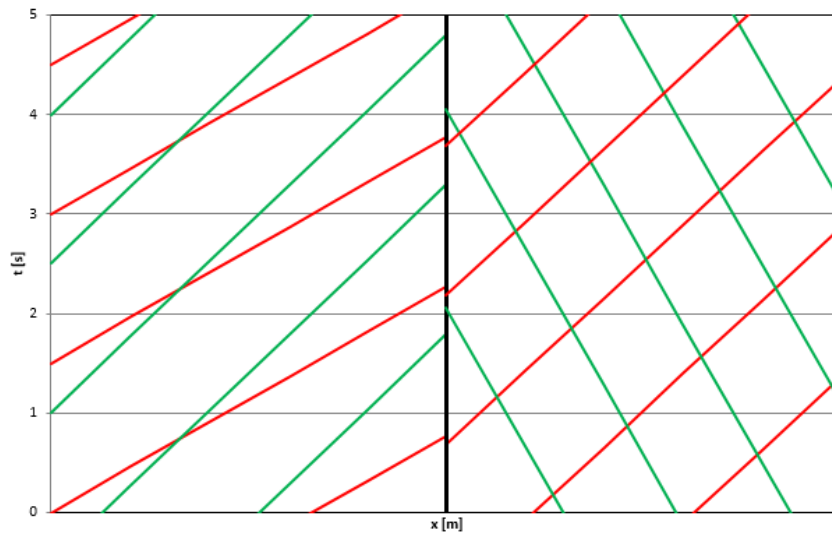


FIGURE 7 – Caractéristiques  $c_1$  (en rouge) et  $c_2$  (en vert) pour un ressaut immobile

## 2 Pertes de charge dans un ressaut

### 2.1 Présentation du phénomène

Un ressaut hydraulique représente la transition entre un régime fluvial et torrentiel. Cette transition se caractérise par une forte turbulence qui crée du frottement dans le fluide et qui entraîne donc une perte de charge singulière. Afin d'avoir accès à la quantification de cette perte de charge, on peut calculer la variation d'énergie spécifique car celle-ci tient compte de la perte de charges singulière dans le ressaut.

### 2.2 Protocole expérimental

Pour un débit fixé, on fait varier la hauteur de la vanne aval afin de stabiliser le ressaut puis on relève la hauteur amont et aval par rapport au ressaut.

La perte de charge pourrait être quantifiée à l'aide de deux tubes de Pitot placés à l'amont et à l'aval du ressaut. Cependant, nous avons choisis une autre méthode qui consiste à **calculer la variation d'énergie spécifique dans le ressaut**.

### 2.3 Présentation des résultats

Pour chaque valeur de débit, nous avons mesuré la hauteur en amont et en aval du ressaut. Les résultats sont reportés dans le tableau suivant :

Débit [L/s]	$h_1$ (amont) [cm]	$h_2$ (aval) [cm]	$E_1$ (amont) [m]	$E_2$ (aval) [m]	$\Delta H$ (m)
15,22	3,6	14	0,181	0,149	0,032
12,5	2,9	12,5	0,17	0,013	0,037
8,3	1,8	10,5	0,19	0,11	0,08
8,79	2,2	10	0,15	0,1	0,05

On remarque que la perte de charge liée au ressaut est de l'ordre de 5 cm.

### Énergie spécifique

On peut voir l'effet des pertes de charge singulières dans le ressaut en s'intéressant à l'énergie spécifique. En effet, en l'absence de perte de charge, l'énergie spécifique pour les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  se conserve. On regarde si ce résultat est vérifié dans la pratique :

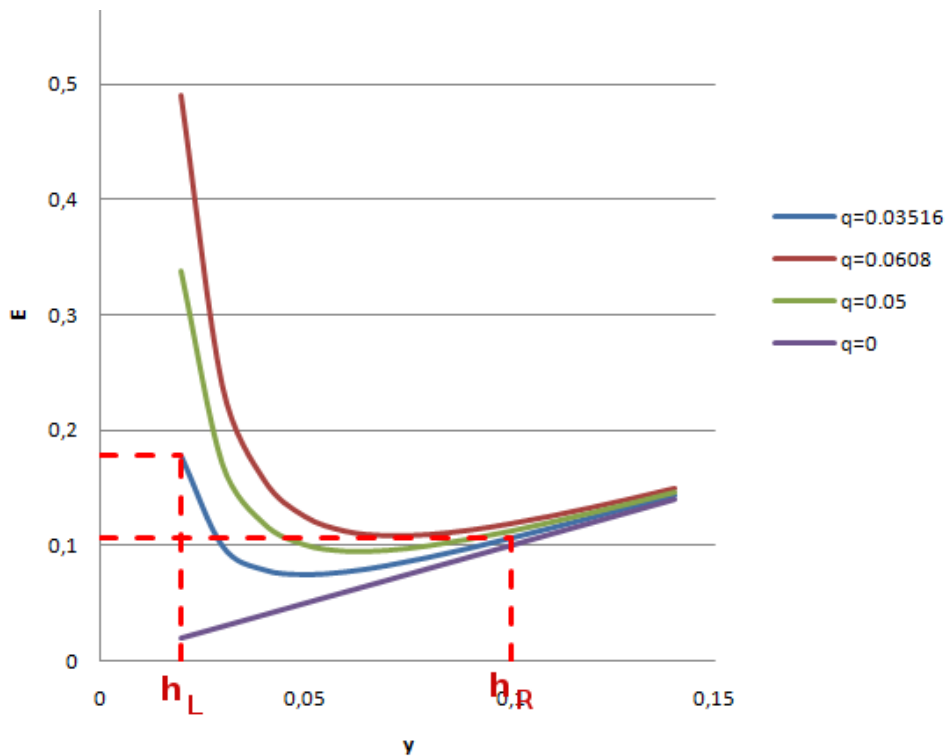


FIGURE 8 – Énergie spécifique pour différents débits étudiés

On remarque que l'énergie spécifique en amont du ressaut est plus importante que celle en aval, ce qui signifie qu'il y a effectivement une perte de charge dans le ressaut.

### 2.4 Analyse des résultats

Il existe une formule théorique donnant la perte de charge dans un ressaut en fonction uniquement des valeurs de  $h_1$  et  $h_2$ . Nous avons comparé nos résultats avec cette formule théorique qui est la suivante :

$$\Delta H = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2} \tag{6}$$

Débit [L/s]	$\Delta H_{exp}$ [m]	$\Delta H_{theo}$ [m]
15,22	0,032	0,057
12,5	0,037	0,061
8,3	0,08	0,104
8,79	0,05	0,055

Les résultats obtenus dans ce tableau nous laisse perplexes. En effet l'erreur varie de 10% à 70%, on peut supposer que cela est dû aux incertitudes lors de la prise des mesures.

Notre objectif était d'observer si il existe une corrélation entre le débit et la perte de charge, cependant nos résultats ne nous permettent pas d'extraire une telle tendance.

### 3 Vitesse de propagation du ressaut

Dans cette partie, on étudie la vitesse de propagation d'un ressaut.

#### 3.1 Protocole expérimental

On se place tout d'abord en régime stationnaire dans le canal avec le seuil et on mesure la hauteur d'eau  $h_1$ . On ferme ensuite brusquement la vanne aval à  $t = 0$  et on observe l'apparition d'un ressaut mobile. Pour différentes positions, on mesure alors le temps que prend le ressaut pour y arriver. On peut alors déterminer la vitesse du ressaut dans chaque section, c'est-à-dire entre deux points de mesure. Enfin, lorsqu'on retrouve un régime stationnaire après le passage du ressaut, on mesure la hauteur d'eau  $h_2$ .

On répète cette manipulation pour trois débits différents afin d'obtenir une plus grande plage de mesures.

#### 3.2 Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques

En utilisant les équations 1 et 2 décrites au début de cet article, où  $h_1$  et  $h_2$  sont connus expérimentalement et  $U_r = 0$ , nous pouvons déterminer la vitesse de propagation du choc théorique :

$$W_{theorique} = \pm \sqrt{g \frac{h_1}{h_2} \frac{h_1 + h_2}{2}} \quad (7)$$

On considère comme vitesse expérimentale du ressaut la moyenne des vitesses mesurées. Le tableau suivant est un résumé comparatif entre les mesures expérimentales et les valeurs théoriques :

Débit linéique [ $m^2/s$ ]	$W_{experimentale}$ [ $m/s$ ]	$W_{theorique}$ [ $m/s$ ]	Écart relatif
0,033	0,30	0,36	17%
0,048	0,44	0,42	5%
0,061	0,48	0,45	7%

On remarque que les écarts relatifs sont assez élevés. Cela peut-être dû au temps de réaction de l'utilisateur du chronomètre mais également à la faible longueur du canal qui ne nous permet pas de prendre beaucoup de mesures.

Ainsi, pour obtenir des résultats plus précis, on répète la même expérience mais en utilisant le deuxième canal qui est plus grand. On obtient alors les résultats suivants :

Débit linéique [ $m^2/s$ ]	$W_{experimentale}$ [ $m/s$ ]	$W_{theorique}$ [ $m/s$ ]	Écart relatif
0,018	0,43	0,45	4,1%
0,065	0,55	0,54	0,7%
0,096	0,75	0,77	2,3%

#### 3.3 Courbes caractéristiques

On trace maintenant les courbes caractéristiques pour le ressaut mobile de la seconde manipulation correspondant à  $q = 0,065 m^2/s$ . Grâce aux mesures des hauteurs d'eau en amont et en aval du ressaut, on détermine les pentes inverses :

Pentes	Amont	Aval
$\lambda_1$	$c_1 - U_1$ -0,77	$c_2 - U_2$ 1,29
$\lambda_2$	$c_1 + U_1$ -2,14	$c_2 + U_2$ -1,29

De plus, le calcul de la vitesse du ressaut à partir des mesures de temps nous permettent de tracer la séparation entre l'écoulement uniforme en amont du ressaut (vers  $x=12$ ) et celui en aval (vers  $x=0$ ). On obtient alors le tracé suivant :

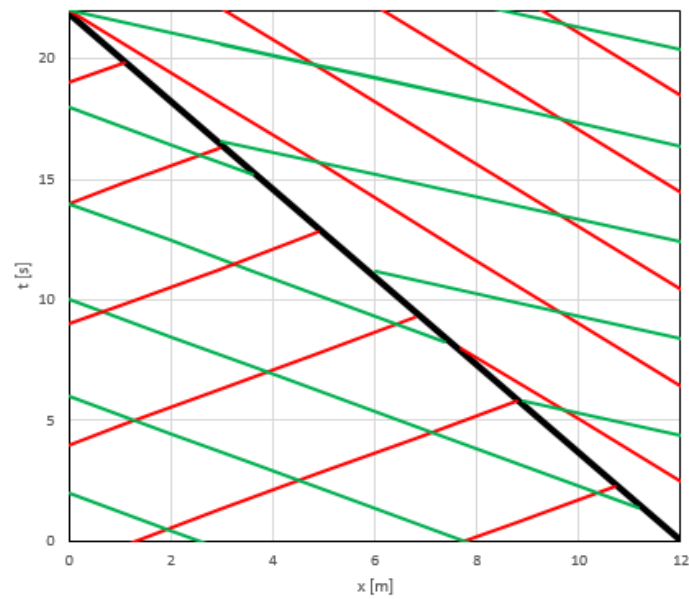


FIGURE 9 – Caractéristiques  $c_1$  (rouge) et  $c_2$  (en vert) pour un ressaut mobile

### 3.4 Variation de la vitesse du ressaut

Nous avons considéré jusque là uniquement la vitesse moyennée du ressaut pour la comparaison avec les expressions théoriques et le tracé des caractéristiques. Grâce aux différents points de mesure on peut tracer l'évolution de la vitesse du ressaut en fonction de l'abscisse,  $0m$  correspondant à la vanne aval.

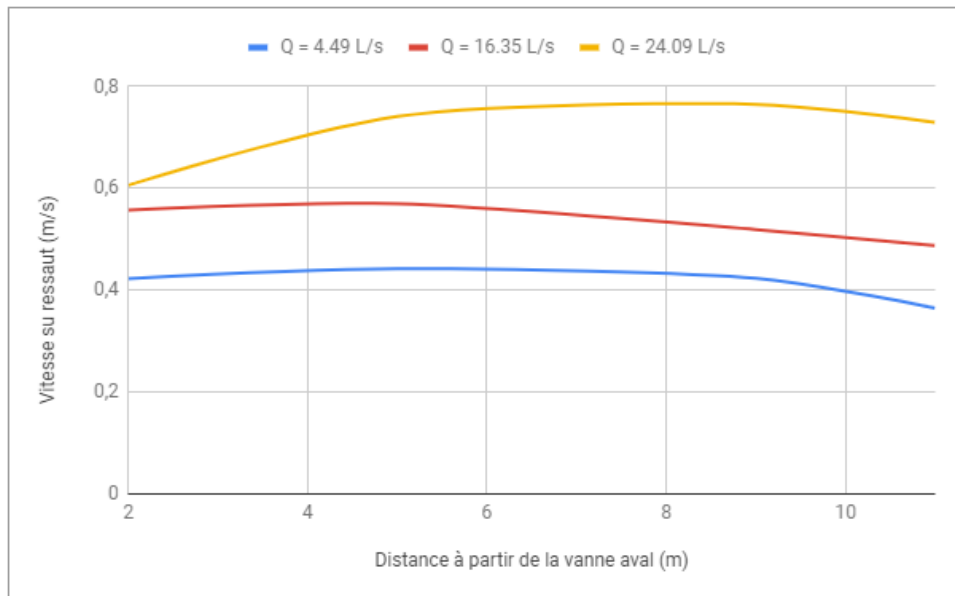


FIGURE 10 – Vitesse de propagation du ressaut en fonction de la distance à la vanne

On remarque que la vitesse du ressaut n'est pas constante tout au long de sa propagation. Tout d'abord le ressaut accélère, puis a une vitesse constante sur une distance allant jusqu'à  $5m$  et enfin sa vitesse diminue. Bien que les plus grands écarts de vitesse sont de l'ordre de  $10\%$  à  $15\%$  pour les débits que l'on a considérés au cours de cette étude ( $< 17L/s$ ), il nous a paru pertinent de notifier cette variation de vitesse.

## Conclusion

Ce projet expérimental nous a permis de mettre en évidence le phénomène de "ressaut hydraulique".

Dans un premier temps, nous avons étudié le ressaut stationnaire en s'intéressant particulièrement aux lignes d'eau, à l'énergie spécifique, au nombre de FROUDE qui caractérise le régime d'écoulement mais aussi aux courbes de remous illustrant le changement brutal d'un régime torrentiel vers un régime fluvial.

Ensuite, nous nous sommes intéressé.e.s au phénomène de la perte de charge dans le but d'identifier une relation entre cette dernière et le débit. Cependant, cet objectif n'a pas été atteint.

Finalement, pour la vitesse de propagation du ressaut nous avons comparé la vitesse théorique et expérimentale dans les deux canaux et nous avons tracé les caractéristiques.

## Références

Willi H. HAGER. *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*, volume 8. Springer Netherlands, first edition, 1992.