Projet expérimental - Hydraulique à surface libre

Institut National Polytechnique de Toulouse

ENSEEIHT 2A MFEE

Version du 9 avril 2019

Table des matières

I Généralités sur le ressaut hydraulique généré par la tuyère de Laval 5
I.1 Création d'un ressaut hydraulique 5
I.2 Description des montages expérimentaux 5
I.3 Profil de hauteur d'eau dans la tuyère de Laval 6

II Analyse des mesures réalisées 10
II.1 Conservation de la charge spécifique et détermination des hauteurs critiques : 10
II.2 Profil de l'écoulement 12
II.3 Mesure expérimentale du débit et comparaison avec le théorique 13
II.4 Calcul de la hauteur critique - hors tuyère 14

III Influence de la pente 14
III.1 Position du ressaut 14
III.2 Énergie Spécifique 15
III.3 Pertes de charge 16

IV Influence de la rugosité 18

Table des figures

1 Montage expérimental et mise en eau 6
2 Profil de hauteur dans la tuyère, $H_{vanne} = 78$, $H_{réel} = 79.91$ 7
3 Profil de hauteur dans la tuyère, $H_{vanne} = 82$, $H_{réel} = 80.63$ 8
4 Profil de la tuyère, vue du dessus 9
5 Vue du dessus de la tuyère lors du déclenchement du ressaut 9
6 Représentation de l'écoulement observé 10
7 Fonction H en fonction de la charge spécifique et de la hauteur d'eau . . . 11
8 Profil des vitesses dans le grand canal avec tuyère 12
9 Débit linéique en fonction de la hauteur critique 13
10 Distance entre le ressaut et la tuyère en fonction de la pente 15
11 Perte d'énergie spécifique dans le ressaut en fonction de la pente 16
12 Perte de charge dans le ressaut en fonction de la pente 16
13 Tapis de rugosité dans la tuyère avant ressaut 18
14 Tapis de rugosité et déclenchement du ressaut 18
15 Mise en place du tapis de rugosité 19

Introduction

Ce rapport relate notre projet expérimental qui illustre des notions d'hydraulique à surface libre vues dans le cours de Mr. Thual.

L'objectif des trois séances en salle de travaux pratique à l'Enseeiht a été d'une part, de se familiariser avec le canal et d'autre part de s'intéresser à des phénomènes d'hydraulique à surface libre.

Pour notre projet, nous avons décidé de nous intéresser à l'écoulement en présence d'une tuyère de Laval.

L'idée de notre étude était de mettre en avant l'influence de la rugosité sur un ressaut hydraulique généré par le rétrécissement de la tuyère de Laval.
Pour cela, nous avons étudié dans un premier temps ce phénomène sans rugosité. De cette façon nous avons pu mettre en lien nos observations en pratique avec une analyse plus théorique des notions d'hydraulique à surface libre.

Étudier l'influence de la rugosité nécessite l'utilisation de tapis difficile à mettre en place expérimentalement. C'est la raison pour laquelle nous avons mené une étude en parallèle qui concerne l'influence de la pente sur le ressaut hydraulique généré par la tuyère de laval.

I Généralités sur le ressaut hydraulique généré par la tuyère de Laval

I.1 Création d'un ressaut hydraulique

Un ressaut hydraulique peut être observé dans un écoulement à surface libre qui subit un changement de vitesse ou de hauteur. L'écoulement passe alors de fluvial à torrentiel, ou inversement. Le ressaut hydraulique survient alors lors de ce changement de régime. Il peut être stationnaire, ou mobile.
Les ressauts hydrauliques sont généralement créés par des écoulements au dessus d'un obstacle, ou au travers d'une tuyère.

Afin de pouvoir déterminer si l'écoulement est fluvial ou torrentiel, nous utilisons le nombre de Froude. Ce nombre adimensionnel permet de comparer les effets d'inertie de l'écoulement aux effets de la gravité.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \tag{1}$$

où U est la vitesse de l'écoulement (m/s), g est l'accélération de la pesanteur (m/s^{-2}) et h la hauteur de l'écoulement (m).

Si $Fr = 1$, alors l'écoulement est critique, et la hauteur d'eau est égale à la hauteur critique : $h = h_C$.

Si $Fr < 1$, alors les effets de la gravité sont plus importants que les effets d'inertie. L'énergie potentielle est donc dominante devant l'énergie cinétique. L'écoulement est "fluvial" et est qualifié de "sous-critique".

Si $Fr > 1$, alors les effets d'inertie sont dominants par rapport aux effets de la gravité. L'énergie cinétique est donc prédominante devant l'énergie potentielle. L'écoulement est torrentiel et est qualifié de "super-critique".

La hauteur d'eau est donc plus grande dans le cas fluvial que torrentiel, et la vitesse plus importante dans le cas torrentiel que fluvial.

I.2 Description des montages expérimentaux

Dans nos expériences, nous avons utilisé le petit et le grand canal de la salle B005 de l'ENSEEIHT. Nous allons nous intéresser à l'étude d'un ressaut hydraulique obtenu avec une tuyère de Laval (voir 1) dont la largeur au col est $L_r = 17cm$. Les deux canaux ont une largeur $L_a = 25cm$.

FIGURE 1 – Montage expérimental et mise en eau

Dans le petit canal, le débit est réglable à l'aide d'une vanne manuelle, et a une valeur maximale de $Q = 25L/s$. La valeur du débit est donnée par un débimètre. La hauteur d'eau en aval du canal est modulable grâce une vanne manuelle.

Le grand canal est équipé d'une pompe permettant d'atteindre un débit de $Q = 25L/s$. Deux vannes, une en amont et une en aval, permettent de réguler la hauteur d'eau dans le canal. Elles sont réglables à distance à partir d'un ordinateur.

I.3 Profil de hauteur d'eau dans la tuyère de Laval

Nous avons mesuré le profil de hauteur dans la tuyère de Laval, à une hauteur de vanne en amont caractéristique du torrentiel puis juste avant que le ressaut ne se crée (TABLE 1). En faisant cette manipulation la hauteur critique au rétrécissement maximum de la tuyère, c'est-à-dire pour L_r est déterminée.

Distance (cm)	Hauteur d'eau (cm)
-20	5.9
-10	5.6
0 (début tuyère)	5.7
10	5.55
20	6.5
30	8.2
40	10.1
50	10.8
60	9.9
70	9.2
80	9.5
90	9.1
100	8
110	7
120	6.6
130	7.1
140	7.2

TABLE 1 – Hauteurs d'eau et distances selon x correspondantes, bien avant le déclenchement du ressaut, $H_{vanne} = 78$, $H_{réel} = 79.91$

Nous avons tracé le profil de hauteur d'eau correspondant (FIGURE 2). On voit qu'il y a une nette augmentation de la hauteur d'eau lors du passage dans la tuyère.

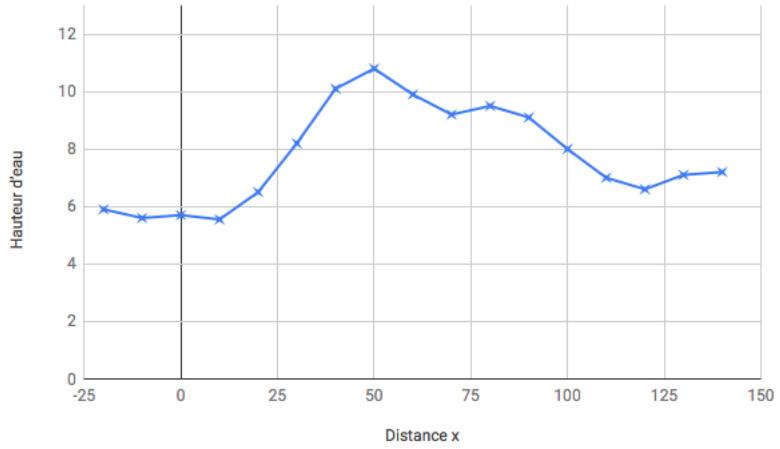

FIGURE 2 – Profil de hauteur dans la tuyère, $H_{vanne} = 78$, $H_{réel} = 79.91$

Nous traçons maintenant ce même profil de hauteur d'eau pour une ouverture de vanne juste avant que le ressaut ne se déclenche dans la tuyère (TABLE 2). D'après nos expériences, pour un débit en entrée de $21L.s^{-1}$, le ressaut se déclenchait avec une ouverture de vanne de consigne $H_{vanne} = 84cm$, ce qui correspond à $H_{réel} = 82.43cm$. Le temps de réponse était très long, le ressaut ne se déclenchait qu'à partir de $2min41s$ après la consigne envoyée à la vanne. Je rappelle ici que notre tuyère se trouve à $130cm$ en aval de la vanne pour toutes nos expériences.

Distance (cm)	Hauteur d'eau (cm)
-20	5.4
-10	5.6
0 (début tuyère)	5.9
10	6
20	7
30	8.4
40	9.6
50	10.2
60	10.2
70	**12.25**
80	9.5
90	8.6
100	8.5
110	7.6
120	7.4
130	7.4
140	6.8

TABLE 2 – Hauteurs d'eau et distances selon x correspondantes, avant déclenchement du ressaut, $H_{vanne} = 82$, $H_{réel} = 80.63$

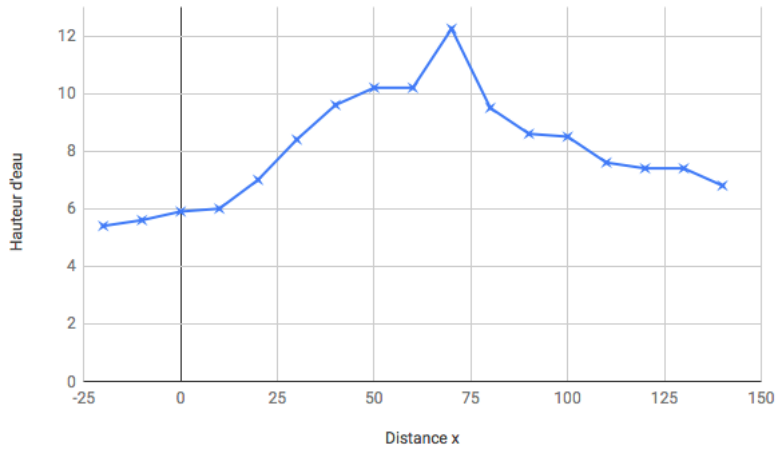

FIGURE 3 – Profil de hauteur dans la tuyère, $H_{vanne} = 82$, $H_{réel} = 80.63$

Nous constatons rapidement qu'un pic se prononce à $70cm$ dans la tuyère, où la hauteur d'eau est à son maximum (FIGURE 3). La hauteur d'eau est alors la hauteur critique h_{cr} à ce point là : en effet, c'est à ce niveau et à cette hauteur d'eau que le changement torrentiel/fluvial va s'opérer. On réutilisera la hauteur critique h_{cr} dans la suite de nos calculs en II.1.

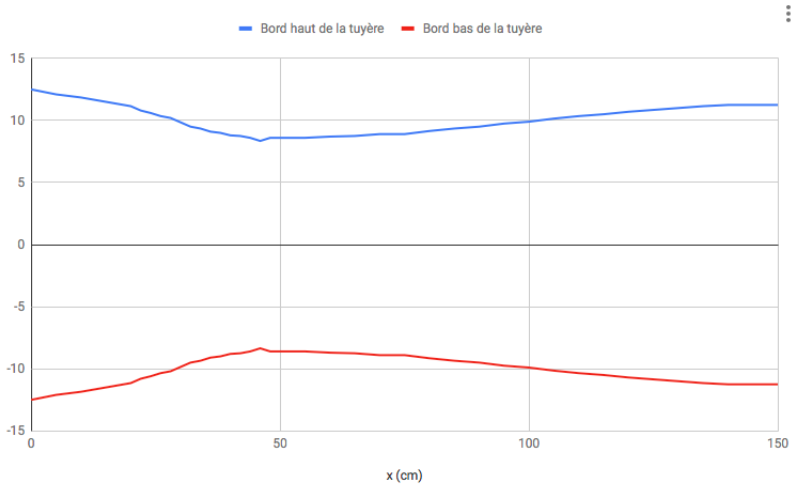

FIGURE 4 – Profil de la tuyère, vue du dessus

En comparant avec le profil de la tuyère (FIGURE 4), on voit nettement que le ressaut se déclenche bien au rétrécissement maximum de la largeur du canal, L_r. Notre point de mesure le situe à $70cm$, c'est-à-dire légèrement après le rétrécissement maximum situé à $50cm$ d'après notre profil de tuyère.

Le ressaut se déclenche comme ci-dessous dans notre tuyère.

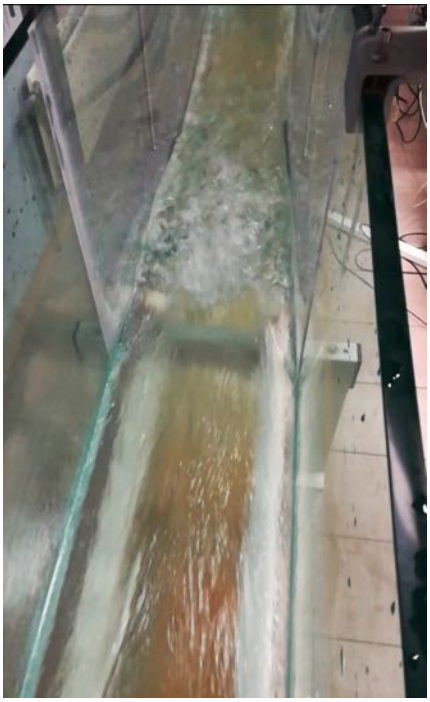

FIGURE 5 – Vue du dessus de la tuyère lors du déclenchement du ressaut

II Analyse des mesures réalisées

II.1 Conservation de la charge spécifique et détermination des hauteurs critiques :

Cette partie consiste à retrouver les valeurs théoriques des hauteurs d'eau de part et d'autre de la vanne ainsi qu'à déterminer la hauteur critique au niveau du point de mesure de la hauteur d'eau. Pour cette étude, nous avons réalisé nos mesures dans le grand canal.

D'une part et d'autre part de la vanne en amont, les hauteurs h_v et h_1 sont mesurées (Figure 10).

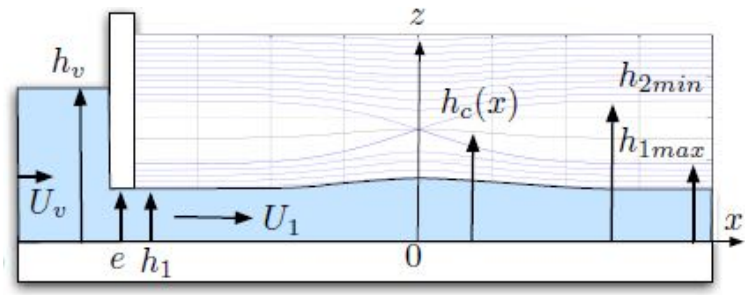

Figure 6 – Représentation de l'écoulement observé

Lors de nos expériences, nous avons fixé la hauteur de la vanne $e = 8cm$. Les variations de hauteurs d'eau en sortie de la vanne font que la hauteur réelle d'eau présente est de $h_1 = 5.2cm$.
Quant à la hauteur d'eau en amont de la vanne, h_V vaut 19.2 cm.

Ces deux hauteurs h_V et h_1 sont des hauteurs conjuguées. En effet, en négligeant la perte de charge autour de la vanne, il y a conservation de la charge spécifique E. Nous allons donc retrouver ces valeurs théoriquement.

Dans un premier temps, nous avons besoin du débit linéique afin de calculer la charge spécifique, dont la formule est présentée ci-dessous.

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

La formule est utilisée avec la hauteur d'eau h_1. Connaissant le débit expérimental Q=21L/s et la largeur du canal au niveau de la mesure de h_1, $L_a = 25cm$, nous obtenons q=0.088cm. Ce qui nous permet de connaître E=0.185.

Nous allons désormais utiliser le graphique suivant (Figure 7), qui représente la fonction H en fonction de E et h.

$$H(E,h) = hc(x) = 2^{\frac{1}{3}} h^{\frac{2}{3}} (E-h)^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

Cela va nous permettre de retrouver les hauteurs conjuguées, la hauteur critique à la position x où la mesure de h_1 a été effectuée, notée h_{ca} et la hauteur critique au centre de la tuyère notée h_{cr}.

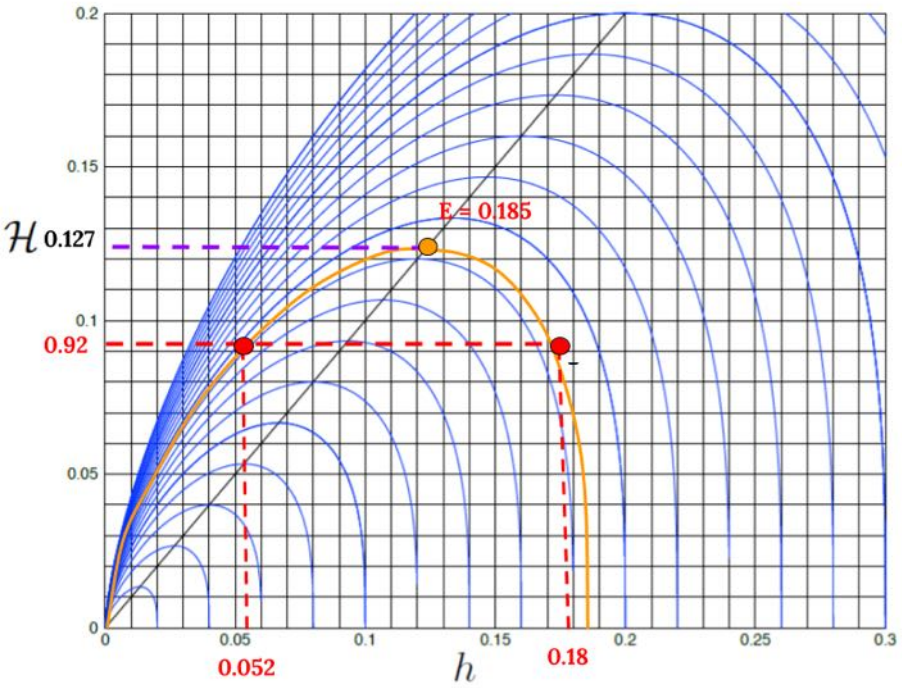

FIGURE 7 – Fonction H en fonction de la charge spécifique et de la hauteur d'eau

Grâce à cette figure, nous pouvons lire la hauteur conjuguée de h_1 ainsi que h_{ca}. Nous pouvons également calculer une valeur expérimentale de h_{ca} grâce à la formule suivante car nous connaissons $h_{cr} = 12.25cm$:

$$h_c(x) = h_{cr}(\frac{L_r}{L(x)})^{\frac{2}{3}} \tag{4}$$

Récapitulatif :

	Expérimental (cm)	Théorique (cm)
h_1	5.2	/
h_v	19.2	18
h_{ca}	9.47	9.2
h_{cr}	12.25	12.7

TABLE 3 – Comparaison des valeurs théoriques et expérimentales

Il est possible de constater que les valeurs expérimentales et théoriques sont proches. Le léger écart peut être dû à la différence de hauteur d'eau que nous obtenons expérimentalement entre e et h_1. En effet, dans la théorie, la valeur de e est égale à celle h_1, cela peut donc fausser légèrement nos valeurs. De plus, d'une manière générale, on s'attend à une différence entre l'expérience et la théorie. Il y a beaucoup d'approximations de mesure et de lecture dans nos calculs : d'une part nos mesures se font à l'oeil, d'autre part, beaucoup de systèmes de mesures ont été difficiles à mettre en oeuvre. La petite hélice qui nous sert pour la mesure de vitesse a dû être tenue par manque de support par exemple. Nous avons compensé cela en prenant les mêmes personnes pour les mesures et donc induire les mêmes erreurs.

II.2 Profil de l'écoulement

Dans cette section, nous allons établir le profil de l'écoulement dans le grand canal équipé d'une tuyère de Laval.

Tout d'abord, nous pouvons définir la charge hydraulique moyenne telle que :

$$H(s) = \frac{P_*(s)}{\rho g} + \alpha(s) \cdot \frac{U^2(s)}{2g} \tag{5}$$

où $\alpha(s) = \frac{1}{U^2(s)} \frac{1}{A(s)} \iint_A U^2 dS$

Lorsque $\alpha = 1$, l'écoulement est qualifié de "turbulent". Cela signifie alors que le champ de vitesse est uniforme sur une section du canal.
Nous avons voulu vérifier si l'écoulement était bien turbulent en vérifiant si $\alpha = 1$.

Pour cela, nous avons mesuré la vitesse de l'écoulement dans le grand canal dans lequel était installée la tuyère de Laval. Les mesures de vitesses ont été réalisées grâce à un moulinet mesurant la vitesse de l'écoulement. Celui ci nous donne une valeur en fréquence, que nous pouvons convertir en vitesse en m/s à l'aide de la courbe de tarage.
Nous avons mesuré les vitesses en différents points x : avant la tuyère, dans la tuyère, puis après la tuyère ; ainsi que pour différentes hauteurs d'eau.
A l'aide de Matlab (fonction QUIVER), nous pouvons tracer les profils de vitesses en différentes positions du canal (FIGURE 8).

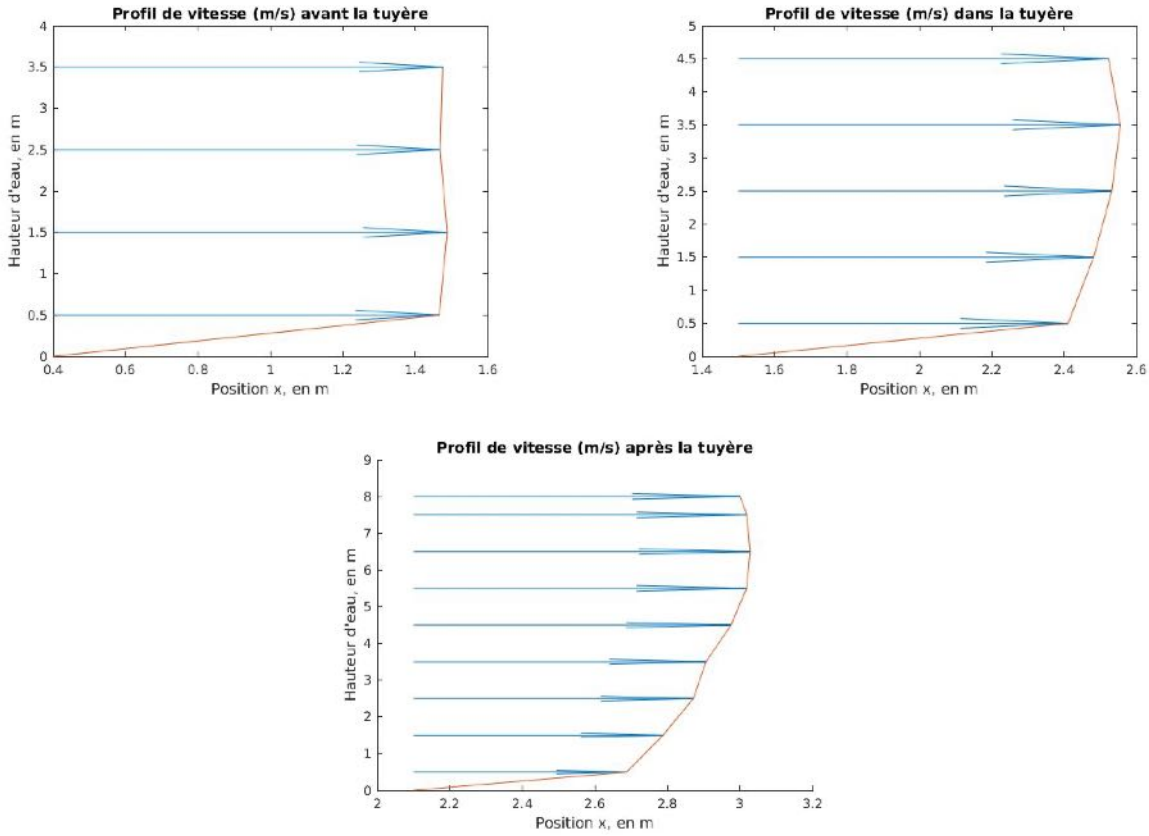

FIGURE 8 – Profil des vitesses dans le grand canal avec tuyère

Nous pouvons alors observer qu'avant la tuyère, l'écoulement semble uniforme sur la section. Nous pouvons donc dire que $\alpha = 1$, donc que l'écoulement est bien turbulent. Cependant, nous remarquons que les profils de vitesses dans la tuyère et à la sortie de la tuyère ne sont pas uniformes sur la section. Nous pouvons donc les assimiler à des cas laminaires, c'est-à-dire que $\alpha = 1.2$.

Or, nous aurions du obtenir uniquement des écoulements turbulents car le nombre de Reynolds est de l'ordre de 10^5.
Nous pensons que cela est du aux erreurs de lecture des fréquences données par le moulinet. En effet, les fréquences fluctuaient de manière assez conséquente, nous avons essayé de prendre la moyenne de ces valeurs, mais cela reste approximatif.

II.3 Mesure expérimentale du débit et comparaison avec le théorique

Dans cette partie, nous cherchons à retrouver notre débit d'entrée de 21 L/s grâce aux différentes valeurs relevées durant nos expériences.
L'ouverture de la vanne amont est de 8 cm. Pour cette ouverture de vanne, nous observons un changement de régime dans la tuyère, nous passons de torrentiel à fluvial ce qui crée un ressaut. Nous avons donc mesuré la hauteur de ce ressaut, notée h_{cr}, qui correspond à la hauteur critique pour une position donnée, ici le centre de la tuyère. $h_{cr} = 12.25cm$

Afin de retrouver le débit nous pouvons utiliser la formule suivante :

$$h_c(x) = g^{\frac{-1}{3}} L_x^{\frac{-2}{3}} Q^{\frac{2}{3}} \tag{6}$$

Nous connaissons h_{cr} et L_r, nous pouvons donc calculer Q. Nous obtenons alors Q=23L/s. Il est possible de retrouver cette valeur graphiquement grâce à la FIGURE 9, qui donne le débit linéique pour une hauteur d'eau critique donnée :

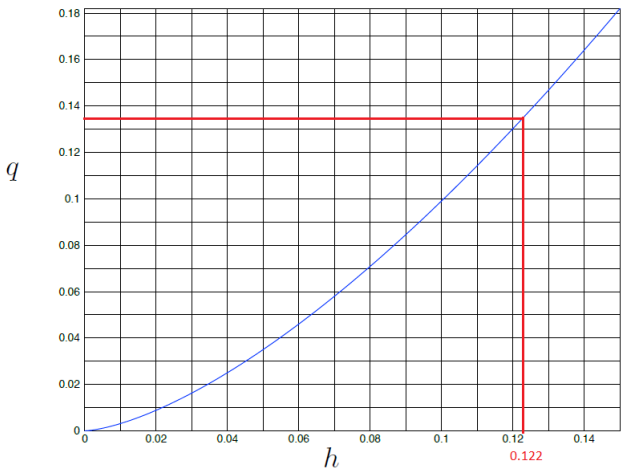

FIGURE 9 – Débit linéique en fonction de la hauteur critique

Nous obtenons le débit linéique suivant $q = 0.134m^2/s$. Il suffit de le multiplier par la largeur du canal L_r et nous retrouvons le débit Q=23L/s.

Il est possible de remarquer une différence entre la valeur théorique (23L/s) et expérimentale (21L/s). Cela peut venir du fait que le débit qu'envoie la pompe n'est pas exactement le débit qui entre dans notre canal mais également de la précision de l'affichage du débit et de notre lecture.

II.4 Calcul de la hauteur critique - hors tuyère

Nous allons à présent déterminer la hauteur critique dans le petit canal, en dehors de la tuyère de Laval.
Nous nous sommes placés à un débit tel que $Q = 4,2L/s$. Le débit linéique est donc de : $q = \frac{Q}{L} = 0,0168m^2.s^{-1}$.

La hauteur critique est donnée par la relation :

$$h_c = (\frac{q^2}{g})^{1/3} \tag{7}$$

En considérant $q = 0,0168m^2/s$ et $g = 9,81m.s^{-2}$, nous obtenons $h_c = 3,06cm$.

En effectuant plusieurs relevés de hauteurs d'eau dans le petit canal, et en faisant varier la pente, nous avons pu vérifier que la hauteur en amont du ressaut était bien inférieure à $h_c = 3cm$.

III Influence de la pente

Dans cette partie, nous souhaitons étudier l'influence de la pente du canal sur l'écoulement et notamment sur la formation du ressaut. Nous nous plaçons dans le petit canal de la salle B005, sur lequel on peut modifier la pente. Nous positionnons une tuyère de Laval dans le canal un peu en aval d'un seuil épais.

Dans un premier temps, nous avons étudié l'influence de la pente sur la position du ressaut et dans un second temps nous nous sommes concentrés sur l'énergie perdue dans le ressaut. Nous avons alors pris des mesures pour une pente I pour $I \in [1.3\%; 2.6\%]$.

III.1 Position du ressaut

Nous avons voulu observer l'évolution de la position du ressaut stationnaire à l'amont de la tuyère en fonction de la pente. Ainsi, nous avons pris des mesures de distance, entre le milieu du ressaut et l'amont de la tuyère. On observe son évolution sur la Figure 10. Le ressaut se forme entre un seuil épais à l'amont et la tuyère à l'aval.

On remarque alors que plus la pente est importante, plus le ressaut est proche de la tuyère.

En effet, la hauteur normale h_n, est donnée par la relation suivante :

$$h_n = (\frac{q^2}{K_s^2 I})^{\frac{3}{10}} \tag{8}$$

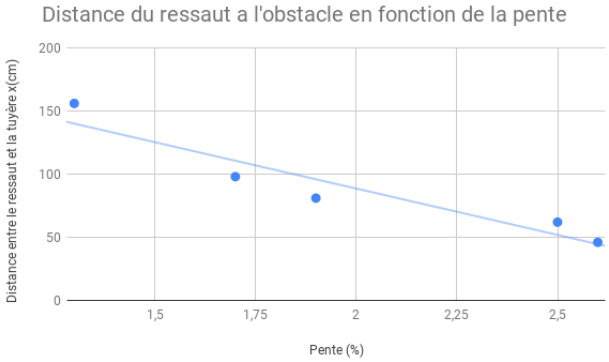

FIGURE 10 – Distance entre le ressaut et la tuyère en fonction de la pente

Cela traduit le fait que lorsque la pente I, augmente, la hauteur normale h_n diminue. Or, plus la hauteur d'eau est faible plus le ressaut a "du mal" à se former et donc plus il va se former loin de l'obstacle (l'obstacle est un seuil épais placé en amont).
Plus il se forme loin du seuil épais, plus il va se former près de la tuyère.

III.2 Énergie Spécifique

Dans un second temps, nous avons mesuré les hauteurs d'eau en amont et en aval du ressaut pour pouvoir calculer l'énergie spécifique à ces positions. Au passage d'un obstacle et si on néglige les frottements, l'énergie spécifique se conserve. Néanmoins, dans le cas réel, ces approximations ne sont plus valables et on ne peut plus négliger les frottements du fluide sur la paroi. On ne peut donc plus dire que l'énergie spécifique se conserve au passage d'un obstacle. On définit alors ΔE, la perte d'énergie spécifique.

L'énergie spécifique est donnée par l'équation suivante :

$$E(q,h) = h + \frac{U^2}{2g} = h + \frac{q^2}{2h^2 g}$$

La perte d'énergie spécifique est obtenue en faisant la différence $\Delta E = E_{amont} - E_{aval}$, les résultats sont récapitulés dans la TABLE 4.

Expérience	Pente (%)	$E_{amont}(m)$	$E_{aval}(m)$	$\Delta E(cm)$
1	1,3	0,048	0,064	0,016
2	1,7	0,05	0,066	0,016
3	1,9	0,056	0,068	0,012
4	2,5	0,056	0,070	0,014
5	2,6	0,056	0,067	0,011

TABLE 4 – Pertes d'énergie spécifique dans le ressaut

On représente cette perte d'énergie spécifique en fonction de la pente sur la FIGURE 11.

On remarque que la perte d'énergie spécifique, ne varie pas en fonction de la pente. En effet, de petites variations (dues aux erreurs de mesures) sont présentes, mais globalement, elle ne semble pas dépendre de la pente (sur la petite plage de pente sur laquelle on a effectué les valeurs).

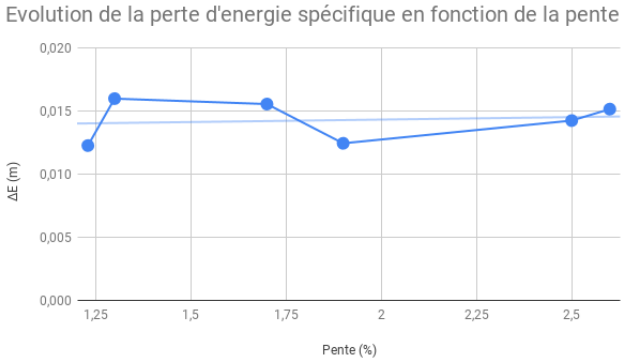

FIGURE 11 – Perte d'énergie spécifique dans le ressaut en fonction de la pente

III.3 Pertes de charge

Nous n'avons pas pu mesurer les pressions dynamiques dans le cadre de cette expérience car les hauteurs d'eau à l'amont du ressaut étaient trop faibles.
Il est tout de même intéressant de voir l'évolution de la perte de charge dans le ressaut en fonction de la pente. Ainsi nous avons calculé les pertes de charges à partir des hauteurs d'eau en aval et en amont grâce à la formule suivante :

$$\Delta H = \frac{(h_r - h_l)^3}{4 * h_r * h_l} \tag{9}$$

Nous n'avons pas vérifié la véracité de cette formule dans notre étude mais nous l'avions démontrée dans un TP en première année dans le cas d'un ressaut formé à partir d'un seuil épais.

A partir des hauteurs d'eau, nous avons donc calculé les pertes de charge ΔH. La FIGURE 12 illustre l'évolution des pertes de charge en fonction de la pente.

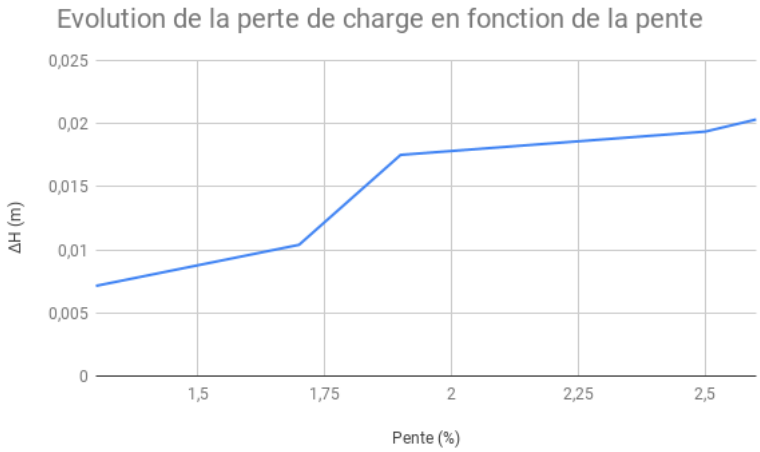

FIGURE 12 – Perte de charge dans le ressaut en fonction de la pente

On a alors remarqué expérimentalement que la perte de charge à travers le ressaut augmentait lorsque la pente augmentait.

Essayons de démontrer cette observation en calculant la perte de charge entre la position x_1, en amont du ressaut et x_2, en aval du ressaut. En effet, la dérivée de la charge H le long du canal est directement reliée à la perte de charge linéique J par la formule suivante :

$$\frac{dH}{dx} = -J \tag{10}$$

La perte de charge linéique J s'exprime de la façon suivante : $J = I(\frac{h}{h_n})^{\frac{-10}{3}}$. Ainsi :

$$\int_{x_1}^{x_2} dH = \int_{x_1}^{x_2} -Jdx$$

$\Leftrightarrow \Delta H = \int_{x_2}^{x_1} dH = \int_{x_1}^{x_2} I(\frac{h}{h_n})^{\frac{-10}{3}} dx$

$\Leftrightarrow \Delta H = \int_{x_1}^{x_2} I(\frac{h}{h_n})^{\frac{-10}{3}} dx$

$\Leftrightarrow \Delta H = I h_n^{\frac{10}{3}} \int_{x_1}^{x_2} h^{\frac{-10}{3}} dx$

$\Leftrightarrow \int_{x_1}^{x_2} dH = \int_{x_1}^{x_2} -Jdx$

Donc :

$$\Delta H = \int_{x_2}^{x_1} dH = \int_{x_1}^{x_2} I(\frac{h}{h_n})^{\frac{-10}{3}} dx$$

$\Leftrightarrow \Delta H = \frac{q^2}{K_s^2}(\int_{x_1}^{x_1'} h^{\frac{-10}{3}} dx + \int_{x_1'}^{x_2'} h^{\frac{-10}{3}} dx + \int_{x_2'}^{x_2} h^{\frac{-10}{3}} dx)$

On sépare l'étude en trois intégrales distinctes, en amont du ressaut $[x_1, x_1']$, dans le ressaut $[x_1', x_2']$ et après le ressaut $[x_2', x_2]$.

En considérant que la pente augmente, le terme en $\frac{q^2}{K_s^2}$ reste constant. De plus, lorsque la pente augmente, la hauteur d'eau en amont du ressaut diminue et la hauteur en aval augmente. La variation de hauteur en aval sont plus importantes que les variations de hauteur en aval.

Pour simplifier l'étude on va supposer que :

— La variation de $\int_{x_1'}^{x_2'} h^{\frac{-10}{3}} dx$, pour deux pentes différentes et "nulle"

— La variation de $\int_{x_2'}^{x_2} h^{\frac{-10}{3}} dx$ pour deux pentes différentes est négligeable devant la variation de $\int_{x_1}^{x_1'} h^{\frac{-10}{3}} dx$. En effet, puisque les hauteurs sont plus importantes, à la puissance $\frac{-10}{3}$ elles deviennent plus faibles et donc la variation, elle aussi est plus faible.

Finalement on obtient l'approximation suivante :

$$\Delta H \approx \frac{q^2}{K_s^2} \int_{x_1}^{x_1'} h^{\frac{-10}{3}} dx \tag{11}$$

Ainsi, lorsque que la pente I augmente et puisque la hauteur d'eau diminue, $h^{\frac{-10}{3}}$, augmente et ainsi ΔH, la perte de charge augmente et on retrouve bien la tendance obtenue expérimentalement.

IV Influence de la rugosité

Pendant les deux séances de travaux pratiques, nous nous sommes intéressés à l'influence de la rugosité sur le ressaut hydraulique avec la tuyère de Laval.

L'objectif était de vérifier que la position de formation du ressaut hydraulique (passage de torrentiel à fluvial) était différente selon la rugosité du fond.

Nous avons donc mené dans un premier temps l'expérience sans tapis de rugosité. En se plaçant en torrentiel en amont et en aval de la tuyère, nous montions progressivement la vanne amont jusqu'à créer un ressaut hydraulique (voir photo ci dessous). On note, à ce moment-là, la position à laquelle se ressaut s'est créé. Il s'agissait de refaire cette même expérience en imposant une rugosité connue dans le fond du canal. On s'attendait en faisant cette manipulation à créer le ressaut à une position différente.

En pratique, nous avions à notre disposition des tapis de rugosité connue que nous avons essayé de placer sur le fond du grand canal en la maintenant sous la tuyère.

Figure 13 – Tapis de rugosité dans la tuyère avant ressaut

Figure 14 – Tapis de rugosité et déclenchement du ressaut

Nous avons fait plusieurs tentatives pour placer le tapis de rugosité. La hauteur du tapis était du même ordre de grandeur que la hauteur d'eau, cela déformait trop la surface libre et le ressaut se déclenchait au niveau du bord du tapis (Figures 13 et 14). Pour palier à cet effet nous aurions dû prendre un débit plus élevé de sorte à lever davantage la vanne avant que le ressaut ne se déclenche, cela aurait permis d'avoir une hauteur d'eau plus élevée et le ressaut ne se serait pas déclenché au dessus de la marche créée par le tapis.

Il se serait déclenché dans la tuyère comme convenu. Cependant, nous étions bloqués par un débit de $21L.s^{-1}$ à la pompe.

C'est la raison pour laquelle nous avons pris par la suite un tapis de rugosité plus long. Cependant, nous n'avons pas pu trouver le moyen de fixer le tapis au fond du canal, nous obtenions un soulèvement sur la partie non fixée par la tuyère comme en témoigne la Figure 15.

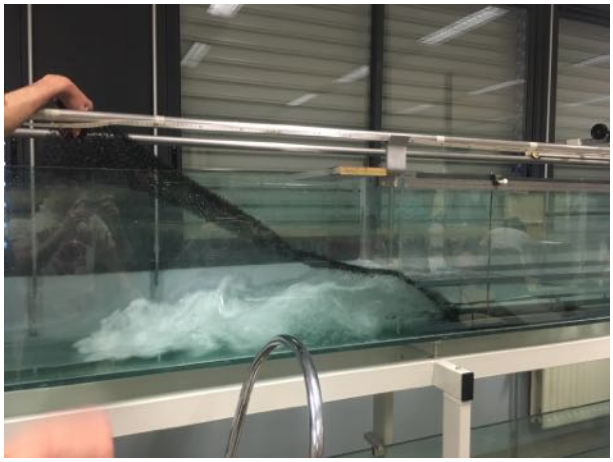

Figure 15 – Mise en place du tapis de rugosité

Conclusion

Nous avons donc eu une première approche de la tuyère de Laval dans un canal hydraulique par l'intermédiaire de ce projet. L'approche très constructive de ce dernier a été totalement différente de nos précédents travaux. Nous avons pu choisir notre sujet et nous répartir les tâches sur les deux séances. La liberté du sujet nous a confronté à différents problèmes, notamment nos premières intentions qu'étaient de quantifier l'influence de la rugosité, mais nous avons su rebondir et se tourner vers une autre analyse de nos mesures. L'analyse de l'influence de la pente sur la position a remplacé notre travail sur la rugosité.

Les principaux liens entre la théorie et l'expérience concernant la tuyère de Laval ont été retrouvés. Des valeurs similaires pour h_{ca}, h_{cr}, les hauteurs conjuguées et le débit sont vérifiées. On a constaté, comme on aurait pu l'attendre, de légères variations dues à nos approximations de mesure.