

Thème : Transport

# Maîtrise du ressaut hydraulique dans un canal

Camille COLAS

N° 9665

# Introduction

Direction de propagation de la vague



Sens du courant du fleuve



Sens du courant du fleuve

Image 1 : Baie du Morecambe, Royaume Uni

Image 3 : Ressaut hydraulique dans l'aménagement d'un canal

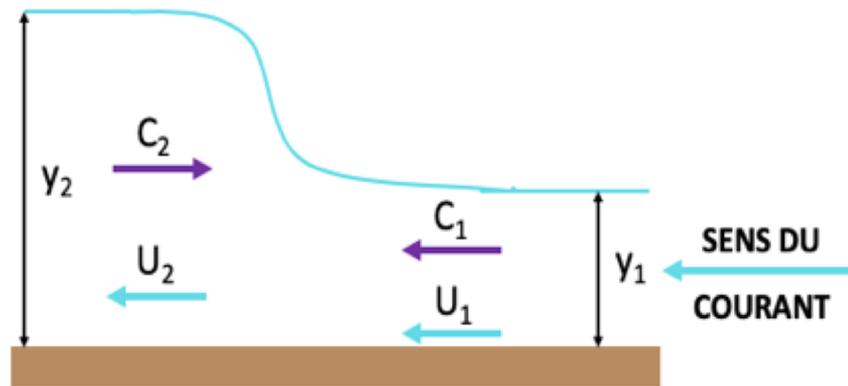
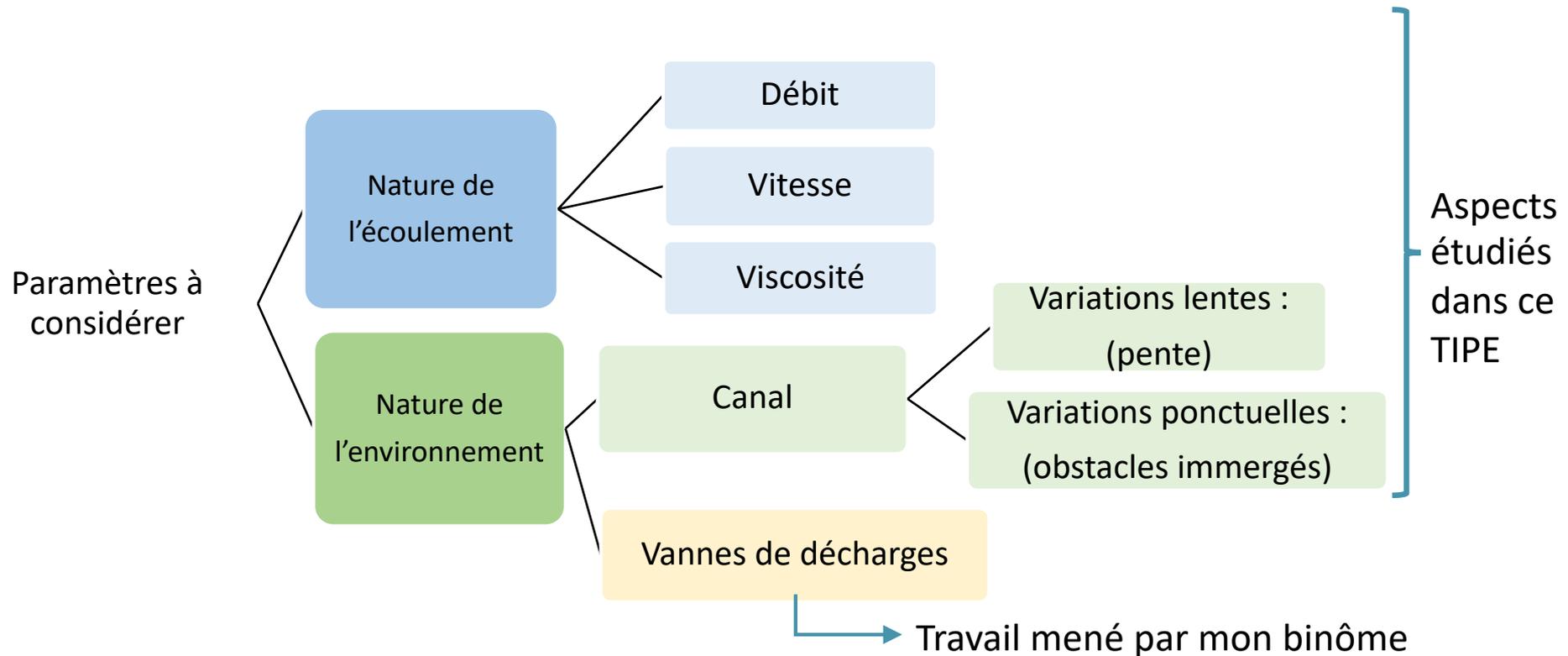


Image 2 : Schéma du ressaut hydraulique

# Problématique et objectifs

Quelle est l'influence de la forme du canal sur la formation de ressauts hydrauliques ?



**1**

## **Démarche opérationnelle :**

- Dispositif expérimental
- Etalonnage de l'expérience : influence des différents paramètres sur un écoulement

**2**

## **Ressaut hydraulique :**

- Modélisation du phénomène
- Influence des différents paramètres
- Etude du positionnement du ressaut

**3**

## **Efficacité du ressaut hydraulique :**

- Etude de la perte de charge

**4**

## **Conclusion :**

- Comparaison à la vanne de décharge
- Récapitulatif des résultats

# 1. Calibrage de l'expérience

## Dispositif expérimental

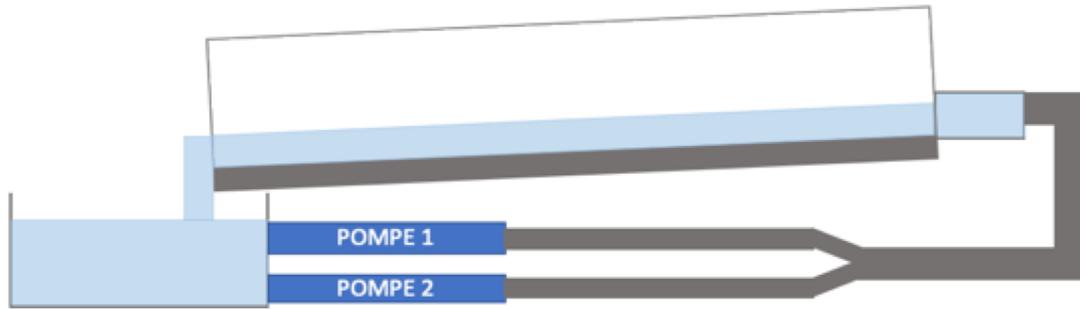


Image 4 : Schéma du dispositif



Image 6 : Obstacles  
8mm/14mm/18mm/23mm

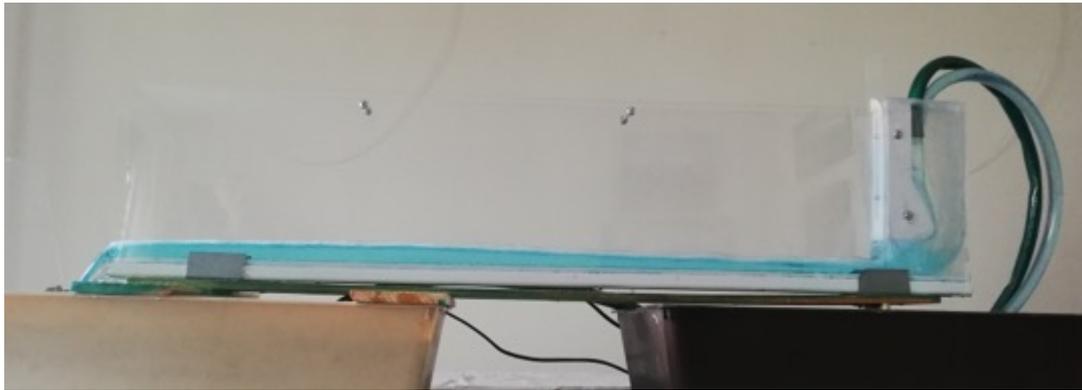


Image 5 : Canal construit

Paramètres à faire varier

- Débit
- Pente
- Forme

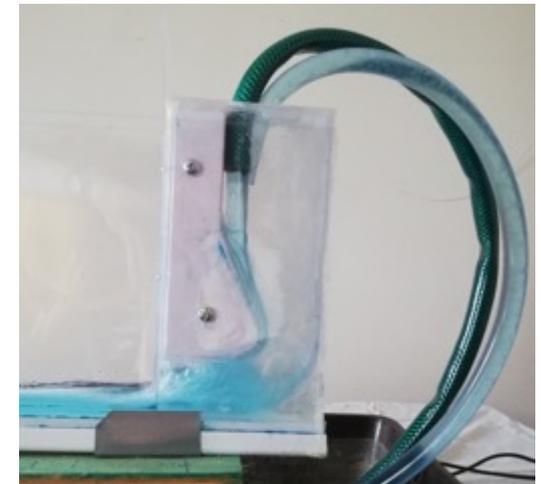


Image 7 : Réservoir intermédiaire  
pour limiter les turbulences

# 1. Calibrage de l'expérience

## Détermination du coefficient de rugosité du canal

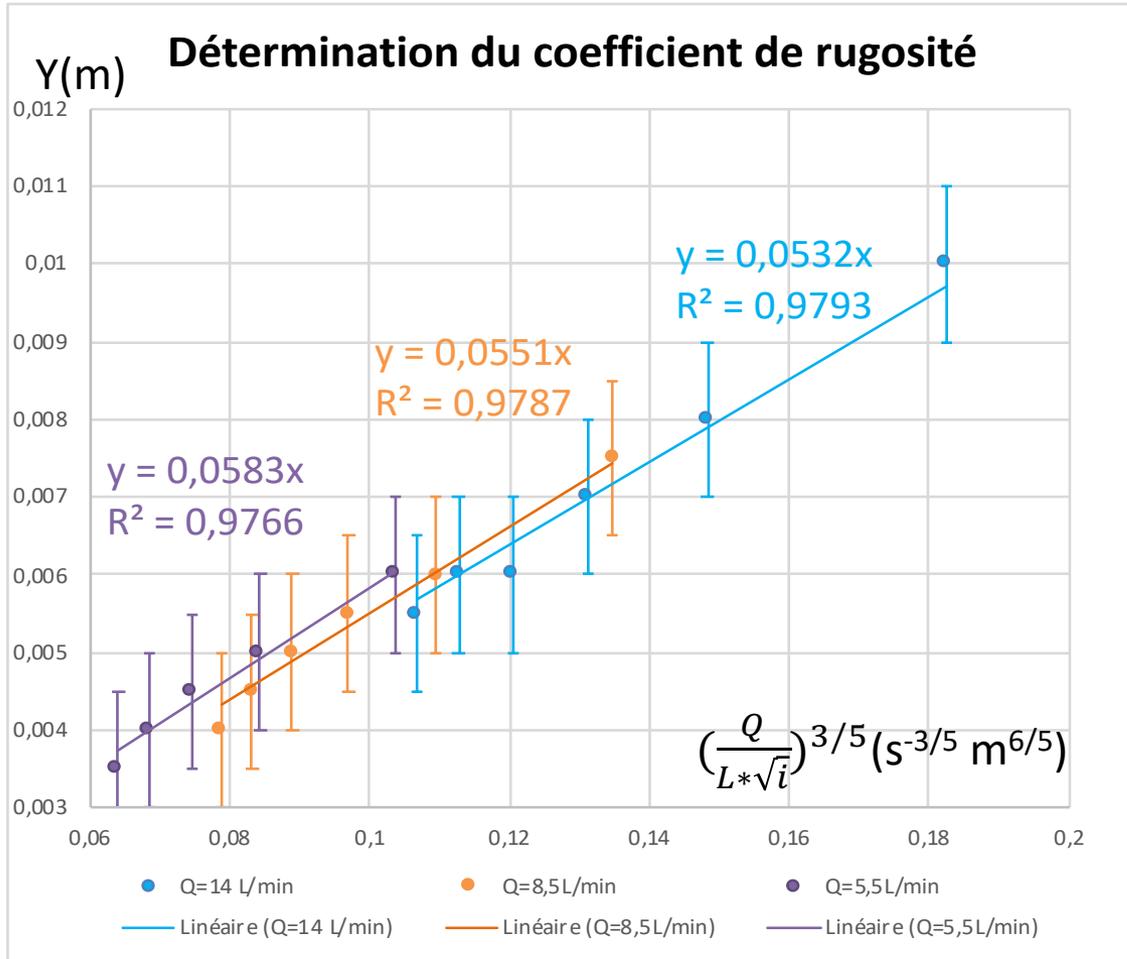


Figure 8 : Détermination du coefficient de rugosité

**Formule de Manning Strickler :**

$$Y = \left( \frac{Q}{K \cdot L \cdot \sqrt{i}} \right)^{3/5}$$

Y hauteur d'eau (m)

Q débit ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )

L largeur du canal (0,04 m)

$i = \sin(\text{pente})$

K : coefficient du rugosité du canal ( $m^{1/3} \cdot s^{-1}$ )

Débit ( $L \cdot \text{min}^{-1}$ )	K ( $m^{1/3} \cdot s^{-1}$ )
5,5	$(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^2$
8,5	$(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^2$
14	$(1,3 \pm 0,2) \cdot 10^2$

$$K = (1,3 \pm 0,2) \cdot 10^2 m^{1/3} \cdot s^{-1}$$

# 1. Calibrage de l'expérience

## Influence de la pente

$$Y = \left( \frac{Q}{K * L * \sqrt{i}} \right)^{3/5}$$

### Nombre de Froude :

$$Fr = \frac{u}{c} = \frac{Q}{L * y * \sqrt{gy}}$$

Fr > 1 : écoulement torrentiel  
 Fr < 1 : écoulement fluvial

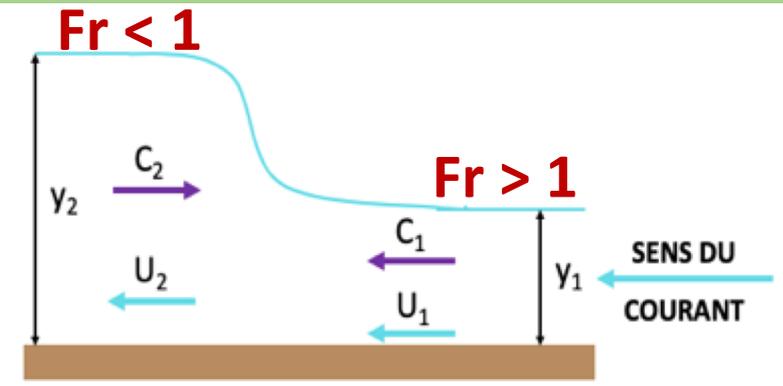


Image 9 : Schéma du ressaut hydraulique

Nombre de Froude

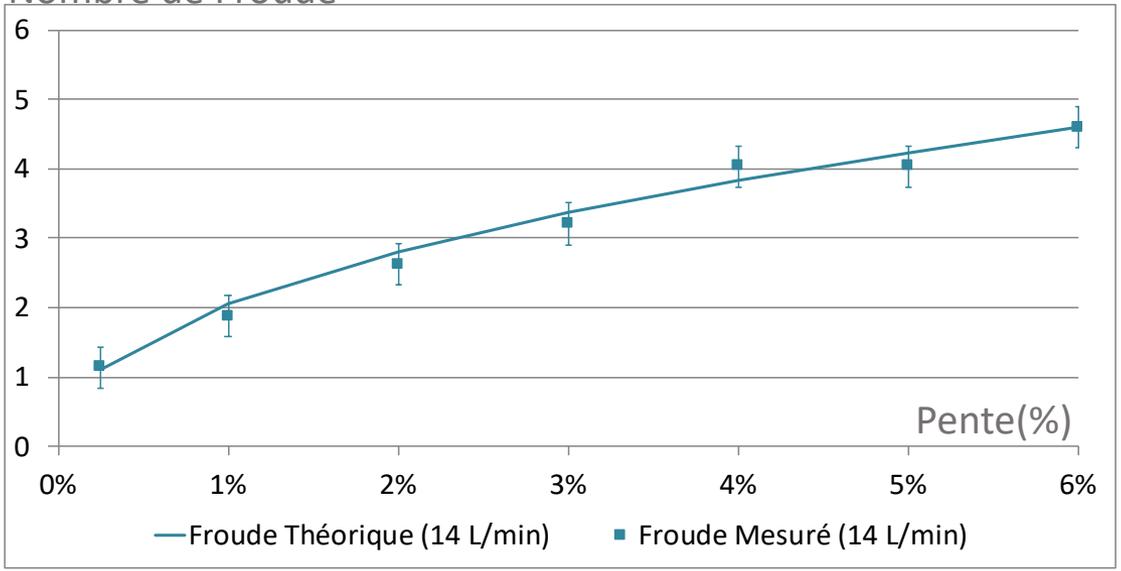


Figure 10 : Evolution du nombre de Froude en fonction de la pente du canal

Une pente permet un écoulement torrentiel

# 1. Calibrage de l'expérience

## Influence de l'obstacle

Nombre de Froude :

$$Fr = \frac{u}{c} = \frac{Q}{L * y * \sqrt{gy}}$$

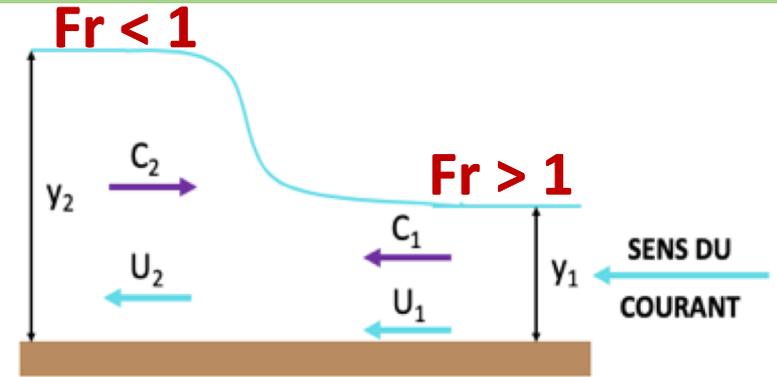


Image 9 : Schéma du ressaut hydraulique

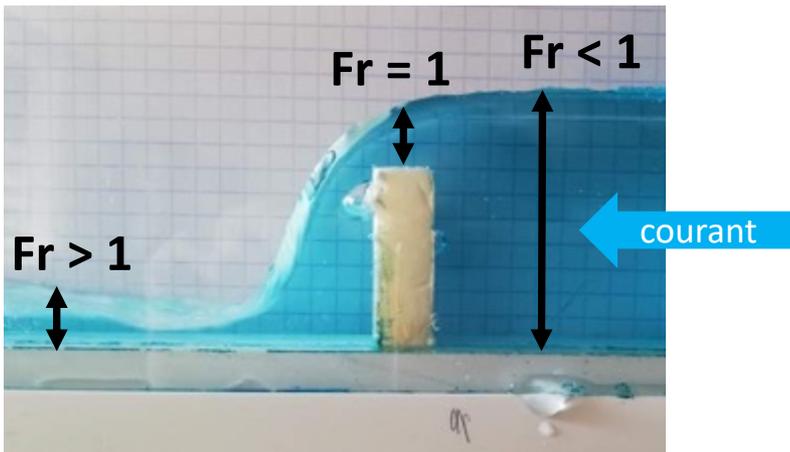


Image 11 : Ecoulement au dessus d'un obstacle

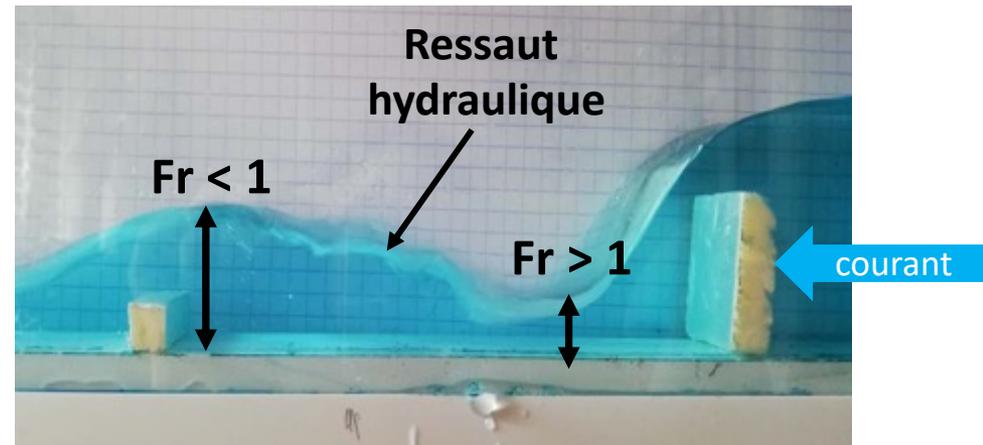


Image 12 : Ecoulement au dessus de deux obstacles successifs

Un obstacle permet le passage d'un écoulement fluvial à torrentiel

# 2. Ressaut hydraulique

## Etablissement de la formule de Bélanger

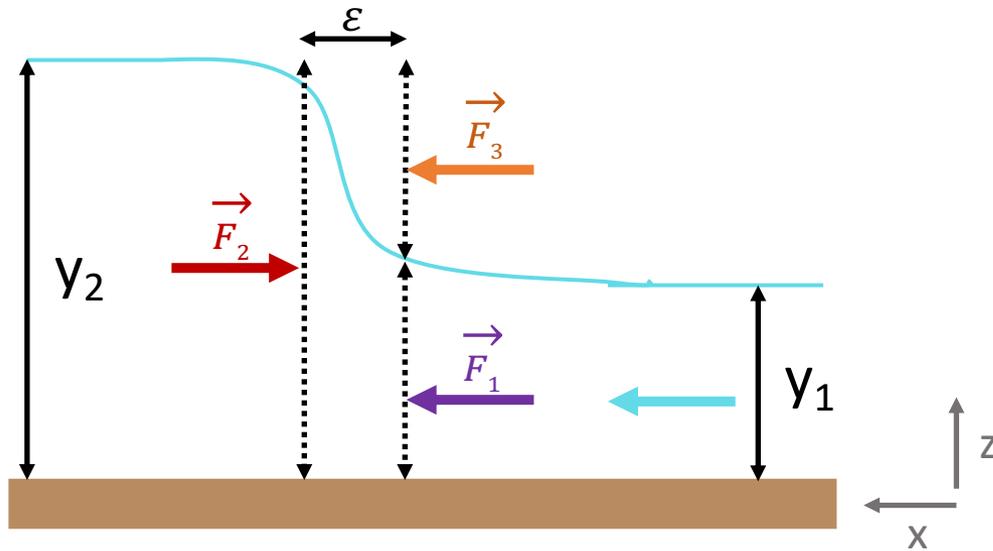


Image 13 : Schéma du ressaut hydraulique

### Viscosité de l'écoulement ?

Nombre de Reynolds :  $Re = \frac{U * L}{\nu} = \frac{Q}{y * \nu}$

Débit (L/min)	y (mm)	Re
5,5	14	4400
8,5	11	7500
14	9	7600

**Écoulement turbulent**

Pression à l'intérieur du fluide :  $P(z) = P_0 + \mu g(y(x) - z)$

$$F_1 = \int_0^{y_1} (P_0 + \mu g(y_1 - z)) * L dz = P_0 L y_1 + \mu g (y_1^2 - \frac{y_1^2}{2})$$

$$F_2 = -\int_0^{y_2} (P_0 + \mu g(y_2 - z)) * L dz = -P_0 L y_2 - \mu g (y_2^2 - \frac{y_2^2}{2})$$

$$F_3 = P_0 L (y_2 - y_1)$$

$$F_{\text{pression}} = \mu g L (\frac{y_1^2}{2} - \frac{y_2^2}{2})$$

# 2. Ressaut hydraulique

## Etablissement de la formule de Bélanger

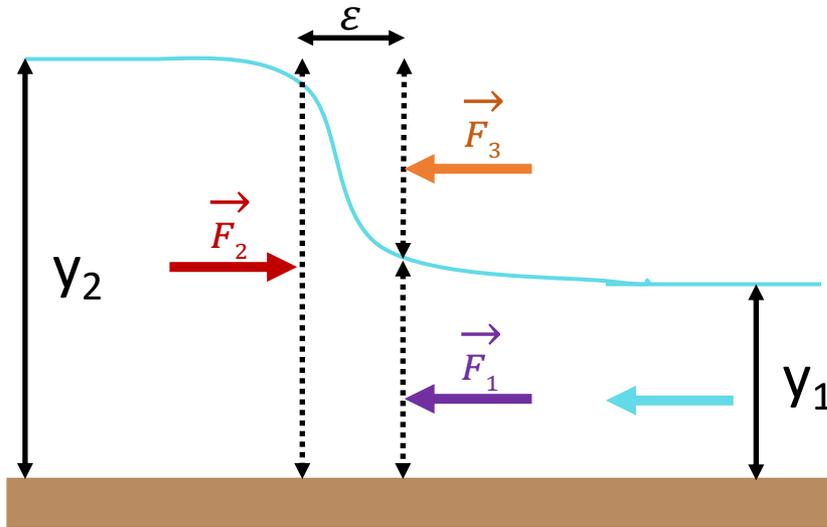


Image 13 : Schéma du ressaut hydraulique

Bilan de quantité de mouvement :

$$\frac{dP}{dt} = D_m(u_2 - u_1) = F_{pression}$$

Ecoulement incompressible :

$$Q = cste = u_1 * y_1 * L = u_2 * y_2 * L$$

$$D_m = \mu * u_1 * y_1 * L = \mu g L \left( \frac{y_1^2}{2} - \frac{y_2^2}{2} \right)$$

Nombre de Froude en amont :

$$Fr_1^2 = \frac{u_1^2}{g * y_1}$$

Formule de Bélanger :

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 8 * Fr_1^2}}{2}$$

# 2. Ressaut hydraulique

## Résultats de l'expérience

Débit(L/min)	Obstacles(mm)	Pente	y1(mm)	Valeurs moyennes		
				y2(mm)	Lr(mm)	D(mm)
14	8	2%	8	24	50	150
	14		8	22	60	400
	18		8	26	130	590
	23					
	8	3%	7	27	60	30
	14		7	26,5	90	210
	18		7	26	115	350
	23		7	26	65	510
8,5	8	2%	6	17	65	240
	14		6	17	90	470
	18		6	19,5		700
	23					
	8	3%	5	20	30	80
	14		5	20	90	275
	18		5	19	100	400
	23		5	19		550
5,5	8	2%	5	14	40	230
	14		5	13	100	520
	18					
	8	3%	4	15	30	125
	14		4	14	50	330
	18		4	13,5	75	450
	23		4	13		580

Image 14 : Tableau des mesures effectuées



Image 15 : Prise de la mesure

# 2. Ressaut hydraulique

## Sources d'incertitudes

- Incertitude sur la fin du ressaut

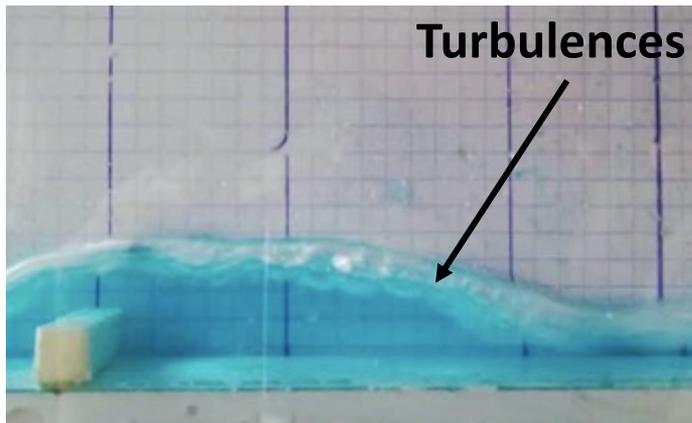


Image 16 : Difficulté pour les mesures

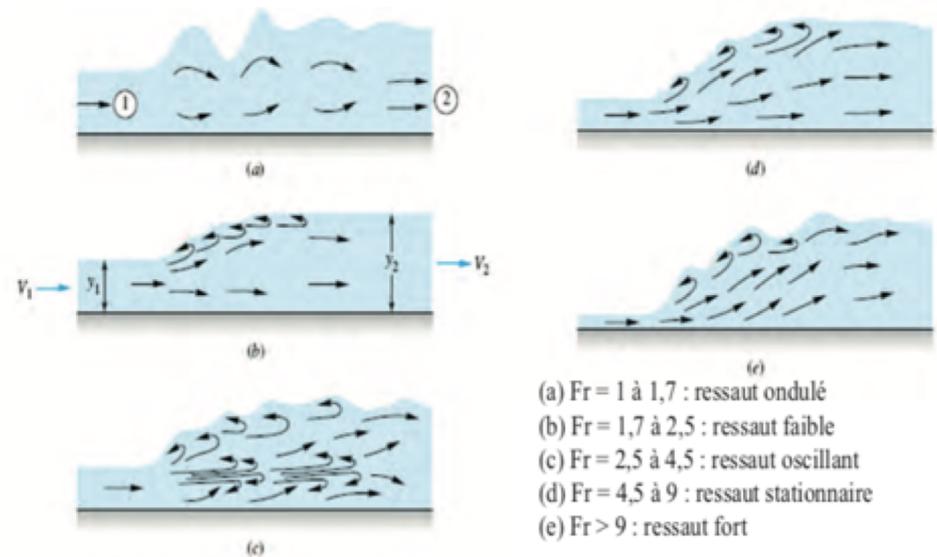


Image 17 : Allure du ressaut en fonction du nombre de Froude  
D'après *Écoulement à surface libre* de Christophe Ancey, EPFL

- Incertitude sur la mesure des hauteurs d'eau :

$$U(y) = \frac{1}{\sqrt{12}} * \sqrt{2} * 2 \text{ mm}$$

- Incertitude sur le débit : négligeable
- Incertitude sur la pente : négligeable

# 2. Ressaut hydraulique

## Vérification de la formule de Bélanger

$$y_2 = y_1 * \frac{-1 + \sqrt{1 + 8 * Fr_1^2}}{2} \Rightarrow y_2 \propto Q^{7/10}$$

Obstacle (mm)	Pente de la courbe de tendance	Ecart relatif avec la théorie
8	0,63	10%
14	0,68	3%
18	0,69	2%

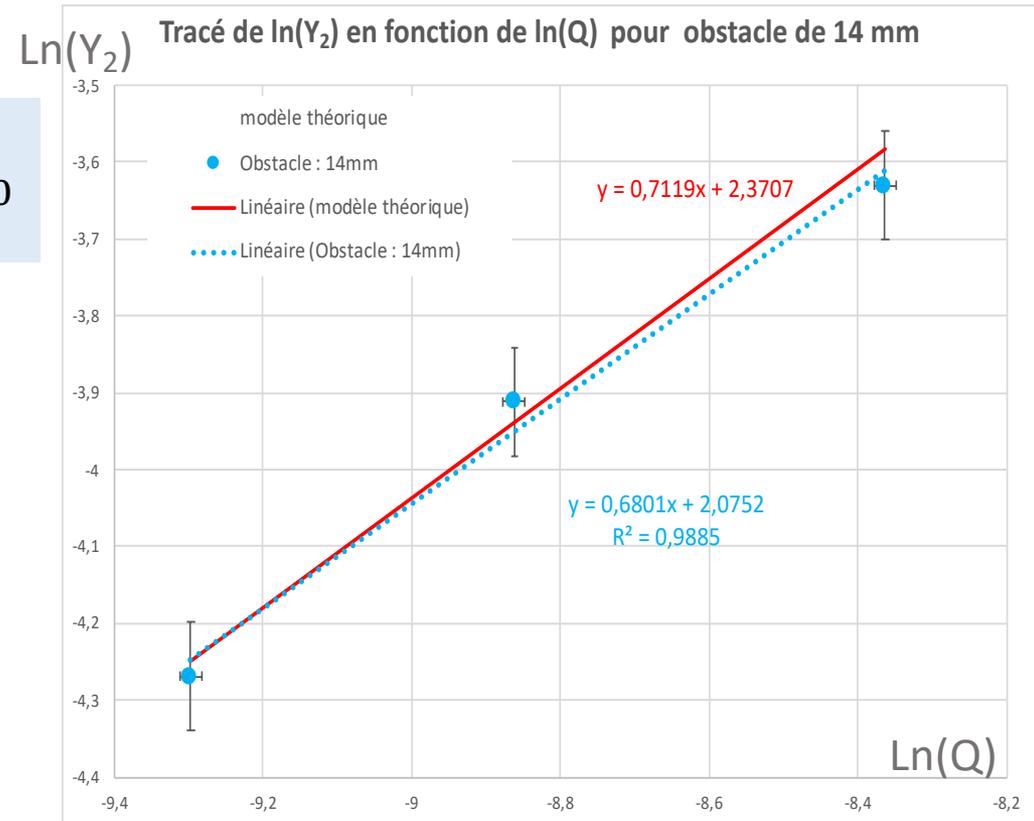


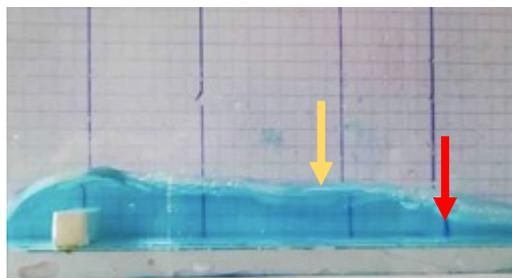
Figure 18 : Vérification de la formule de Bélanger

Débit ↗ : Hauteur ressaut ↗

# 2. Ressaut hydraulique

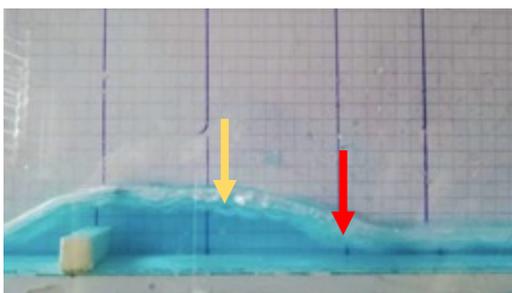
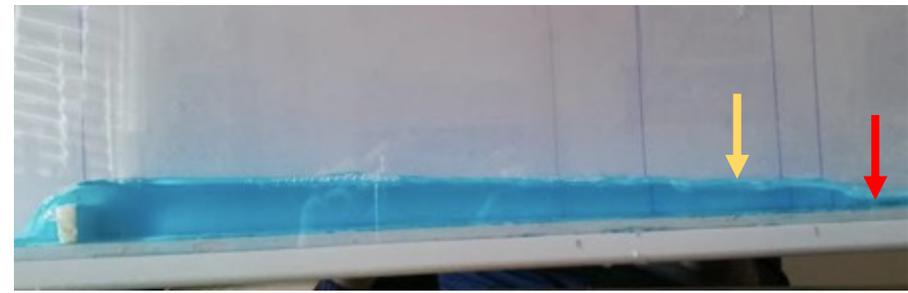
## Influence de l'obstacle et du débit

↓ Fin      ↓ Début

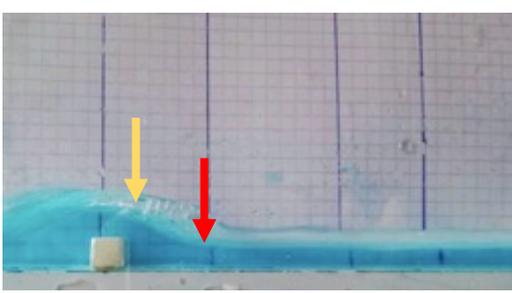
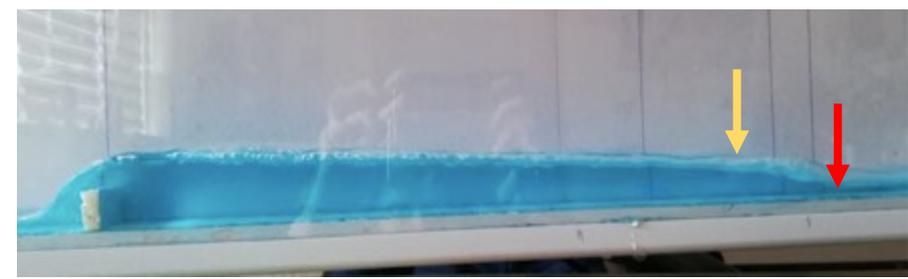


Débit :

(a) 5,5 L/min



(b) 8,5 L/min



(c) 14 L/min



Image 19 : obstacle de 8 mm (pente de 3%)

Image 20 : obstacle de 18 mm (pente de 3%)

Débit ↗ : Distance objet/ressaut ↘

Hauteur objet ↗ : Distance objet/ressaut ↗

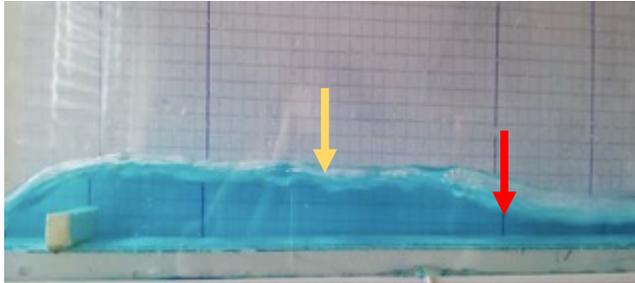
# 2. Ressaut hydraulique

## Influence de la pente

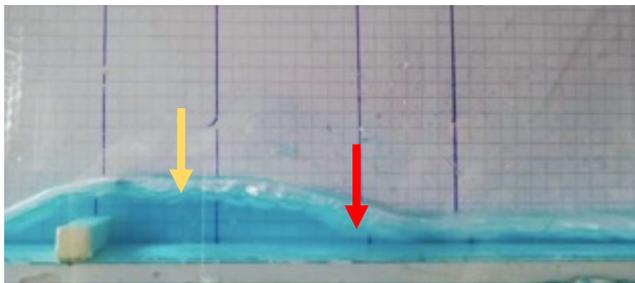
↓ Fin

↓ Début

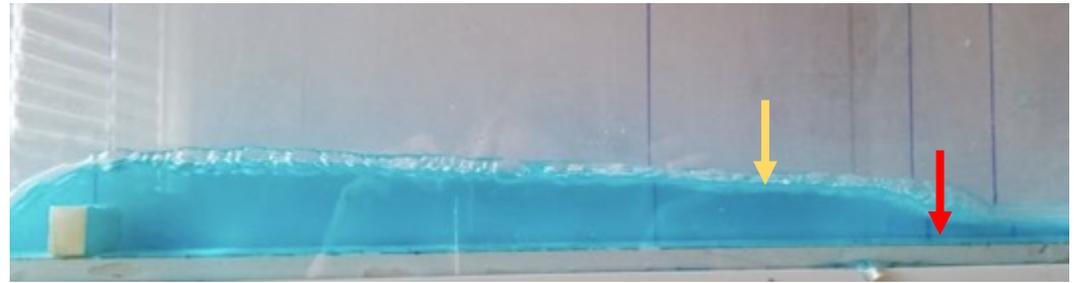
(a) Obstacle 8mm / pente 2%



(b) Obstacle 18mm / pente 2%



(c) Obstacle 8mm / pente 3%



(d) Obstacle 18mm / pente 3%

Image 21 : Ressaut hydraulique formé selon la pente et l'obstacle choisi

Pente ↗ Distance objet/ressaut ↘

# 2. Ressaut hydraulique

## Etude de la position du ressaut

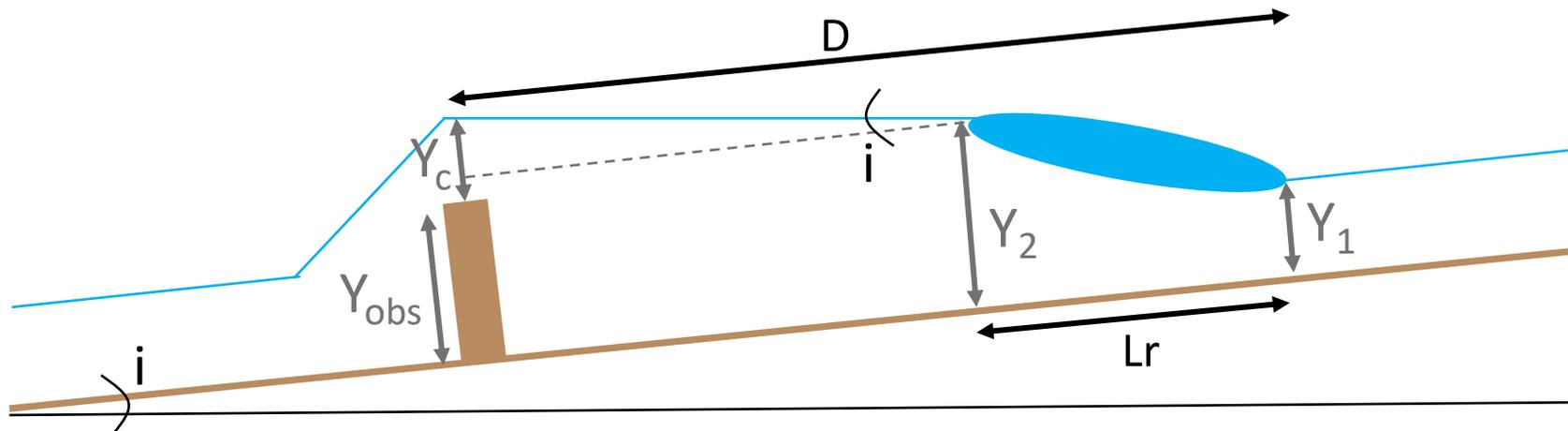


Image 22 : Schéma du ressaut hydraulique

$$D = L_r + \frac{y_{obs} + y_c - y_2}{\tan(i)}$$

Avec : Tirant d'eau critique au niveau de l'obstacle :  $Fr = 1 \Leftrightarrow y_c = \left(\frac{Q}{L \cdot \sqrt{g}}\right)^{2/3}$

Formule empirique de la longueur du ressaut :  $L_r = y_2 * 35 * \frac{\sqrt{Fr_1}}{8 + Fr_1}$

$$\tan(i) = \frac{y_c + y_{obs} - y_2}{d - L_r}$$

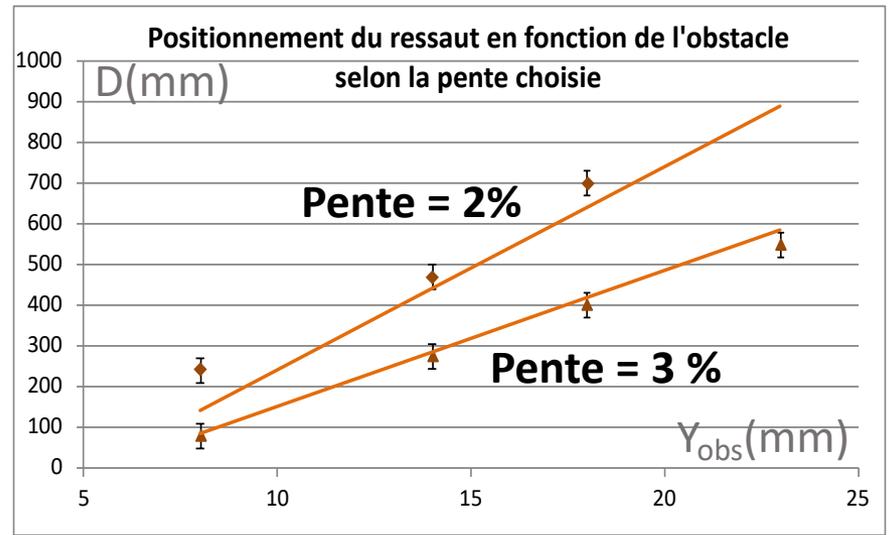
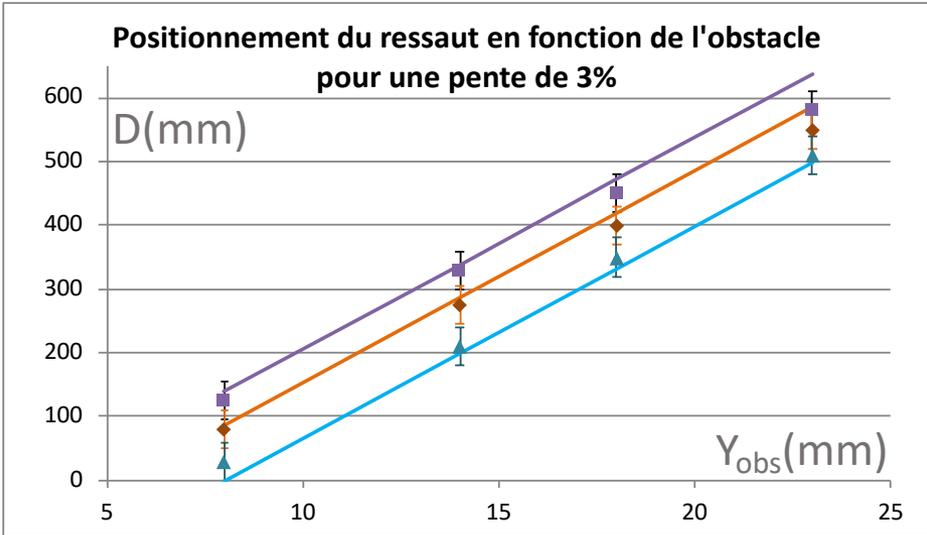
# 2. Ressaut hydraulique

## Etude de la position du ressaut

$$D = \frac{y_{obs}}{\tan(i)} + L_r + \frac{y_c - y_2}{\tan(i)}$$

Théorique :  $\frac{1}{\tan(0,03)} = 33$

- Position théorique : Q=5,5 L/min
- Position théorique : Q=8,5 L/min
- Position théorique : Q=14 L/min
- Position expérimentale : Q=5,5 L/min
- ◆ Position expérimentale : Q=8,5 L/min
- ▲ Position expérimentale : Q=14 L/min



Débit (L/min)	Pente de la courbe de tendance	R <sup>2</sup>	Ecart relatif
5,5	30	0,9955	9%
8,5	31	0,9996	6%
14	32	0,9992	3%

Pente ↗ : Distance objet/ressaut ↘

Hauteur objet ↗ : Distance objet/ressaut ↗

# 3. Efficacité du ressaut hydraulique

## Perte de charge

Transformation d'une énergie cinétique en énergie potentielle

$$u_2 < u_1$$

$$y_2 > y_1$$

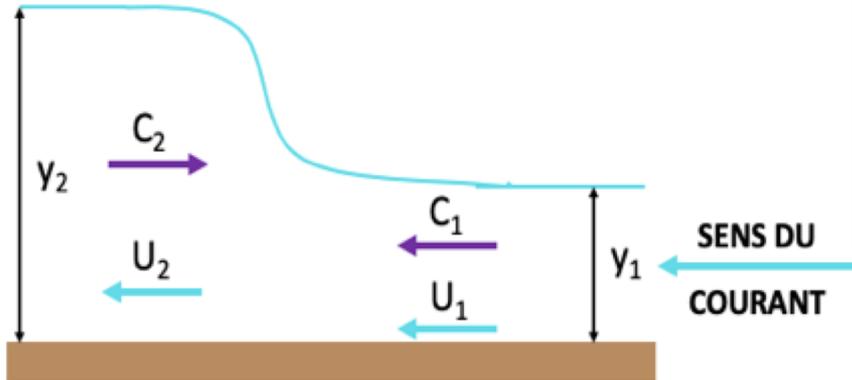


Schéma du ressaut hydraulique

Perte de Charge  $\Delta H$  :

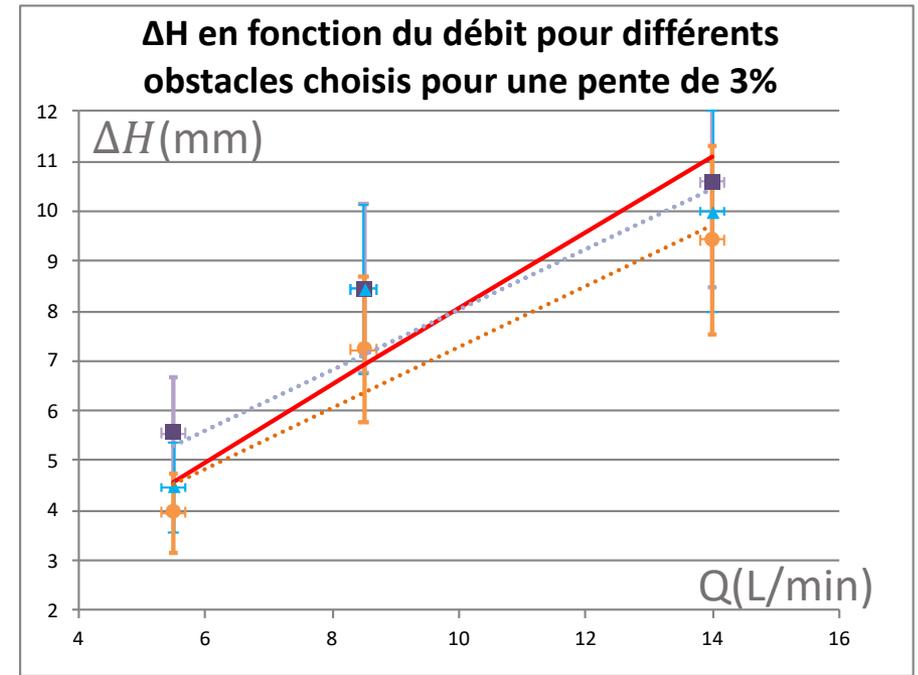
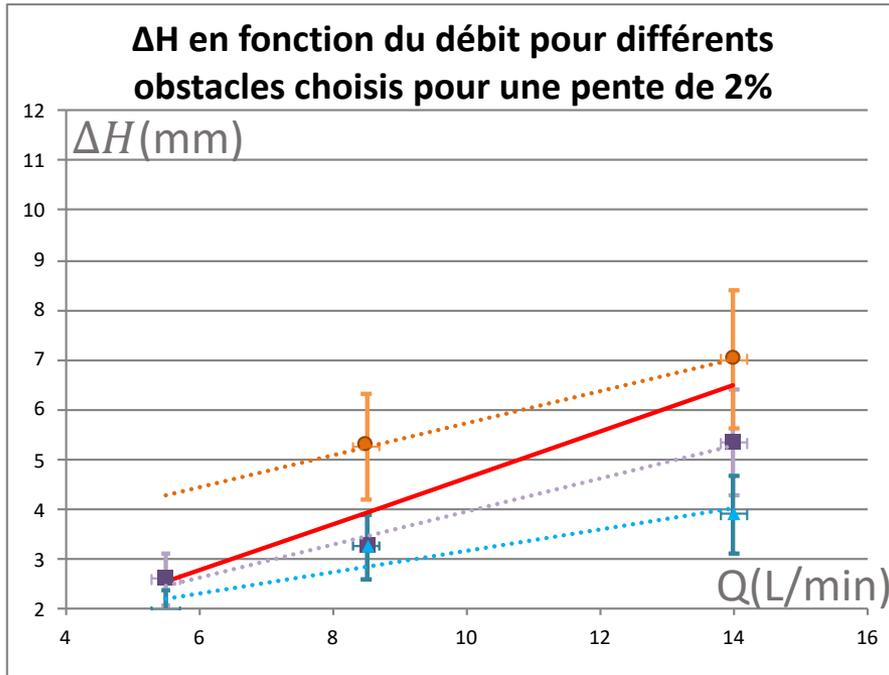
$$\Delta E_c + \Delta E_p \neq 0$$

$$(\mu g y_2 - \mu g y_1) + \left( \mu \frac{u_2^2}{2} - \mu \frac{u_1^2}{2} \right) + \mu g \Delta H = 0$$

$$\Delta H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2}$$

# 3. Efficacité du ressaut hydraulique

## Perte de charge



- courbe théorique
- Obstacle de 8mm
- ▲ Obstacle de 14mm
- Obstacle de 18mm
- ⋯ Linéaire (Obstacle de 8mm)
- ⋯ Linéaire (Obstacle de 14mm)
- ⋯ Linéaire (Obstacle de 18mm)

$\Delta H$  augmente avec le débit et avec la pente

$$\Delta H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2}$$

# 4. Conclusion

## Comparaison à la vanne de décharge

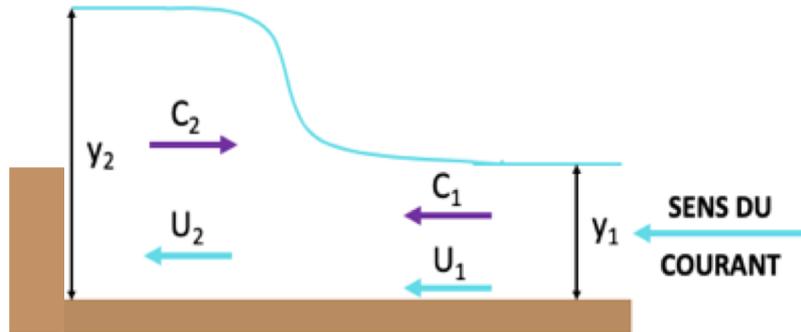


Image 23 : Schéma du ressaut hydraulique par l'utilisation d'un obstacle

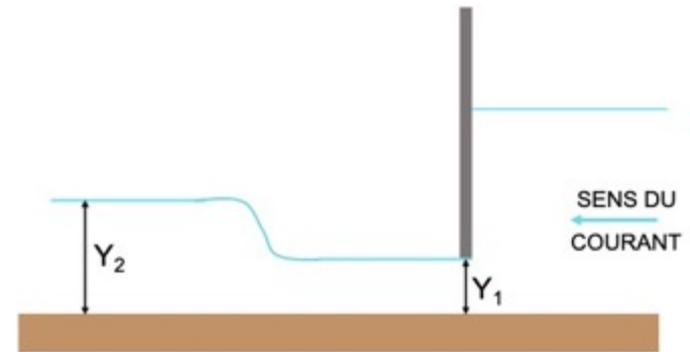


Image 24 : Schéma de la vanne de décharge

Paramètre	Obstacles	Vanne de décharge
Hauteur en amont ( $Y_1$ )	Imposé par la pente et le débit	Imposé par la vanne de décharge
Hauteur en aval ( $Y_2$ )	Loi de Bélanger	
Localisation du ressaut	Avant l'obstacle (écoulement fluvial imposé par l'obstacle)	Après la vanne de décharge (écoulement torrentiel imposé par la vanne)

# 4 . Conclusion

## Récapitulatif des résultats

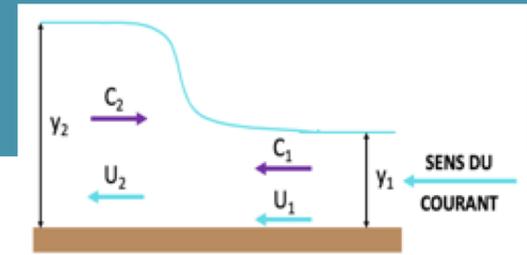


Schéma du ressaut hydraulique

Influence du paramètre...	...Sur l'écoulement	...Sur le ressaut hydraulique
Augmentation du débit	Augmentation hauteur eau amont ( $y_1$ )	- Augmentation hauteur eau aval ( $y_2$ ) - Augmentation de la distance obstacle/ressaut
Augmentation de la pente	Diminution hauteur eau amont ( $y_1$ )	- Diminution de hauteur eau aval ( $y_2$ ) - Diminution de la distance obstacle/ressaut
Augmentation de la hauteur de l'obstacle	Passage d'un écoulement fluvial à torrentiel	- Pas d'impact sur hauteur eau aval ( $y_2$ ) - Augmentation de la distance obstacle/ressaut

### Application à l'aménagement fluvial :

- Gestion des crues
- Protection du lit du canal

MERCI DE VOTRE ATTENTION

# Annexe 1 : Formule de Manning Stickler

Formule empirique de la vitesse d'un écoulement en surface libre :

$$V = K * R^{2/3} * i^{1/2}$$

Rayon hydraulique :  $R = \frac{\text{surface section}}{\text{périmètre mouillé}} = \frac{L*y}{L+2*y}$

Approximation :

canal très large par rapport à la hauteur de l'écoulement :  $L+2y \approx L$

$$R \approx h$$

$$Q = v*y*L \text{ donc } v = \frac{y*L}{Q} = \frac{1}{K * y^{2/3} * i^{1/2}}$$

$$Y = \left( \frac{Q}{K * L * \sqrt{i}} \right)^{3/5}$$

# Annexe 2 : Nombre de Froude autour d'un obstacle immergé

Écoulement Parfait, stationnaire, incompressible, homogène :  
Théorème de Bernoulli sur une Ligne de champ à la surface :

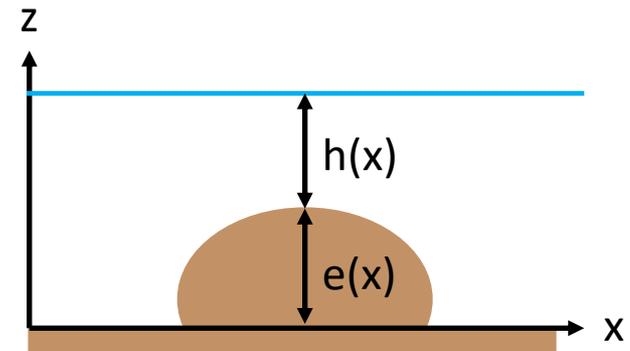
$$P_0 + \mu g * (h(x) + e(x)) + \mu \frac{v^2}{2} = cste$$

$$g \frac{dh}{dx} + g \frac{de}{dx} + v \frac{dv}{dx} = 0$$

Écoulement incompressible :

$$Q = v(x) * l * h(x) = cste$$
$$\frac{dv}{dx} * h(x) + v(x) * \frac{dh}{dx} = 0$$

$$\frac{dv}{dx} * \frac{hg}{v} (Fr^2 - 1) + g \frac{de}{dx} = 0$$



*Écoulement au dessus d'un obstacle*

Lorsque  $Fr=1$ ,  $\frac{de}{dx} = 0$  donc cela correspond au sommet de l'obstacle

# Annexe 3 : Développement de la formule de Bélanger

$$Y = \left( \frac{Q}{K * L * \sqrt{i}} \right)^{3/5} = \alpha * Q^{3/5}$$

Où  $\alpha = 1,2$  S.I

$$Fr^2 = \frac{Q^2}{L^2 * g * y^3} = \beta^2 * Q^{1/10}$$

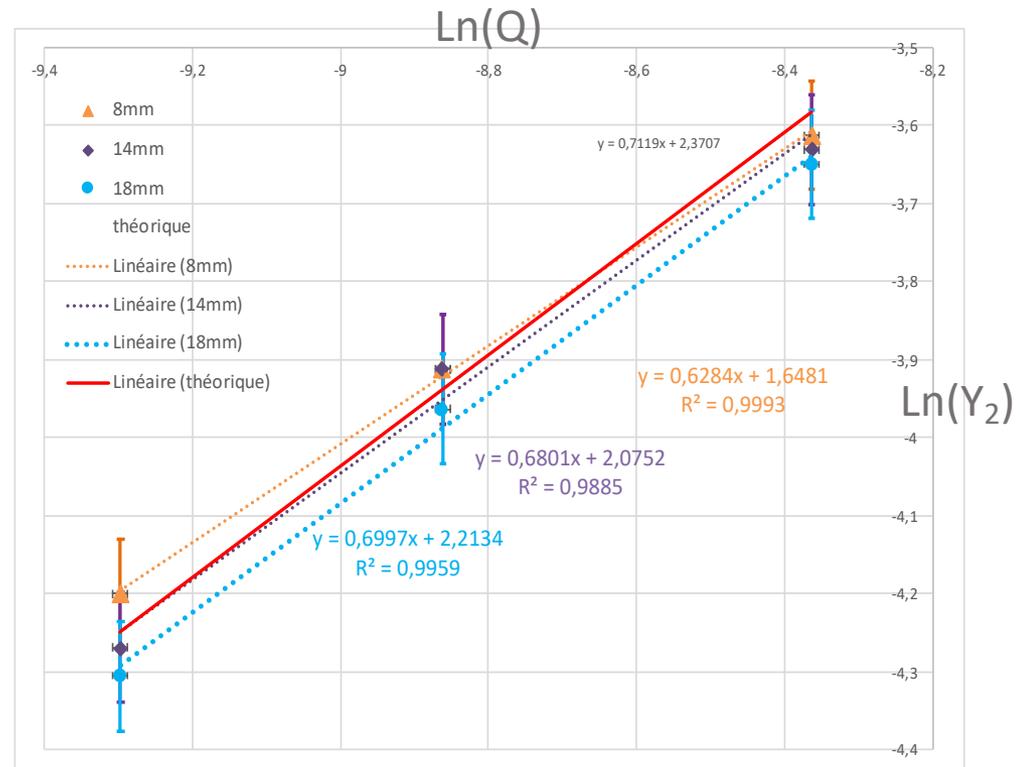
Où  $\beta = 2,6$  S.I

$$Y_2 = y_1 \frac{-1 + \sqrt{1 + 8 * Fr_1^2}}{2}$$

$$= \frac{\alpha * Q^{3/5}}{2} \left( -1 + \sqrt{1 + 8 * \beta^2 * Q^{2/10}} \right)$$

$$\sim \frac{\alpha * Q^{3/5}}{2} \left( -1 + \sqrt{8} * \beta * Q^{1/10} \right)$$

$$Y_2 \sim \frac{\alpha * \sqrt{8} * \beta}{2} * Q^{7/10}$$



Tracé de  $\ln(Y_2)$  en fonction de  $\ln(Q)$   
pour différentes hauteurs d'obstacles