

Notions fondamentales d'hydraulique fluviale

Olivier THUAL, Ludovic CASSAN (CC BY-SA)
INP-ENSEEIH, Hydraulique Mécanique des Fluides

Toulouse Tech Formation Professionnelle, décembre 2014

Bibliographie

- O. THUAL, Hydrodynamique de l'environnement, Éditions de l'École Polytechnique, 2010

thual.perso.enseeiht.fr/xsee/index.htm

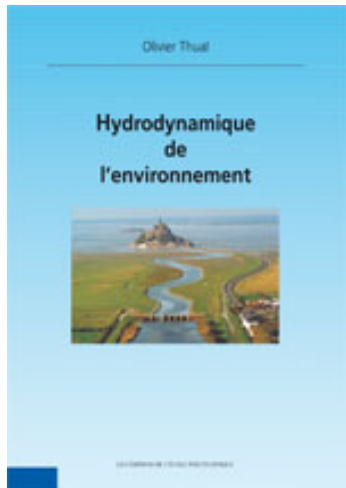
- H. PIEGAY, H. THAN SON, J. NÉMERY, N. GRATIO, O. NAVRATIL, S. SORES-FRAZÃO, Y. ZECH, Des rivières et des hommes, MOOC de la plateforme France Université Numérique (FUN), 2014

www.france-universite-numerique.fr/moocs.html

- D. GOUTX, S. LADREYT, Hydraulique des cours d'eau ; La théorie et sa mise en pratique, CETMEF (CEREMA) NR25, 2001

www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/hydraulique-des-cours-d-eau-la-a534.html

Livre "Hydrodynamique de l'environnement"



O. Thual, Éditions de l'École Polytechnique (2010)

I. Mécanique des fluides

- 1 Écoulements incompressibles
- 2 Écoulements potentiels
- 3 Turbulence et frottement

II. Hydraulique fluviale

- 4 Hydraulique à surface libre
- 5 Ondes de crues
- 6 Intumescences et ressauts

III. Hydrodynamique marine

- 7 Ondes de surface
- 8 Réfraction de la houle
- 9 Seiches et marées

I. CHARGE HYDRAULIQUE

- 1. Écoulements incompressibles
- 2. Écoulements souterrains
- 3. **Turbulence et frottement**

II. HYDRAULIQUE FLUVIALE

- 4. **Hydraulique à surface libre**
- 5. Ondes de crues
- 6. Intumescences et ressauts

III. HYDRODYNAMIQUE MARINE

- 7. Ondes de surface
- 8. Réfraction de la houle
- 9. Seiches et marées






Version en ligne du livre


---< POLYCOPIE DU COURS >---(up)

[Introduction](#) 

I. CHARGE HYDRAULIQUE

1. [Écoulements incompressibles](#) 
2. [Écoulements potentiels](#) 
3. [Turbulence et frottement](#) 

II. HYDRAULIQUE FLUVIALE

4. [Hydraulique à surface libre](#) 
5. [Ondes de crues](#)
6. [Intumescences et ressauts](#)

III. HYDRODYNAMIQUE MARINE

7. [Ondes de surface](#)
8. [Réfraction de la houle](#)
9. [Seiches et marées](#)

---< DIAPORAMAS DU COURS >---(up)

[Diaporama : Introduction](#), (print .pdf)

I. CHARGE HYDRAULIQUE

1. Diaporama : [Écoulements incompressibles](#), (print .pdf)
2. Diaporama : [Écoulements potentiels](#), (print .pdf)
3. Diaporama : [Turbulence et frottement](#), (print .pdf)

II. HYDRAULIQUE FLUVIALE

4. Diaporama : [Hydraulique à surface libre](#), (print .pdf)
5. Diaporama : [Ondes de crues](#) (print .pdf)
6. Diaporama : [Intumescences et ressauts](#) (print .pdf)

III. HYDRODYNAMIQUE MARINE

7. Diaporama : [Ondes de surface](#), (print .pdf)
8. Diaporama : [Réfraction de la houle](#), (print .pdf)
9. Diaporama : [Seiches et marées](#), (print .pdf)

---< PETITES CLASSES DU COURS >---(up)

I. CHARGE HYDRAULIQUE

- PC1 : [Écoulements de Poiseuille](#)
- PC2 : [Écoulements en milieux poreux](#)
- PC3 : [Applications des modèles de turbulence](#)

II. HYDRAULIQUE FLUVIALE

- PC4 : [Écoulements sur un obstacle](#)
- PC5 : [Ondes de crues](#)
- PC6 : [Canal à choc](#)

III. HYDRODYNAMIQUE MARINE

- PC7 : [Ondes de surface](#)
- PC8 : [Réfraction de la houle](#)
- PC9 : [Seiches et marées](#)

<http://thual.perso.enseeiht.fr>

Plan de la partie “Notions en hydraulique fluviale”

1. Charge hydraulique

Ce concept essentiel combine énergies potentielle et cinétique.

2. Franchissement d'un obstacle

En l'absence de frottement, la charge spécifique est une grandeur utile.

3. Ressauts hydrauliques

La conservation de l'impulsion permet de décrire les ressauts stationnaires.

4. Pertes de charge

Les pertes de charges linéiques ou singulières sont paramétrées.

5. Courbes de remous

L'advection, la pente et le frottement expliquent les lignes d'eaux.

- 1 Charge hydraulique
- 2 Franchissement d'un obstacle
- 3 Ressauts hydrauliques
- 4 Pertes de charge
- 5 Courbes de remous
- 6 Travaux dirigés

- 1 Charge hydraulique
 - Équation de Bernoulli
 - Moyennes sur une section
 - Perte de charge linéique
- 2 Franchissement d'un obstacle
- 3 Ressauts hydrauliques
- 4 Pertes de charge
- 5 Courbes de remous
- 6 Travaux dirigés

Charge hydraulique

Définition de la charge hydraulique

$$H = \frac{p}{\rho g} + z + \frac{1}{2g} \underline{U}^2$$

- p est la pression
- ρ est la masse volumique
- g est la gravité
- z est l'altitude
- $\underline{U} = u \underline{e}_x + v \underline{e}_y + w \underline{e}_z$ est le vecteur vitesse

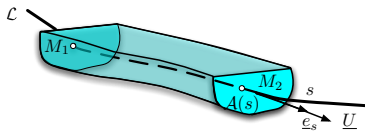
Équation de Bernoulli

Équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds :

$$\operatorname{div} \underline{U} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial \underline{U}}{\partial t} + \underline{U} \cdot \operatorname{grad} \underline{U} = -g \underline{e}_z - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \underline{U} - \operatorname{div} \underline{R}$$

$\underline{U} = u \underline{e}_x + v \underline{e}_y + w \underline{e}_z$ est la vitesse, ρ la masse volumique, p la pression, ν la viscosité et $R_{ij} = \overline{U'_i U'_j}$ le tenseur de Reynolds (turbulence).

On définit la charge hydraulique par : $H = \frac{p}{\rho g} + z + \frac{1}{2g} U^2$



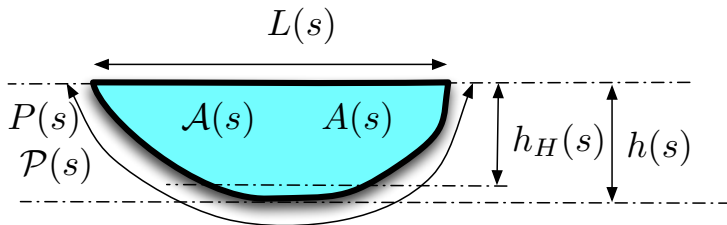
Intégration de M_1 à M_2

La perte de charge $H(M_1) - H(M_2)$ est nulle en l'absence de frottement.

Moyennes sur une section

- Section : A
- Périmètre mouillé : P
- Largeur miroir : L

- Rayon hydraulique : $R_H = A/P$
- Diamètre hydraulique : $D_H = 4 R_H$
- Hauteur hydraulique : $h_H = A/L$



- On suppose souvent $h_H \sim h$
- Section rectangulaire avec $L \gg h$: $R_H \sim h$
- Section en demi-cercle de rayon R : $R_H = R/2$

Débit moyen et vitesse moyenne :

$$Q(s) = \iint_{\mathcal{A}} \underline{U} \cdot \underline{e}_s da = A(s) U(s) \implies U(s) = \frac{1}{A(s)} \iint_{\mathcal{A}} \underline{U} \cdot \underline{e}_s da$$

Charge hydraulique moyenne :

$$H(s) = \frac{1}{A(s)} \iint_{\mathcal{A}} \left(\frac{p}{\rho g} + z + \frac{U^2}{2g} \right) da = \frac{P_*(s)}{\rho g} + \alpha(s) \frac{U^2(s)}{2g}$$

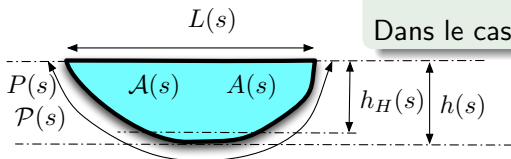
Hypothèse hydrostatique :

$$P_*(s) = p + \rho g z$$

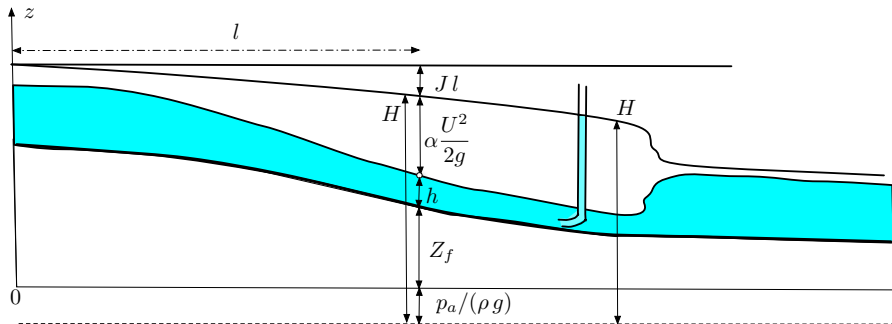
Forme du profil de vitesse :

$$\alpha(s) = \frac{1}{U^2(s)} \frac{1}{A(s)} \iint_{\mathcal{A}} U^2 da$$

Dans le cas turbulent $\alpha \sim 1$

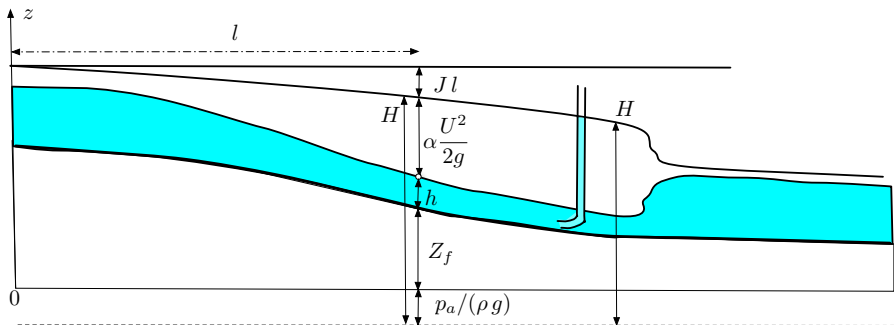


Perte de charge linéique



Charge hydraulique des écoulements à surface libre :

$$H(s) = \frac{p}{\rho g} + z + \alpha \frac{U^2}{2g} = \frac{p_a}{\rho g} + Z_f + h + \alpha \frac{U^2}{2g}$$

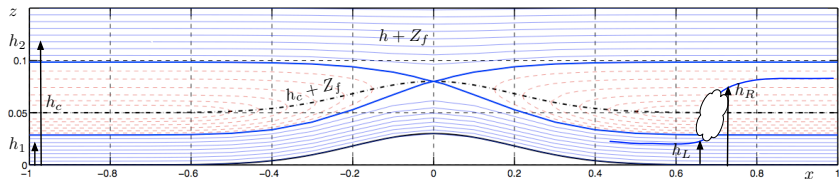
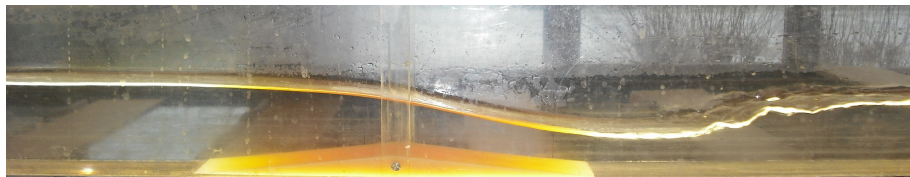


Perte de charge linéique :

$$\frac{dH}{ds} = -J \quad \Longrightarrow \quad H(s_2) - H(s_1) = - \int_{s_1}^{s_2} J(s) ds$$

- 1 Charge hydraulique
- 2 Franchissement d'un obstacle
 - Charge spécifique
 - Régimes fluvial ou torrentiel
 - Lignes d'eau sur un obstacle
- 3 Ressauts hydrauliques
- 4 Pertes de charge
- 5 Courbes de remous
- 6 Travaux dirigés

Franchissement d'un obstacle



Charge spécifique

Hypothèses :

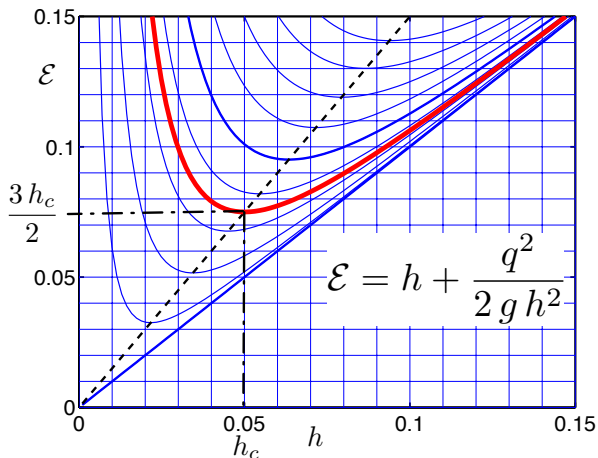
- Canal infiniment large : $R_h = h$ avec obstacle $z = Z_f(s)$
- Débit linéique $q = U h$ constant
- Perte de charge linéique J négligeable
- Coefficient de forme $\alpha = 1$

Conservation de la charge hydraulique

$$\frac{p_a}{\rho g} + Z_f(s) + h(s) + \frac{U^2(s)}{2g} = H$$

$$\text{Charge spécifique } \mathcal{E}(q, h) = h + \frac{q^2}{2g h^2} = h + \frac{U^2}{2g} = h + \frac{1}{2} \frac{h^3}{h^2}$$

$$\text{On a donc : } \mathcal{E}[q, h(s)] = H_0 - Z_f(s) \quad \text{avec} \quad H_0 = H - \frac{p_a}{\rho g}$$

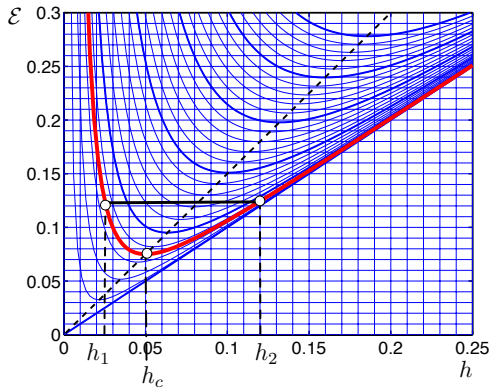


Hauteur critique h_c

La charge spécifique est minimum pour $h_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}$

Régimes fluvial ou torrentiel

$$\text{Nombre de Froude : } Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} = \frac{q}{g^{1/2} h^{3/2}} = \left(\frac{h_c}{h}\right)^{3/2} \quad \text{avec} \quad h_c = \frac{q^2}{g^{1/3}}$$



Hauteurs conjuguées h_1 et h_2

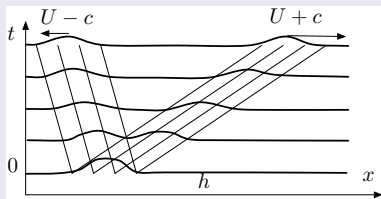
- Régime torrentiel : $Fr > 1$
avec $h_1 < h_c$.
- Régime fluvial : $Fr < 1$
avec $h_2 > h_c$.

Interprétation du nombre de Froude

- Vitesse des ondes de surface en milieu peu profond : $c = \sqrt{gh}$
- En présence d'un courant : $U + c$ et $U - c$
- Définition du nombre de Froude : $Fr = U/\sqrt{gh} = U/c$

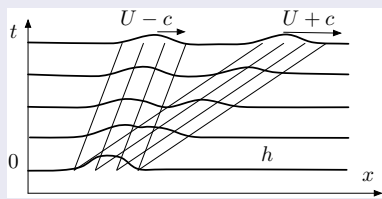
Régime fluvial $Fr < 1$

$$U - c < 0 \quad \text{et} \quad U + c > 0$$



Régime torrentiel $Fr > 1$

$$U - c > 0 \quad \text{et} \quad U + c > 0$$



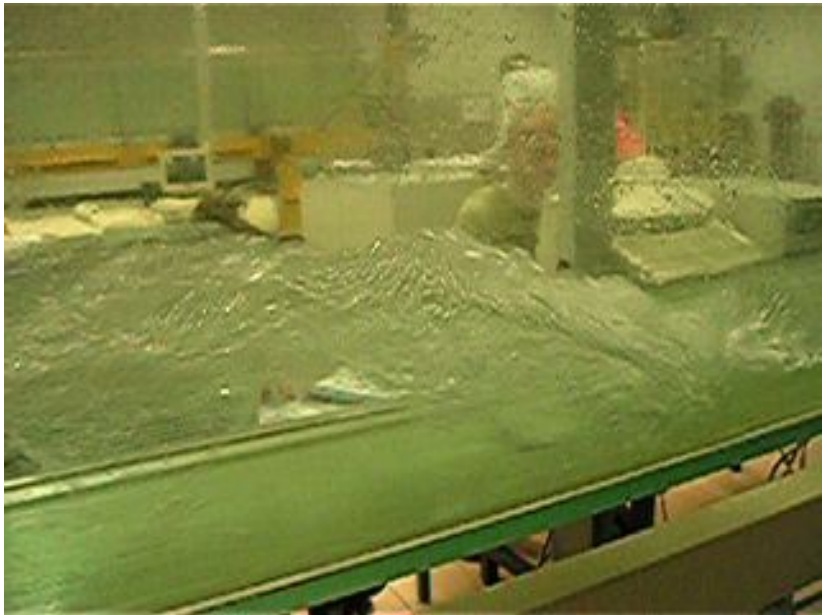
- 1 Charge hydraulique
- 2 Franchissement d'un obstacle
- 3 Ressauts hydrauliques**
 - Ressauts en rivière ou canaux
 - Débit et impulsion
 - Perte de charge singulière
- 4 Pertes de charge
- 5 Courbes de remous
- 6 Travaux dirigés



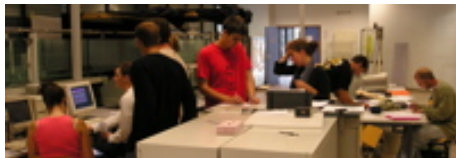
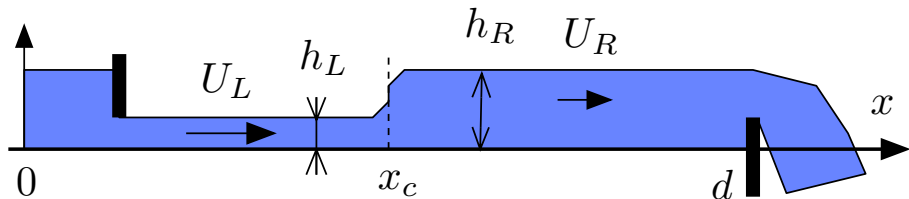
Ressauts en rivière ou canaux



Ressauts hydraulique stationnaire sur le Mississippi

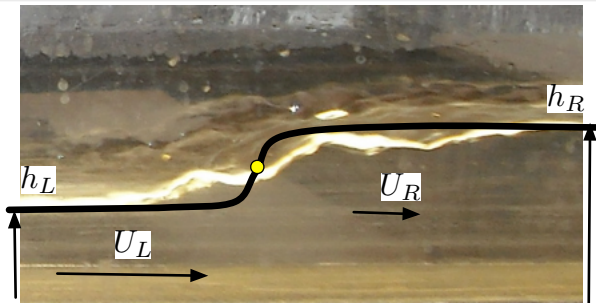


Débit et impulsion



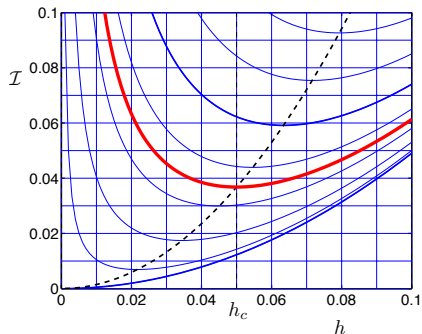
Conservation de la masse et de la quantité de mouvement

$$U_L h_L = U_R h_R = q \quad \text{et} \quad h_L U_L^2 + \frac{1}{2} g h_L^2 = h_R U_R^2 + \frac{1}{2} g h_R^2$$



En remplaçant $U_L = q/h_L$ et $U_R = q/h_R$:

$$\frac{q^2}{h_L} + \frac{1}{2} g h_L^2 = \frac{q^2}{h_R} + \frac{1}{2} g h_R^2 = I$$



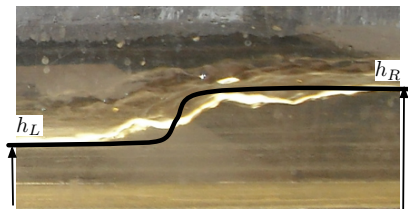
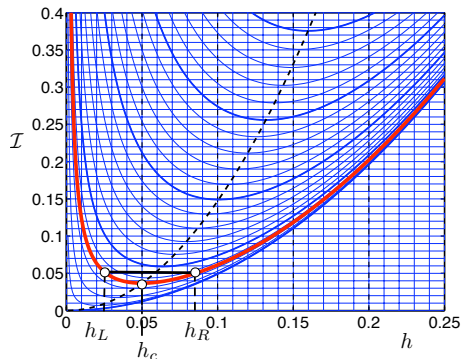
Fonction impulsion

$$\mathcal{I}(q, h) = h U^2 + \frac{1}{2} g h^2 = \frac{q^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2 = g \left(\frac{h_c^3}{h} + \frac{1}{2} h^2 \right)$$

À débit donné, la fonction $\mathcal{I}(q, h)$ est minimum pour $h = h_c$

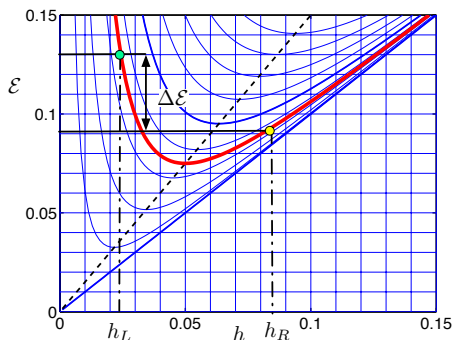
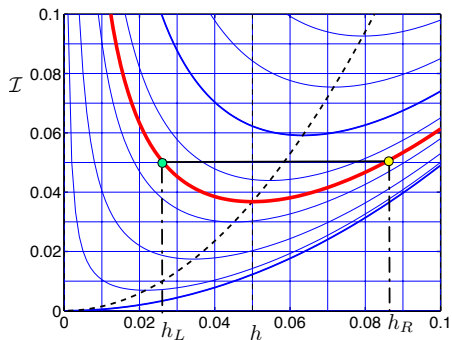
Les hauteurs h_L et h_R sont conjuguées pour l'impulsion :

$$\mathcal{I}(q, h_L) = \mathcal{I}(q, h_R) \quad \text{avec} \quad \mathcal{I}(q, h) = \frac{g}{h} \left(h_c^3 + \frac{1}{2} h^3 \right)$$



Passage du régime torrentiel ($h_L < h_c$) au régime fluvial ($h_R > h_c$)

Perte de charge singulière

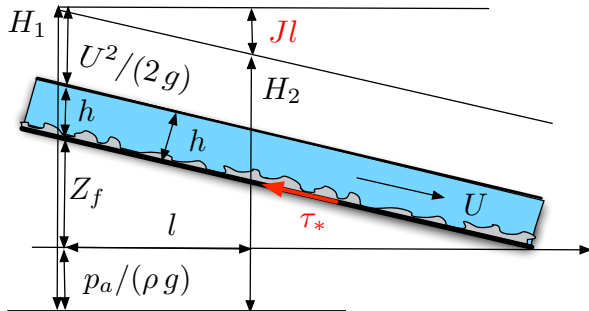


Calcul de la perte de charge dans un ressaut

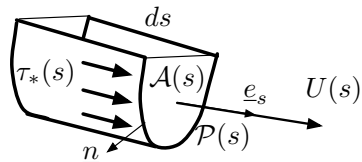
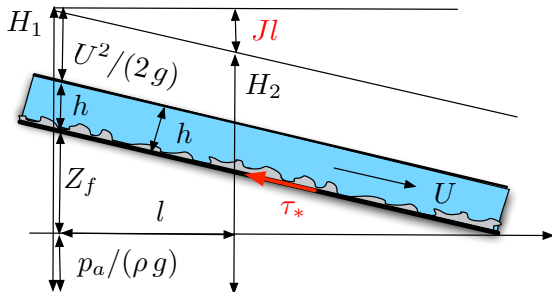
$$\Delta \mathcal{E} = \frac{(h_R - h_L)^3}{4 h_R h_L}$$

- 1 Charge hydraulique
- 2 Franchissement d'un obstacle
- 3 Ressauts hydrauliques
- 4 Pertes de charge**
 - Perte de charge et frottement
 - Diagramme de Moody
 - Coefficient de Strickler
- 5 Courbes de remous
- 6 Travaux dirigés

Perte de charge et frottement



La perte de charge $Jl = H_1 - H_2$ est due au frottement τ_* sur le fond



Deux grandeurs

- Perte de charge linéique : $\frac{dH}{ds} = -J$
- Frottement pariétal du fluide sur la paroi : τ_*

Relation entre la perte de charge linéique J et le frottement τ_* :

$$\tau_* = \rho g R_H J \quad \text{avec} \quad R_H = A/P$$

Diagramme de Moody

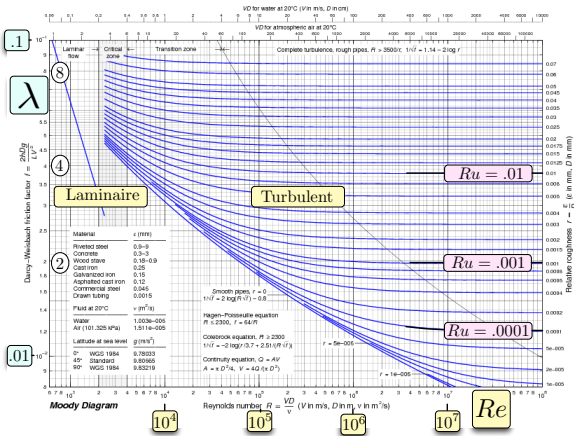
- Nombre de Reynolds $Re = U D_H / \nu$ où ν est la viscosité
- Rugosité $Ru = k_s / D_H$ où k_s est la taille des irrégularités du fond

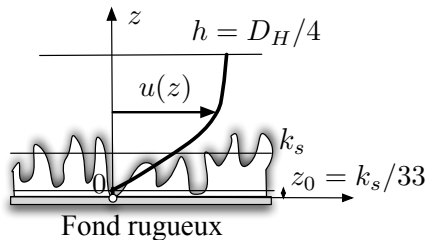
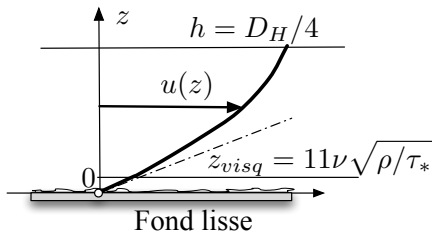
Loi expérimentale

$$\tau_* = \frac{\lambda(Re, Ru)}{8} \rho U^2$$

- τ_* : frottement pariétal

- λ : coefficient de frottement

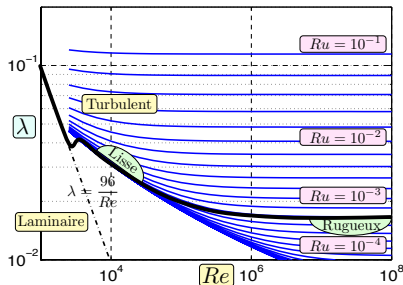




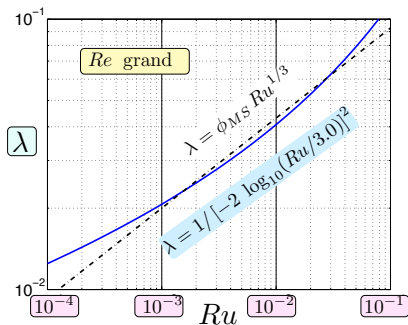
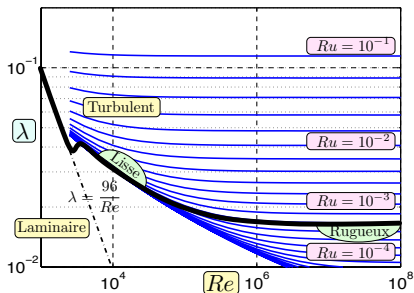
Fonds lisses ou rugueux :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{sth}}} = -2.0 \log_{10} \left(\frac{2.5}{Re \sqrt{\lambda_{sth}}} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{rug}}} = -2.0 \log_{10} \left(\frac{Ru}{3.0} \right)$$



Coefficient de Strickler



Coefficient de frottement λ dans le cas rugueux

$$\lambda \sim \phi_{MS} Ru^{\frac{1}{3}} \quad \text{avec} \quad Ru = ks/D_H$$

Le coefficient $\lambda(Ru)$ ne dépend plus du nombre de Reynolds Re

Paramétrisation du frottement $\tau_* = \rho g R_H J$:

$$\tau_* = \frac{1}{8} \lambda(Re, Ru) \rho U^2 \quad \Longleftrightarrow \quad J = \lambda(Re, Ru) \frac{U^2}{2g D_H}$$

$$\text{avec } Re = U D_H / \nu \quad \text{et} \quad Ru = k_s / D_H$$

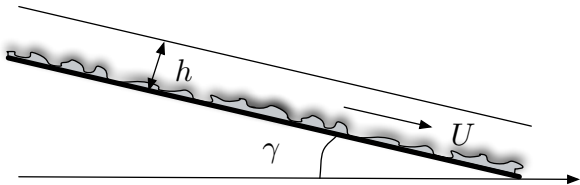
Paramétrisation de Manning-Strickler (cas rugueux) :

$$\lambda = \phi_{MS} Ru^{\frac{1}{3}} \implies J = \frac{U^2}{R_H^{4/3} K_s^2} \quad \text{avec} \quad K_s = \left(\frac{8 k_s^{1/3} g}{\phi_{MS}} \right)^{1/2}$$

$$\text{Si } I = -\frac{dz_f}{ds} = \sin \gamma :$$

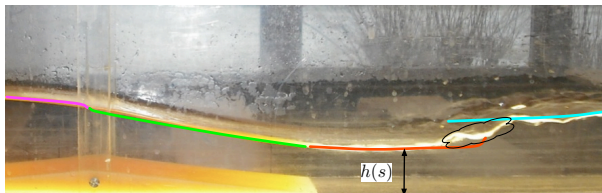
$$J = I \text{ et } R_H = h \implies$$

$$U = K_s h^{\frac{2}{3}} \sqrt{J}$$



- 1 Charge hydraulique
- 2 Franchissement d'un obstacle
- 3 Ressauts hydrauliques
- 4 Pertes de charge
- 5 Courbes de remous**
 - Équation de la ligne d'eau
 - Classification des courbes de remous
 - Alternance de courbes de remous
- 6 Travaux dirigés

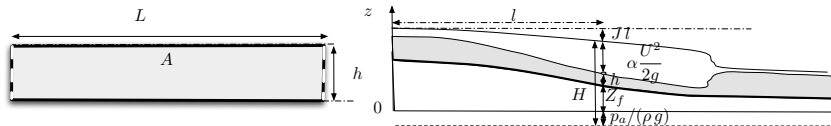
Équation de la ligne d'eau



Intégration d'une équation différentielle ordinaire

$$\frac{dh}{ds} = \frac{I - J}{1 - Fr^2}$$

- Ligne d'eau : $h(s)$
- Pente du fond : $I(s)$
- Perte de charge linéique : $J(s)$
- Nombre de Froude : $Fr(s)$



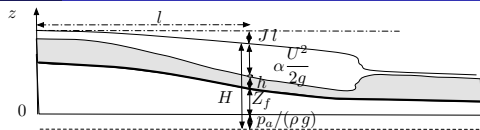
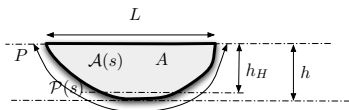
Rappel des définitions dans un canal infiniment large :

- Débit linéique : $q = h U$.
- Pente du fond : $l = -\frac{dZ_f}{ds}$
- Perte de charge linéique : $J = -\frac{dH}{ds}$
- Nombre de Froude : $Fr^2 = \frac{U^2}{g h} = \frac{q^2}{g h^3}$
- Charge hydraulique : $H = \frac{p_a}{\rho g} + Z_f + \left(h + \frac{q^2}{2g h^2} \right)$

$$\frac{dH}{ds} = \frac{dZ_f}{ds} + \left(1 - \frac{q^2}{g h^3} \right) \frac{dh}{ds} = -l + (1 - Fr^2) \frac{dh}{ds} = -J$$

On en déduit l'équation de la ligne d'eau :

$$\frac{dh}{ds} = \frac{l - J}{1 - Fr^2}$$



Cas d'une rivière de section quelconque :

- Débit : $Q = A U$
- Pente du fond : $l = -\frac{dZ_f}{ds}$
- Perte de charge linéique : $J = -\frac{dH}{ds}$
- Nombre de Froude : $Fr^2 = \frac{U^2}{g h_H} = \frac{Q^2}{g h_H A^2}$
- Charge hydraulique : $H = \frac{p_a}{\rho g} + Z_f + \left(h + \frac{Q^2}{2g A^2} \right)$

$$\frac{dh}{ds} = \frac{l - J}{1 - Fr^2} \quad \text{en utilisant} \quad L = \frac{dA}{dh}$$

Classification des courbes de remous

Hauteur normale h_n :

$$J = I \left(\frac{h}{h_n} \right)^{-10/3} \quad \text{avec}$$

$$h_n = \left(\frac{q^2}{I K_s^2} \right)^{3/10}$$

Hauteur critique h_c :

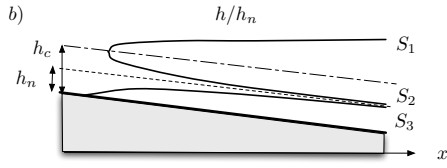
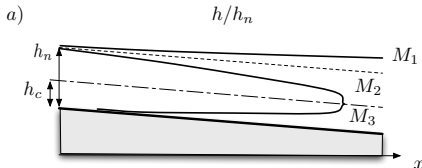
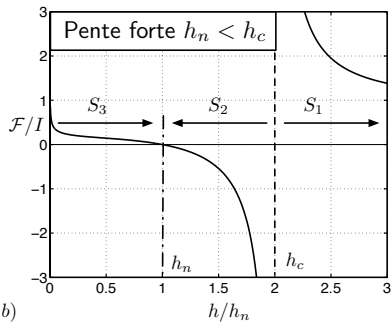
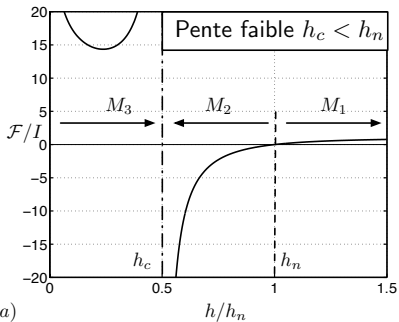
$$Fr^2 = \left(\frac{h}{h_c} \right)^{-3} \quad \text{avec}$$

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

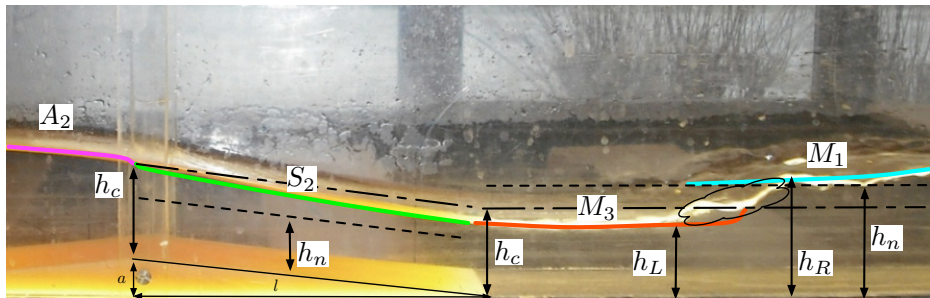
Équation de la ligne d'eau

$$\frac{dh}{ds} = \frac{I - J}{1 - Fr^2} = \mathcal{F}(h) = I \frac{1 - (h/h_n)^{-10/3}}{1 - (h/h_c)^{-3}}$$

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

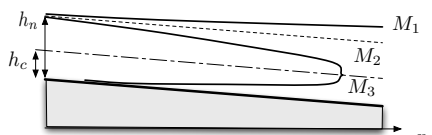


Alternance de courbes de remous

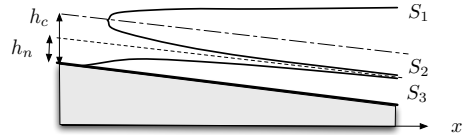


h/h_n

h/h_n

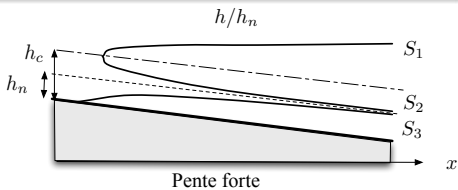
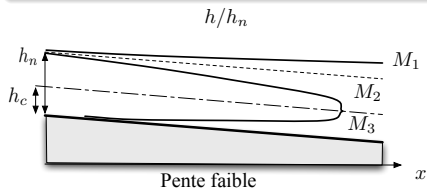
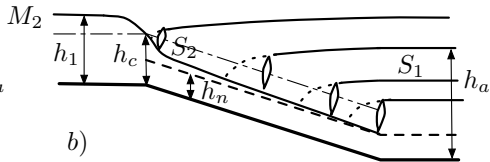
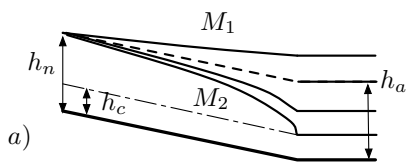


Pente faible



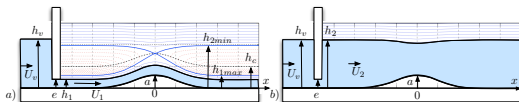
Pente forte

Autres exemples de courbes de remous

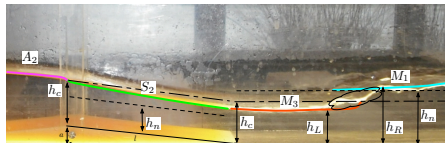


Travaux dirigés

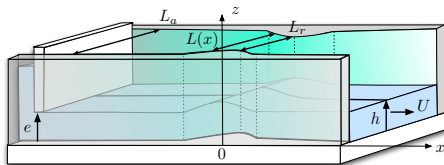
- Passage transcritique



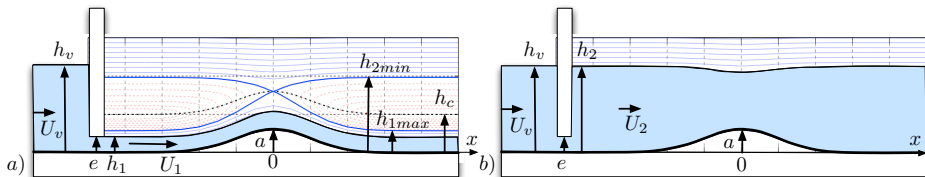
- Courbes de remous



- Canal jaugeur



Passage transcritique



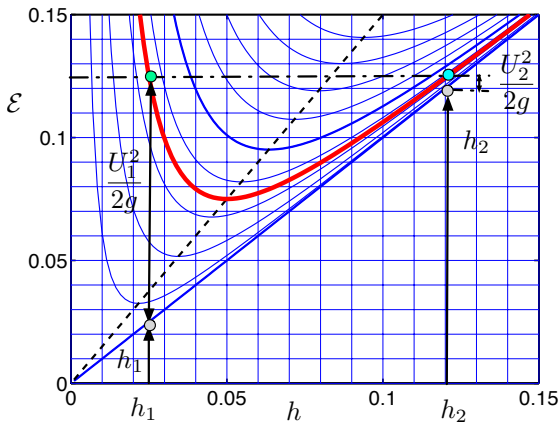
Énoncé du problème

- Obstacle de forme allongée avec $a = 3$ cm
- Vanne de fond “loin” de l’obstacle et d’ouverture $e = 2.5$ cm
- Débit linéique $q = 0.035$ m²/s

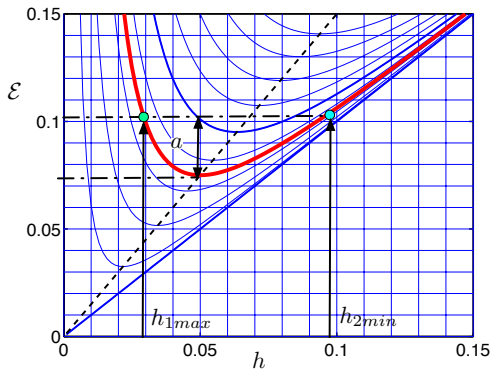
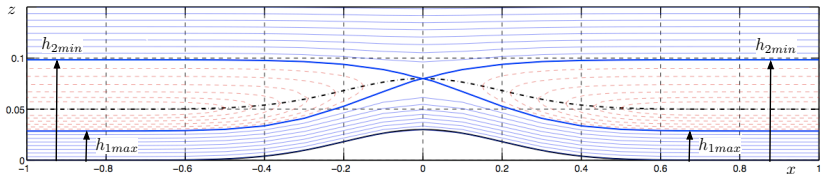
On cherche à décrire les régimes stationnaires en fonction de l’ouverture e

Questions

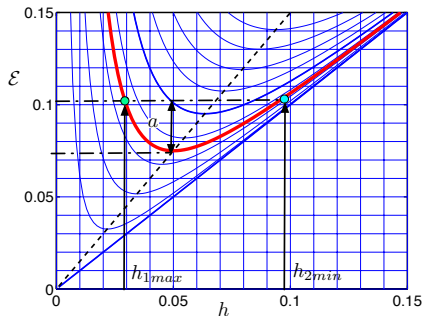
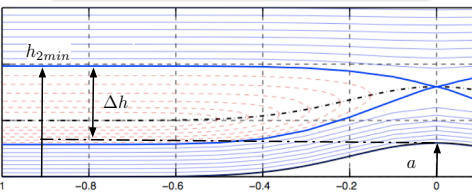
- 1 Montrer que $h_c = 5$ cm
- 2 Calculer U_1 et U_2
- 3 Comparer énergies cinétique et potentielle



1 Calculer h_{1max} et h_{2min}



On note $\Delta h = h_{2min} - a$

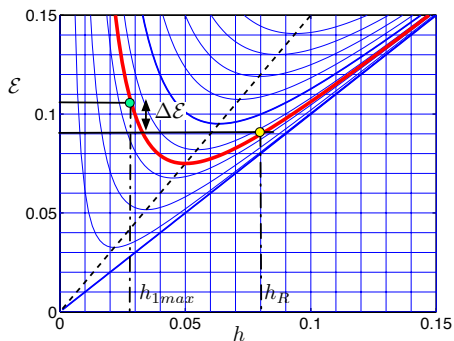
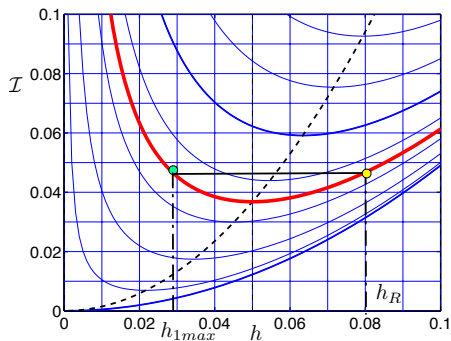
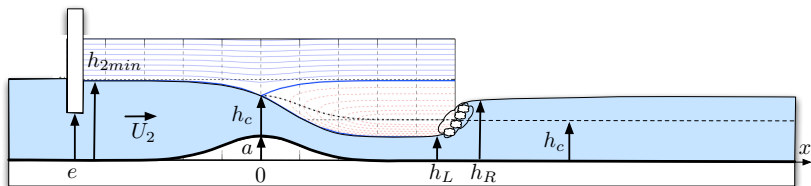


On suppose $\mathcal{E}(q, h_{2min}) = h_{2min} + \frac{U_{2min}^2}{2g} \sim h_{2min}$

① Justifier cette approximation

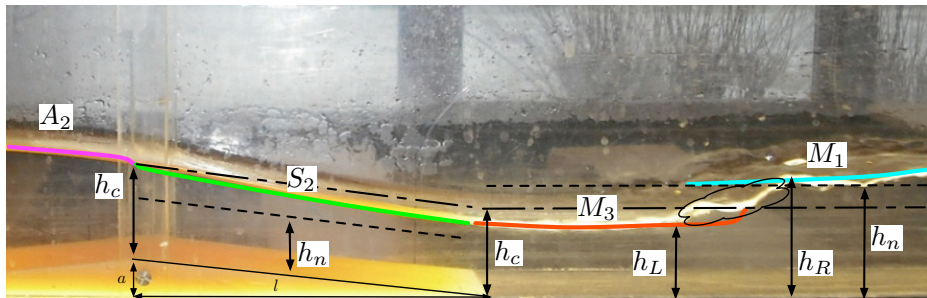
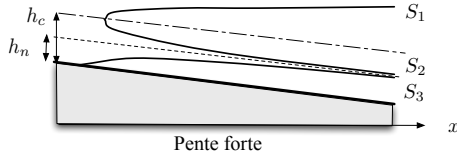
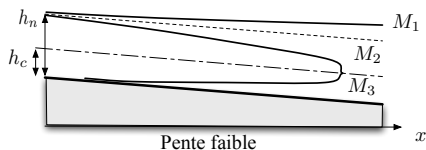
② En déduire que $q = \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{2g} (\Delta h)^{\frac{3}{2}} \sim 0.4 \sqrt{2g} (\Delta h)^{\frac{3}{2}}$

- Calculer la perte de charge à travers le ressaut

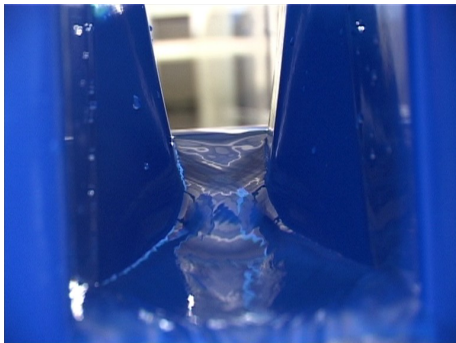


On suppose que $l_0 = 0.001$, $a = 3$ m, $l = 30$ cm et $K_s = 100$ m^{1/3} s⁻¹

- Calculer les hauteurs normales h_n dans le canal
- En déduire la nature des courbes de remous


 h/h_n
 h/h_n


Canal jaugeur

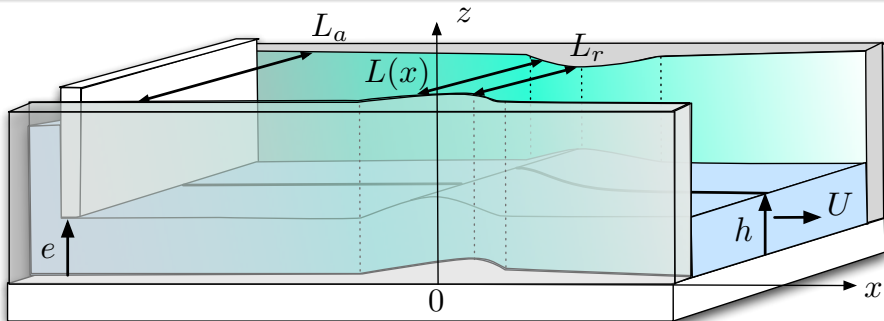


Parshall flume ou débitmètre Venturi

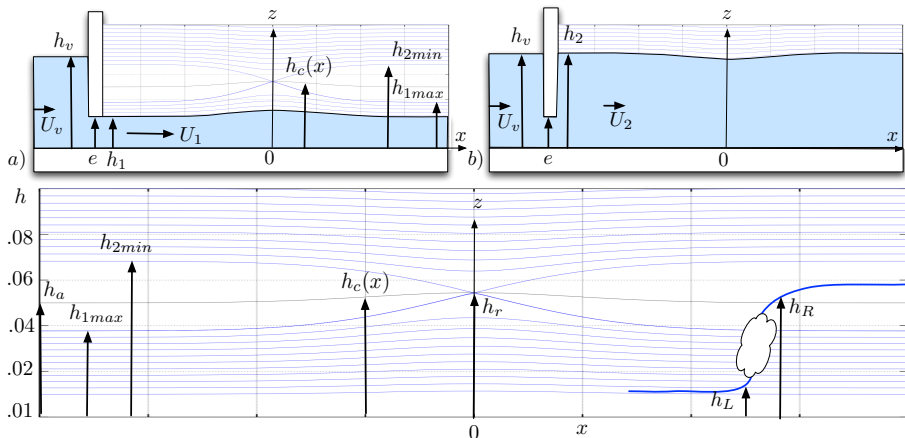
Énoncé du problème

- Largeurs du canal hydraulique : $L_a = 25$ cm et $L_r = 22$ cm
- On néglige la perte de charge linéique J

On cherche à décrire les régimes stationnaires en fonction de l'ouverture e

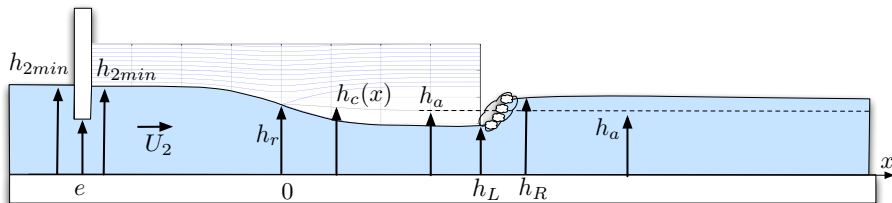


- Justifier l'existence de régimes conjugués pour un même débit Q
- Comment obtenir l'un ou l'autre débit
- Décrire l'ensemble des lignes d'eau



$$\text{Charge spécifique } \mathcal{E}(Q, h, L) = h + \frac{U^2}{2g} = h + \frac{Q^2}{2g L^2 h^2}$$

- Montrer que $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial h}(Q, h_r, L_r) =$ et que $\mathcal{E}(Q, h_r, L_r) = \frac{3}{2} \left(\frac{Q^2}{g L_r} \right)^{1/3}$



On suppose que $\mathcal{E}(q, h_{2min}, L_a) \sim h_{2min}$ (énergie cinétique négligeable)

- En déduire que $Q = \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{2g} (h_{2min})^{3/2} L_r \sim 0.4 \sqrt{2g} (h_{2min})^{3/2} L_r$