

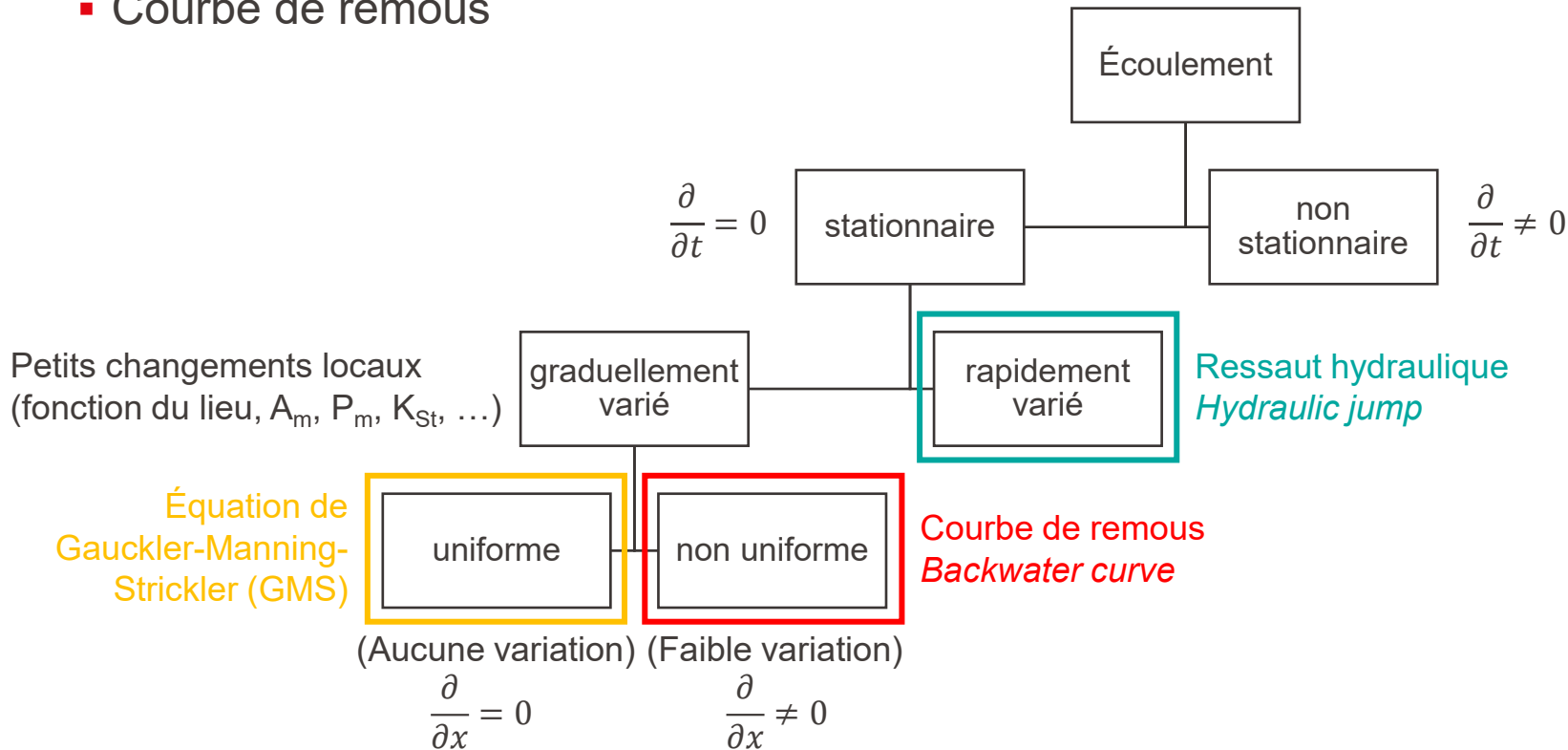


**Exercice 2 :  
Courbe de remous  
dans le canal de  
restitution d'une  
centrale  
hydroélectrique**

**Romain Van Mol  
Camille Phenix  
Marc-Antoine Courtois  
Dr Pedro Manso**

**Octobre 2024**

- Courbe de remous



- Calcul hydraulique de ces écoulements à partir de considérations énergétiques

$$H = z + h + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (1)$$

- Hypothèses:
  - écoulement unidirectionnel,
  - la répartition des pressions est hydrostatique,
  - la répartition des vitesses est uniforme,
  - l'axe du canal présente une faible courbure,
  - la pente maximale ne dépasse pas 10%, et
  - le fluide est homogène et incompressible.

- Pour les écoulements graduellement variés, le changement de la charge  $H$  par rapport à  $x$  résulte uniquement de la perte de charge due au frottement par unité de longueur  $J_f$  (signe négatif indique une réduction de la charge dans la direction  $x$ )

$$\frac{dH}{dx} = -J_f \quad (2)$$

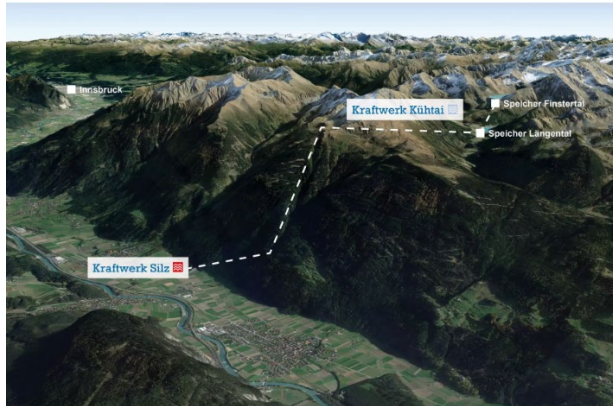
- Équation de la surface libre des écoulements graduellement variés par combinaison des équations (1) et (2)

$$\frac{dh}{dx} = h' = \frac{J_s - J_f + \frac{Q^2}{gA^3} \cdot \frac{\partial A}{\partial x}}{1 - \frac{Q^2}{gA^3} \cdot \frac{\partial A}{\partial h}} \rightarrow h' = \frac{J_s - J_f}{1 - \frac{Q^2}{gA^3} \cdot \frac{\partial A}{\partial h}} = \frac{J_s - J_f}{1 - \mathbf{Fr}^2}$$

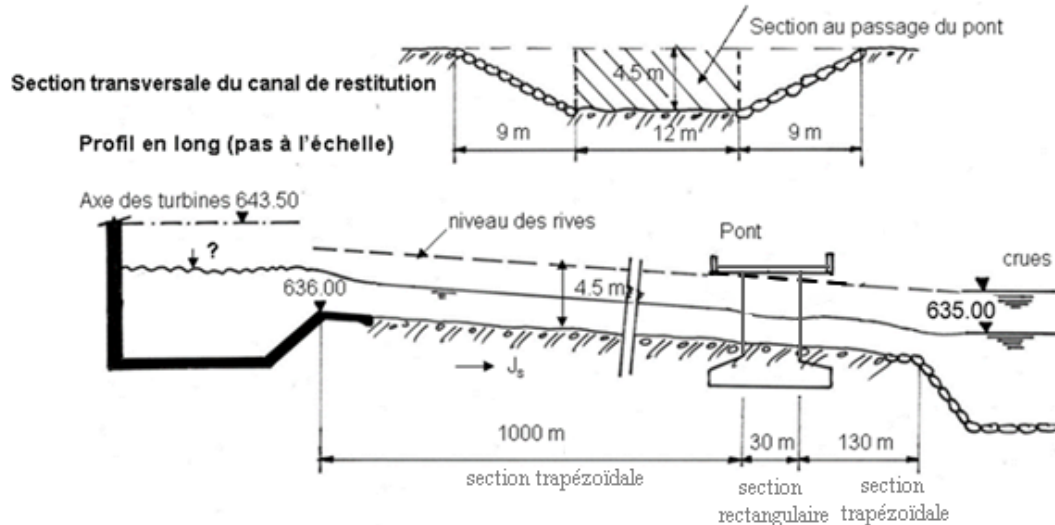
(canaux prismatiques où  $\frac{\partial A}{\partial x} = 0$ )



- L'eau turbinée dans une centrale hydroélectrique à haute chute est restituée par un canal trapézoïdal dans un cours d'eau à l'aval.
- Le débit installé des **deux turbines Pelton** à axe vertical est de **50 m<sup>3</sup>/s**. Une revanche minimale entre l'axe des turbines et le niveau d'eau dans la fosse de restitution doit être garantie pour toutes les conditions d'exploitation.

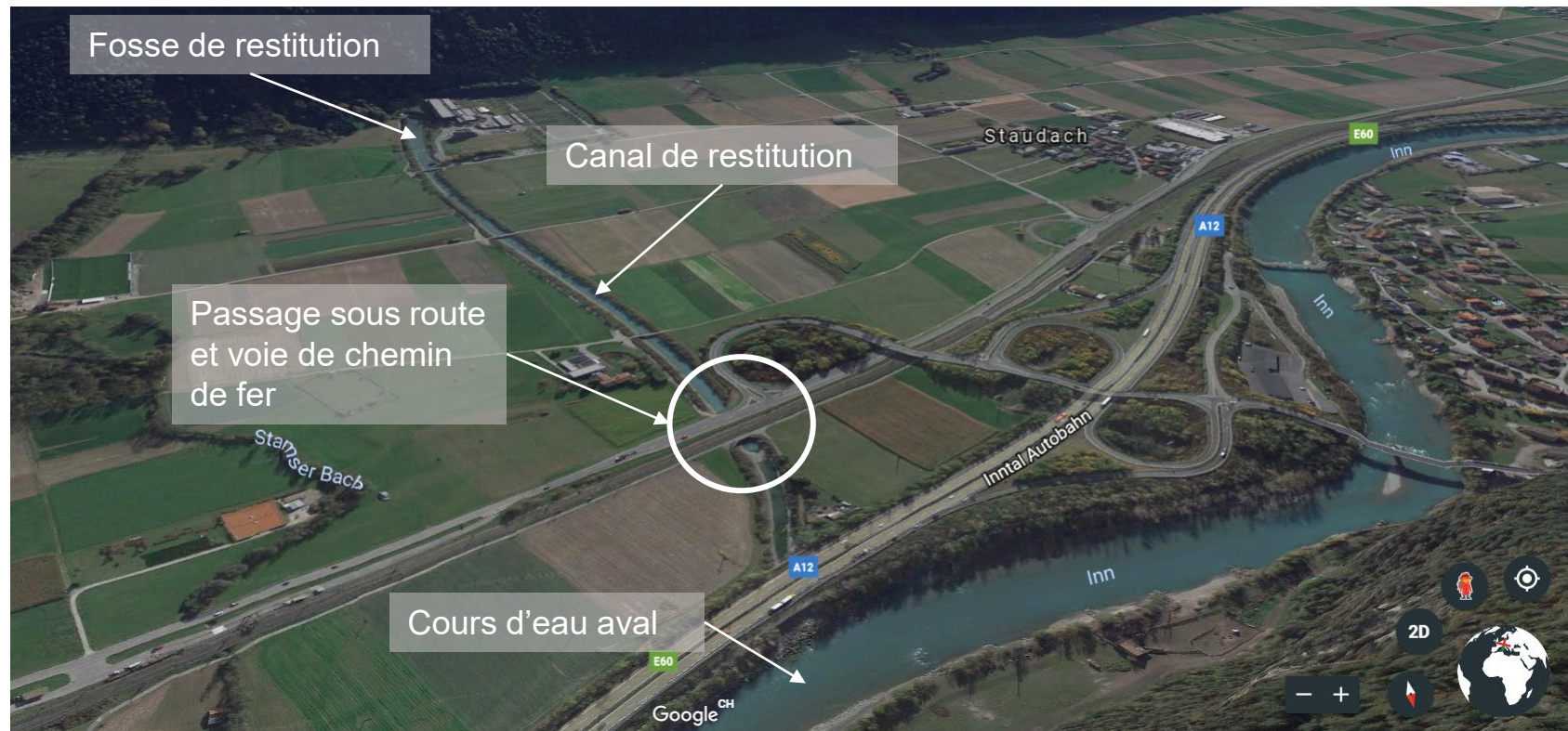


- Avant de rejoindre le cours d'eau aval, le canal de restitution trapézoïdal transite sous une route et voie de chemin de fer. Au passage, la section trapézoïdale du canal est réduite à une section rectangulaire. La transition en plan avec des murs bajoyers est réalisée avec un angle de  $30^\circ$  à l'amont et l'aval.



Avant construction de l'“Autobahn”







- Cas A: **section trapézoïdale uniforme** sur toute la longueur du canal de restitution
  - Pour le **niveau normal dans le cours d'eau aval**:
    - Quel est le niveau d'eau dans la fosse de restitution des turbines ?
    - Sur quelle longueur du canal la profondeur normale se produit-elle ?
    - Quel est le nombre de Froude dans le canal de restitution ?
  - Pour le **niveau de crue dans le cours d'eau aval**:
    - Quel est le niveau d'eau dans la fosse des turbines ?
    - Sur quelle longueur la profondeur du canal de 4.5 m n'est pas suffisante ?  
Quelle sont les conséquences pour le projet ?
    - Quel est le nombre de Froude dans le canal de restitution ?
- Cas B: **changement de section** (transition et passage avec section rectangulaire)



# Questions à résoudre

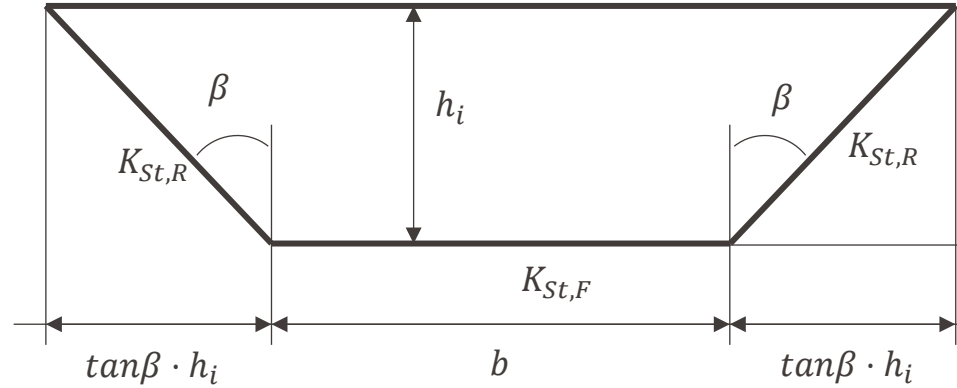
- Considérez le cas B en conditions normales d'exploitation. L'exploitant peut-il ajouter une troisième turbine Pelton pour augmenter le débit installé à  $75 \text{ m}^3/\text{s}$  ?
- Considérez que vous êtes législateur ou autorité fédérale ou cantonale, **quels critères** utiliseriez-vous pour classer le canal de restitution du point de vue de ses fonctions hydraulique, morphologique et écologique ? Serait-ce un canal éligible pour les mesures d'assainissement de la force hydraulique ?
- Modèle numérique HEC-RAS: répétez les calculs de lignes d'eau pour le cas B en conditions normales d'exploitation et en cas de crue

- Les niveaux dans le cours d'eau aval peuvent être considérés approximativement égaux au niveau d'énergie.
- Les pertes de charge locales (rétrécissement et élargissement) lors du passage du canal en-dessous de l'autoroute peuvent être négligées.
- La hauteur des rives gauche/droite est égal.
- Le tablier du pont se situe au-dessus du niveau des rives.

- Rugosité du fond  $K_{St, F}$  fonction du diamètre moyen du lit mobile  
 $d_m = 5 \text{ cm}$
- Rugosité des rives : protection par enrochement avec rugosité (selon Strickler)  $K_{St, R} = \text{X} \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- Pente du canal :  $\text{X} \text{ ‰}$
- Niveau d'eau admis dans le cours d'eau principal : 635.00 m s.m.
- Niveau d'eau maximal dans le cours d'eau principal en crue :  $\text{X} \text{ m s.m.}$
- Rugosité (selon Strickler) dans la transition et le passage  
 $K_{St} = 72 \text{ m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$  (sur tout le périmètre)

- Note de calcul (avec données originales) et profils en long de la ligne d'eau dans le canal de restitution en montrant avec échelle distordue les informations suivantes :
  - Ligne du fond
  - Hauteur normale de l'écoulement
  - Hauteur critique
  - Courbe de remous (ligne d'eau)
  - Ligne d'énergie
  - Froude + vitesse d'écoulement (axe secondaire)
  - Ligne des rives





*Hypothèse : vitesse d'écoulement égale dans chaque sous-section.*

Rugosité du fond selon Strickler :

$$K_{St,F} = \frac{21.1}{\sqrt[6]{d_m}}$$

Nombre de Froude :

$$\text{Fr}_i = \frac{v_i}{\sqrt{g \cdot \frac{A_m}{b + 2 \cdot \tan\beta \cdot h_i}}}$$

Typo dans le  
polycopié p. 51  
formule 2.24 !

- Périmètre mouillé :

$$P_{m,i} = b + 2 \cdot \frac{h_i}{\cos\beta}$$

- Aire mouillée :

$$A_{m,i} = b \cdot h_i + h_i^2 \cdot \tan\beta$$

- Rugosité composée (Strickler) :

$$K_{St,i} = P_{m,i}^{2/3} \cdot \left[ \sum \frac{P_{m,j}}{K_{St,j}^{3/2}} \right]^{-2/3}$$

- Périmètres mouillés selon sous-sections :

- $P_{m,j,F} = b$

- $P_{m,j,R} = 2 \cdot \frac{h_i}{\cos\beta}$

- $\rightarrow K_{St,i} = f(h_i)$

- Hauteur critique (écoulement critique,  $\text{Fr} = 1$ ) :

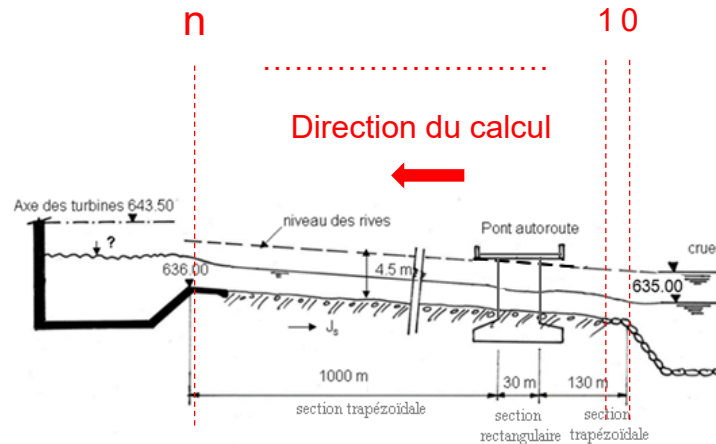
$$h_c = \frac{1}{b + h_c \cdot \tan\beta} \cdot \sqrt[3]{\frac{Q^2(b + h_c \cdot \tan\beta \cdot 2)}{g}}$$

- Hauteur normale (écoulement uniforme) :

$$Q = K_{St}(h_n) \cdot J^{1/2} \cdot \frac{A(h_n)_m^{5/3}}{P(h_n)_m^{2/3}}$$

→ Méthode de résolution par itérations pour obtenir Q

- Direction: si  $Fr < 1$ , **écoulement fluvial** → vers l'amont
- Point de départ: hauteur d'eau connue (embouchure avec la rivière principale)
  - $h_c$  si  $H_c > \text{niveau rivière principale}$  ( $H_c = h_c + \frac{v_c^2}{2g}$  et  $v_c = \frac{Q}{A_m(h_c)}$ )
  - Niveau de la rivière principale sinon



$\Delta x$  à définir ( $\approx 30$  m)



- Calcul «pas par pas»

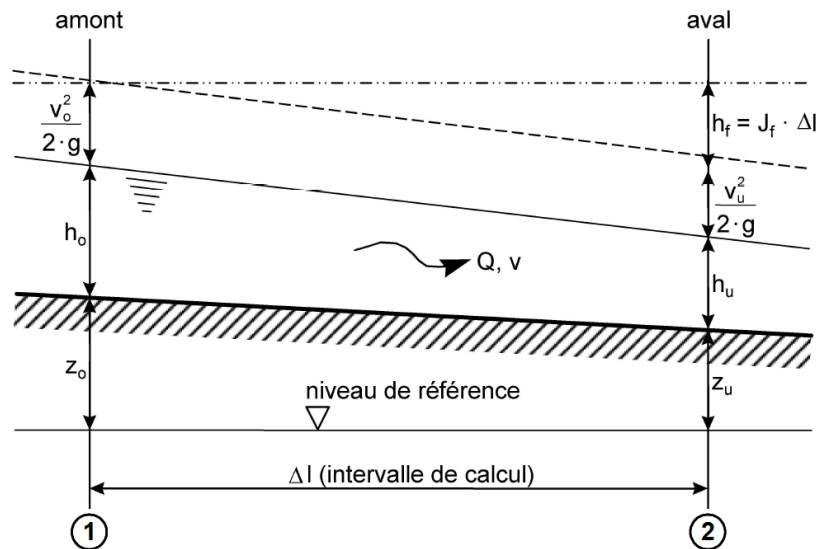
- $H_i = z_i + h_i + \frac{v_i^2}{2g}$

- **Bernouilli :**

$$H_1 = H_2 + h_f$$

- **Continuité :**

$$Q = A_{m,1} \cdot v_1 = A_{m,2} \cdot v_2$$



- **Perte de charge (Manning-Strickler) :**

$$h_{f,i} = J_{f,i} \cdot \Delta L_i = \frac{v_{m,i}^2 \cdot \Delta L}{K_{m,i}^2 \cdot R_{h,m,i}^{4/3}}$$

$$v_{m,i} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$K_{m,i} = \frac{K_1 + K_2}{2}$$

$$R_{h,m,i} = \frac{R_{h1} + R_{h2}}{2}$$

Section	Position	Angle	Section i										Section i+1										Perte de charge entre i et i+1				Contrôle
			Hauteur d'eau	Périmètre mouillé	Aire mouillée	Rayon hydraulique	Vitesse	Rugosité	Dénivellation	Charge	Hauteur d'eau	Périmètre mouillé	Aire mouillée	Rayon hydraulique	Vitesse	Rugosité	Dénivellation	Charge	Pertes de charge								
$x_i$	$\beta$ [rad]		$h_i$ [m]	$P_{m,i}$ [m]	$A_{m,i}$ [m <sup>2</sup> ]	$R_{h,i}$ [m]	$v_i$ [m/s]	$K_i$ [m <sup>1/3</sup> /s]	$z_i$ [m]	$H_i$ [m]	$h_{i+1}$ [m]	$P_{m,i+1}$ [m]	$A_{m,i+1}$ [m <sup>2</sup> ]	$R_{h,i+1}$ [m]	$v_{i+1}$ [m/s]	$K_{i+1}$ [m <sup>1/3</sup> /s]	$z_{i+1}$ [m]	$H_{i+1}$ [m]	$R_{Hm}$	$V_m$	$K_m$	$h_f$ [m]	$H_i - H_{i+1} + h_f = 0$				
0	0	X	X	x	x	x	x	x	x	X	X	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x	x	0				
1	$\Delta x$	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0				
2	$2\Delta x$	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0				
...																											

- Clé de la résolution réside dans la “l'estimation de  $h_{i+1}$ ”
- Méthode de résolution par itérations (p.ex. Goalseek sur Excel)
- Faites attention aux chiffres significatifs

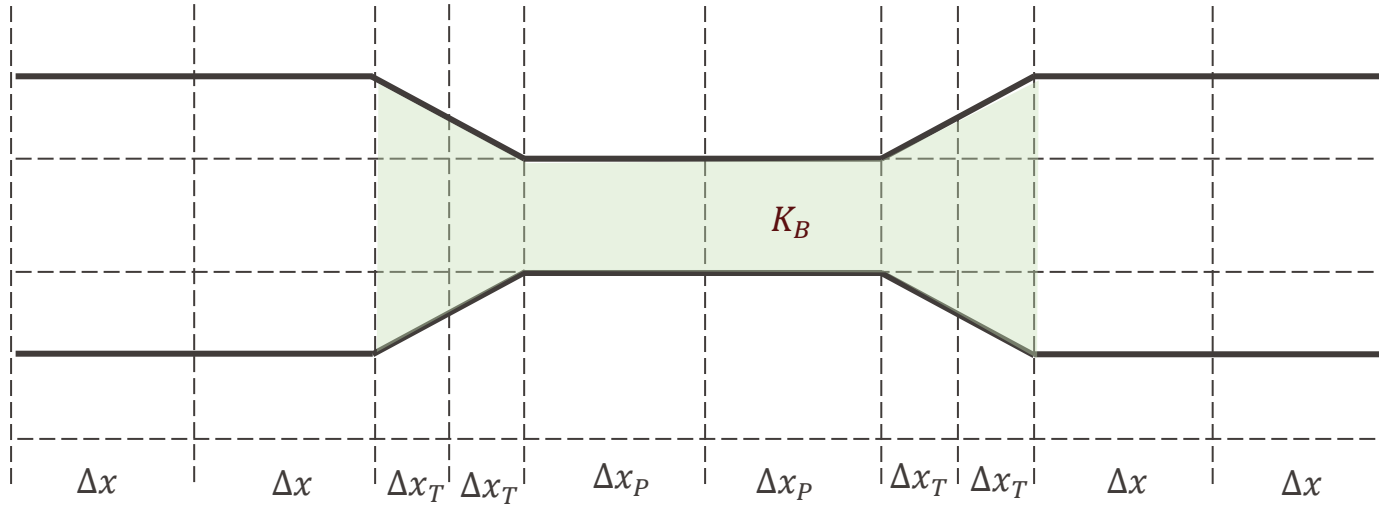


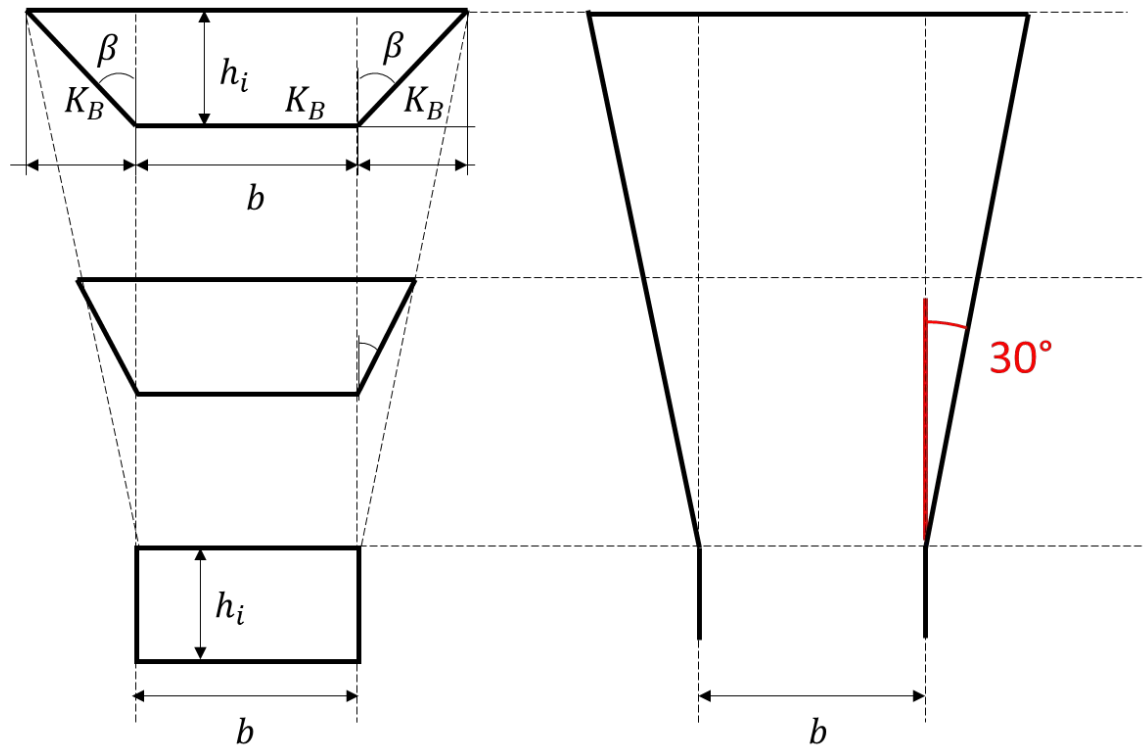
- Procédure identique
- Changements:  $\beta, K, \Delta x$

$$h_{c, \text{section rectangulaire}} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}}$$

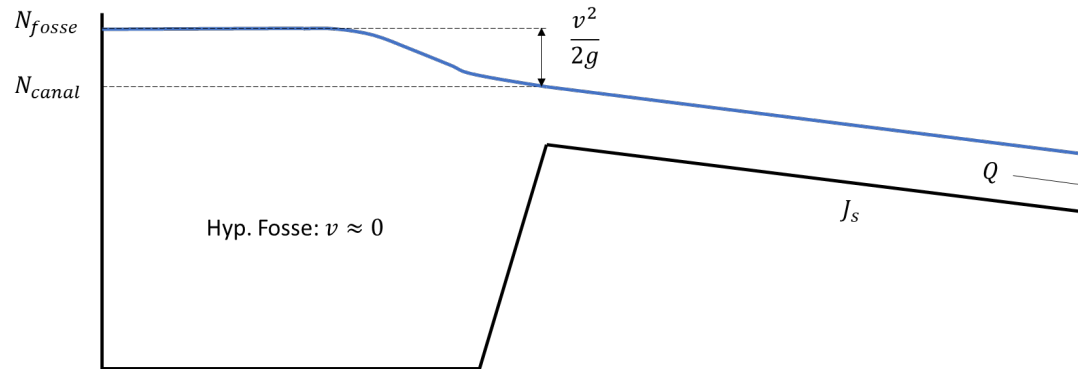
- $K_{St} = 72 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  sur tout le périmètre pour la transition et le passage
- Intervalle  $\Delta x \approx 30 \text{ m}$  dans la section trapézoïdale
- Intervalle  $\Delta x$  différent dans transition (2x2 sections) et passage (2 sections)  $\rightarrow 6$  sections au total







- L'élévation du plan d'eau dans la fosse  $N_{fosse} = N_{canal} + \frac{v_{canal}^2}{2g}$



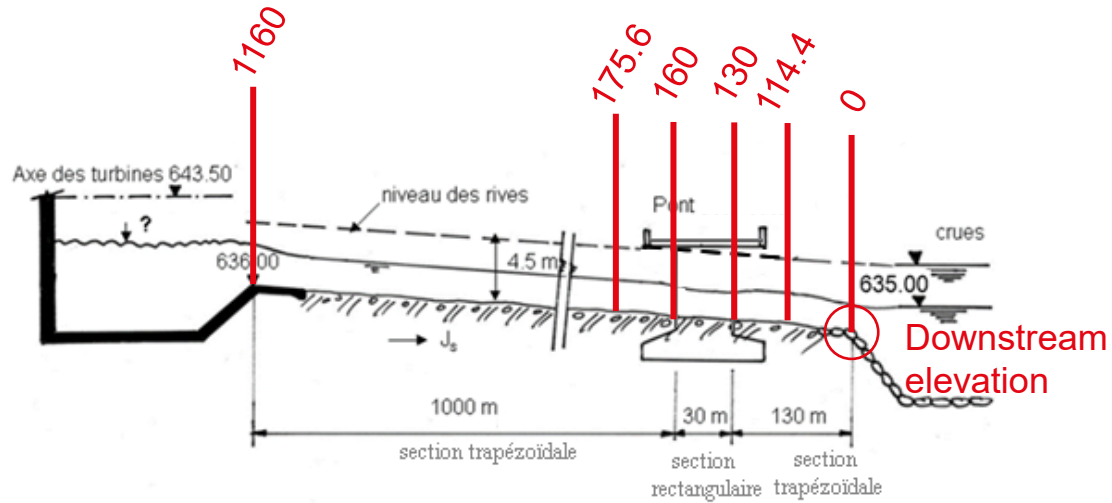
- Télécharger HEC-RAS: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/download.aspx>
- Géométrie à disposition sur Moodle
- A faire :
  - Changer système d'unités (*Options* → *Unit System*)
  - Définition pour chaque profil:
    - Adapter la rugosité de chaque profil selon **Manning** (dans *Geometric Data* → *Cross Sections*)
    - Adapter l'élévation de chaque profil (Dans *Cross Sections* → *Options* → *Adjust Elevations*)
  - Discrétiser entre les profils (Dans *Geometric Data* → *Tools* → *XS Interpolations* → *Between 2 XS's*)
  - Définir la condition aval:
    - *Edit steady flow data* → *Reach boundary conditions* → *Known W.S.* → *Downstream*
  - Lancer le calcul
  - Extraction des résultats

# HEC-RAS : Virtual Machine (VM)

Si vous utilisez macOS, il faut vous connecter à une machine virtuelle selon la procédure suivante :

1. Utiliser VMware Horizon Client
2. Se connecter à la machine ENAC-SGC
3. Sur le bureau ouvrir le dossier "Programs GC"
4. Ouvrir HEC-RAS

- 6 sections



- Séance exercice le vendredi de 10h15 à 12h
- Office Hours cafétéria PL-LCH :
  - Lundi 15h à 16h
  - Mercredi 8h à 9h
- Forum - Questions sur Moodle
  
- Rendu de l'exercice : **30.10.2024 à 23h59**