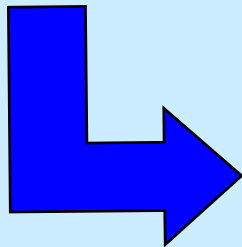


Hydraulique des ouvrages
Contenu du cours

- 1) Canaux et cours d'eau
- 2) Conduites en charge
- 3) Déversoirs
- 4) Ecoulements sous vanne et bassin amortisseurs
- 5) Ecoulements souterrains autour des galeries et drains
- 6) Ponceaux
- 7) Ecoulements à travers les grilles
- 8) Ecoulement autour des obstacles et sédimentation

Canaux et cours d'eaux

Définition: Canaux et cours d'eau sont des ouvrages hydrauliques linéaires qui transportent de l'eau à surface libre



Canaux naturels

Cours d'eau

- Rivières
- Torrents

Canaux construits

Aménagements hydroélectriques

- Canaux d'adduction
- Canaux de restitution

Evacuateurs de crues

- Coursiers

Canaux de drainage

Canaux d'irrigation

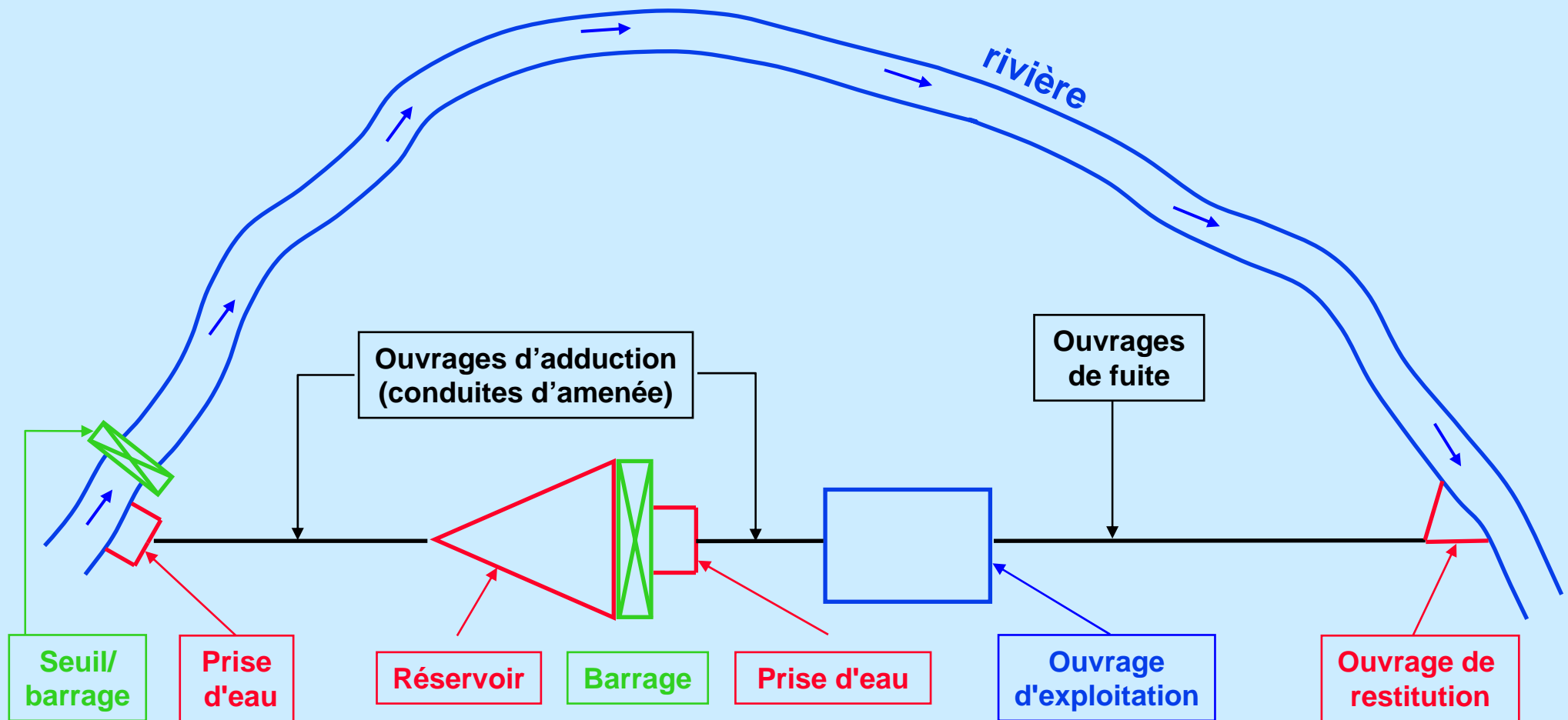
Canaux d'évacuations des
eaux de pluie et eaux usées

Canaux de navigation

Hydraulique des ouvrages

Canaux et cours d'eau

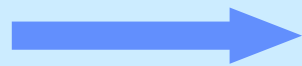
Éléments d'utilisation des constructions hydrauliques



Équations fondamentales : Principe de continuité

Le principe de continuité exprime la conservation de la masse, ce qui signifie qu'aucun fluide ne peut-être créé, ni disparaître dans un volume donné.

- Écoulements stationnaires de fluides incompressibles et homogènes



Conservation du volume

$$\operatorname{div}(\vec{V}) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

- Écoulements bidirectionnels : $|w| \ll |u|$ donc $\vec{V} \approx (u, v, 0)$
Intégration sur la hauteur de l'écoulement h est possible

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

- Écoulements unidirectionnels : vitesse latérale v beaucoup plus petit que la vitesse longitudinale u

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow q = uh$$

q : constante d'intégration

Équations fondamentales : Principe de continuité

La constante d'intégration q peut-être identifiée avec le débit par unité de largeur.
Pour une section mouillée $A = A(h, x)$, le débit résultant s'exprime par

$$Q = V \cdot A$$

$V \equiv u$, valeur absolue de la vitesse dans la direction longitudinale x du canal

Équations fondamentales : Principe de quantité de mouvement

Le théorème de quantité de mouvement stipule que les forces extérieures sont en équilibre avec la force d'inertie spécifiée

$$\vec{F} = \rho \left(d\vec{V} / dt \right) \text{ (selon théorème de Newton).}$$

 Forces extérieures

- Forces de volume (conséquence de la gravitation)
- Forces de pressions (composantes des forces moléculaires)
- Forces de viscosité (interaction entre les particules en mouvement)
- Forces de surface (agissant de l'extérieur sur la particule par attraction moléculaire)
- Forces capillaires (différence de l'attraction moléculaire de deux milieux différents)
- Forces géostrophiques (accélération de Coriolis due à la rotation de la terre)

Équations fondamentales : Principe de quantité de mouvement

Fluide réel

En tenant compte des forces de viscosité on obtient l'équation de Navier-Stokes :

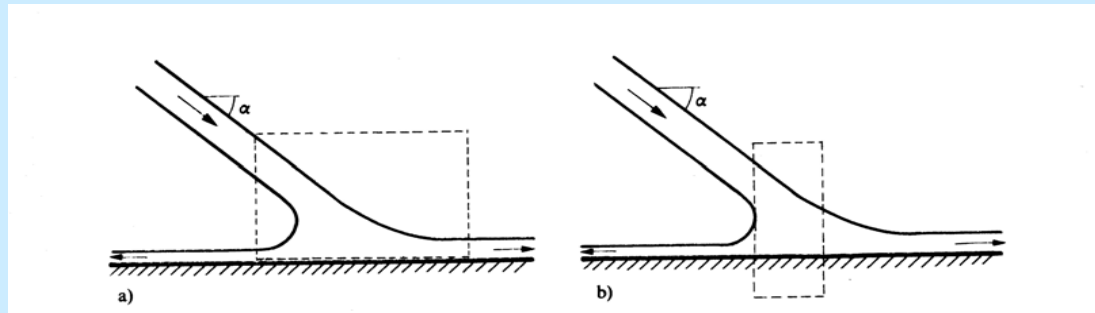
$$\text{grad} \left(\rho \frac{V^2}{2} + p + \rho gz \right) = -\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} - \rho (\text{rot} \vec{V}) \times \vec{V} + \mu \Delta \vec{V}$$

μ : viscosité dynamique

- Écoulements laminaires : μ dépend du fluide considéré et de sa température :
Eau de 20 ° C : $\mu = 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$
- Écoulements turbulents : μ dépend en plus de la structure interne de l'écoulement

Équation intégrale de la quantité de mouvement

Changement temporel de la force d'inertie est en équilibre avec les forces extérieures agissant sur le volume de contrôle (choix arbitraire)



Choix du volume de contrôle (hachuré) pour le problème de bifurcation d'un jet sur une paroi : a) lignes de courant parallèles dans chacune des trois sections
b) lignes de courants courbes, problème bidirectionnel

Théorème de quantité de mouvement

$$\frac{d\vec{I}}{dt} = \vec{R}$$

Écoulements stationnaires

$$\int \rho \vec{V} dQ = \vec{R}$$

Équations fondamentales : Principe de quantité de mouvement

Équation de Bernoulli

Dans le cas stationnaire ($\delta\vec{V}/\delta t \equiv 0$), irrotationnel ($rot\vec{V} \equiv 0$) d'un fluide parfait de viscosité $\mu = 0$, l'équation de Navier-Stokes se simplifie et devient

$$grad\left(\frac{\rho V^2}{2} + p + \rho gz\right) = 0$$

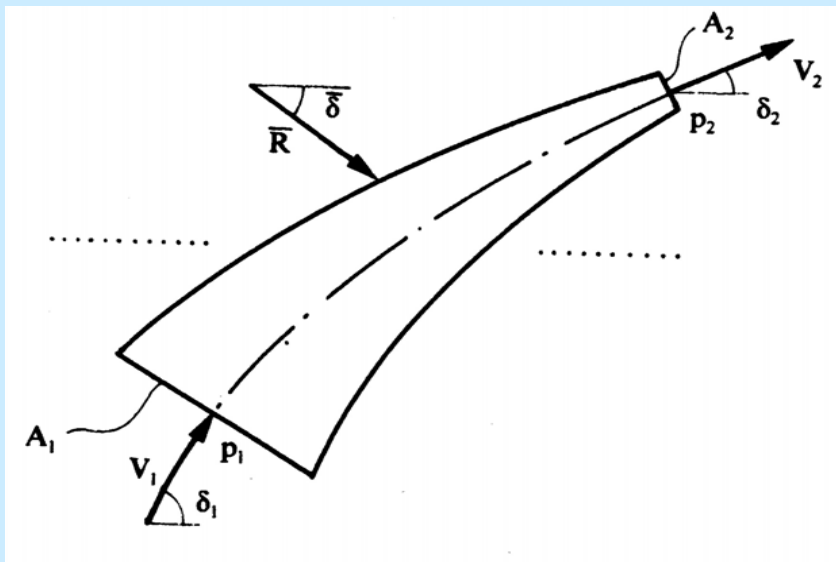
donc

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}$$

H : constante d'intégration \equiv la charge de l'écoulement

Équation intégrale de la quantité de mouvement

Pour un écoulement déterminé par un tube de courant



Application du théorème de la quantité de mouvement intégrée sur l'écoulement dans un tube de courant (...) axe de référence.

$$\left(p_1 + \rho_1 V_1^2 \right) A_1 \cos \delta_1 - \left(p_2 + \rho_2 V_2^2 \right) A_2 \cos \delta_2 \equiv \bar{R} \cos \bar{\delta}$$

A_1, A_2 : sections d'entrée et de sortie

δ_1, δ_2 : direction de l'écoulement

\bar{R} : résultante des forces extérieures

p_1, p_2 : pression agissent sur section A_1 / A_2

Force de courant

$$\bar{S} = \left(p + \rho V^2 \right) A \cos \delta$$

Équations fondamentales : Hydraulique des écoulements

L'hydraulique, à la différence de l'hydrodynamique, traite les écoulements par une approche unidirectionnelle.

En résumé, l'hydraulique des écoulements stationnaires se base sur deux hypothèses essentielles, à savoir :

- répartition uniforme des vitesses dans une section et
- répartition hydrostatique des pressions.

Avec ces deux hypothèses, l'écoulement est régi par les équations suivantes

Continuité	$Q = V \cdot A$	$Q' = \pm q_L$
Charge	$H = z + h + \frac{V^2}{2g}$	$H' = -J_E$
Impulsion totale	$S = h_p A + QV / g$	$S' = -J_F \cdot A$

J_E : Perte d'énergie resp. changements longitudinaux de la charge

J_F : Perte de frottement resp. changement longitudinaux de l'impulsion totale

h_p : Distance verticale entre la ligne de pression (surface ligne pour des canaux) et le centre de gravité de la section A considérée

Hauteurs typiques de l'écoulement

Hauteur uniforme – Formule de Manning-Strickler

Dans un canal, il peut exister un écoulement de hauteur constante, appelé hauteur uniforme h_N sous conditions

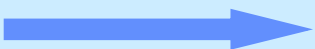
- d'un écoulement stationnaire, à débit localement invariable
- d'un écoulement unidirectionnel (répartition uniforme des vitesses de répartition statique et répartition hydrostatique des pressions)
- d'un axe rectiligne
- d'une géométrie de section prismatique, $A(h)$
- d'une pente constante et pas trop grande, $J_s < 10\%$
- d'une rugosité constante

Hauteurs typiques de l'écoulement

Hauteur uniforme – Formule de Manning-Strickler

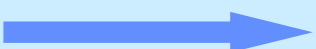
Pente du frottement : $dH / dx = -J_f$

Charge de l'écoulement : $H = z + h + \frac{V^2}{2g}$


$$\frac{dH}{dx} = \frac{d}{dx} \left(z + h + \frac{Q^2}{2gA^2} \right) = -J_s + h' - \frac{Q^2}{gA^3} A' = -J_f$$

où $J_s = -z'$ pente du fond du canal

Avec $A' = (dA/dh)h'$


$$h' = \frac{J_s - J_f}{1 - F^2}$$

où

$$F^2 = \frac{Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dh}$$

Hauteurs typiques de l'écoulement

Hauteur uniforme – Formule de Manning-Strickler

Écoulement fluvial si $F < 1$

Écoulement torrentiel si $F > 1$

Écoulement uniforme si $J_s = J_f = J_e = J$

Pour des canaux rugueux, en pratique la formule de Manning-Strickler donne des résultats satisfaisants.

$$J_f = \frac{V^2}{K^2 R_h^{4/3}}$$

ou

$$J_f = \frac{Q^2 P^{4/3}}{K^2 A^{10/3}}$$

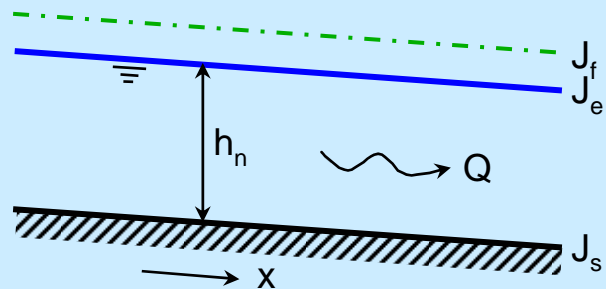
$$R_h = A/P$$

$$V = Q/A$$

Écoulement stationnaire et uniforme

⇒ Un écoulement uniforme s'établit dans un cours d'eau si

- ◆ la pente du lit est constante
- ◆ la géométrie (section mouillée) est pratiquement constante
- ◆ la rugosité est constante
- ◆ le débit est constant (écoulement stationnaire)



h_n : hauteur uniforme de l'écoulement

$$\frac{dh}{dx} = 0$$

$$J = J_s = J_f = J_e$$

Formule de Manning - Strickler

$$V = K \cdot J^{1/2} \cdot R^{2/3}$$
$$Q = K \cdot J^{1/2} \cdot \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}}$$

Hauteurs typiques de l'écoulement

Hauteur uniforme – Formule de Darcy-Weissbach

En introduisant le coefficient de forme

$$\phi = R_{he} / R_h$$

où R_{he} est le rayon hydraulique efficace et avec $R = 4(\phi R_h) V / \nu$, $\varepsilon = k_s / (4(\phi R_h))$,

l'équation de Darcy-Weissbach s'écrit

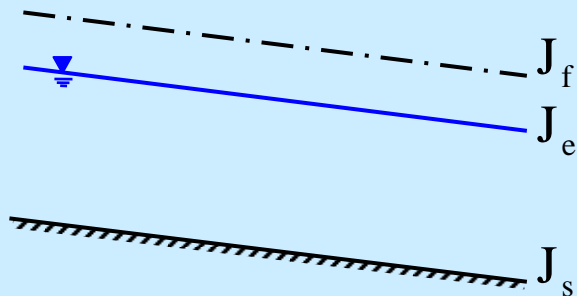
$$\boxed{J_f = \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{f}{4R_h}} \quad \boxed{\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left[\frac{\varepsilon}{3,7} + \frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right]} \quad \text{et} \quad \boxed{V = -4\sqrt{2gJ_s R_h} \cdot \log \left[\frac{k_s}{14,8\phi R_h} + \frac{2,51\nu}{8\phi\sqrt{2gJ_s R_h^3}} \right]}$$

Ø selon Bode pour un canal rectangulaire

$$\boxed{\phi = \left(\frac{1,629(h/b)}{1+2(h/b)} \right)^{1/4}}$$

Canaux - Dimensionnement hydraulique

Ecoulement uniforme



$$J = J_s = J_f = J_e$$

$$v = K J^{1/2} R_h^{2/3} \quad (\text{formule de Manning-Strickler})$$

$$Q = v \cdot A$$

$$Q = K J^{1/2} \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}}$$

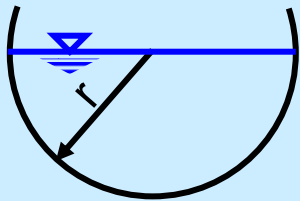
Rayon hydraulique adimensionnel :

$$r_f = \frac{R}{\sqrt{A}} = \frac{\sqrt{A}}{P}$$

$$Q = K \cdot J^{1/2} \cdot A^{4/3} \cdot r_f^{2/3}$$

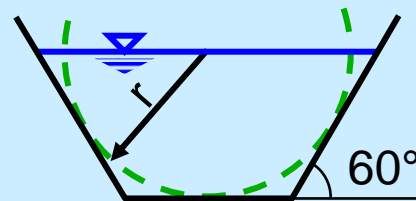
Canaux - Section optimale du point de vue hydraulique

$$r_f = 0.399$$



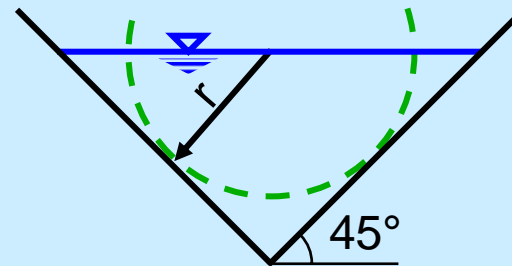
$$Q = 100 \%$$

$$r_f = 0.380$$



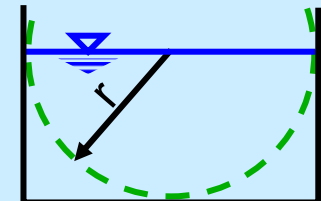
$$Q = 97 \%$$

$$r_f = 0.354$$



$$Q = 92 \%$$

$$r_f = 0.354$$



$$Q = 92 \%$$

Rayon hydraulique adimensionnel:

$$r_f = \frac{R}{\sqrt{A}} = \frac{\sqrt{A}}{P}$$

Écoulement critique

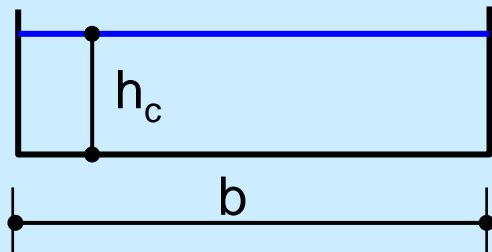
⇒ Pour la hauteur critique la charge de l'écoulement est minimale

$$H = h + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} \text{ avec } A = fct(h)$$

$$\frac{dH}{dh} = 1 - \frac{Q^2}{g \cdot A^3} \cdot \frac{dA}{dh} = 1 - F^2 = 0$$

$$F^2 = \frac{Q^2}{g \cdot A^3} \cdot \frac{dA}{dh} \quad F(h_c) = 1$$

⇒ section rectangulaire $\frac{dA}{dh} = b$



$$F^2 = 1 = \frac{Q^2}{g \cdot A^3} \cdot b$$

avec
 $Q = v \cdot b \cdot h$

$$A = b \cdot h_c$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot b^2}}$$

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

$$H_c = \frac{3}{2} h_c$$

Hauteurs typiques de l'écoulement

Coefficient de rugosité selon la formule de Manning-Strickler

Canaux

Type du cours d'eau	État du lit		
	bon	assez bon	mauvais
Canaux			
- en béton, avec lissage	90	80	65
coulé	75	65	60
surface rugueuse	65	60	50
- en gunite, section plane	60	50	45
section ondulée	55	45	40
- en terre, rectilignes et uniformes	60	50	40
- à larges méandres	45	40	35
- dragués	40	35	30
- au rocher, lisses et réguliers	40	35	30
bruts et irréguliers	30	25	20
- avec lits de pierre rugueuse, herbes sur berges en terre	40	35	25
- à fond en terre, berges en galets (matériaux en suspension)	35	30	25

Hauteurs typiques de l'écoulement

Coefficient de rugosité selon la formule de Manning-Strickler

Cours d'eau naturels

Type du cours d'eau	État du lit		
	bon	assez bon	Mauvais
<i>Cours d'eau naturels</i>			
- Berges propres et rectilignes en eaux ordinaires			
• pas de seuils ni de mouilles	40	35	30
• avec quelques herbes et pierres	35	30	25
- Lits naturels avec méandres,			
• quelques étangs et endroits peu profond, propres	30	25	20
• faibles tirants d'eau, sections et pentes plus faibles	25	20	18
- Zones à eau coulant lentement, avec assez de végétation ou avec fosses très profondes	20	15	10
- Zones avec beaucoup de végétation	10	8	7

Interaction de l'écoulement avec la rugosité du lit

Loi de frottement et vitesse de l'écoulement

- Loi de frottement empirique selon la distribution

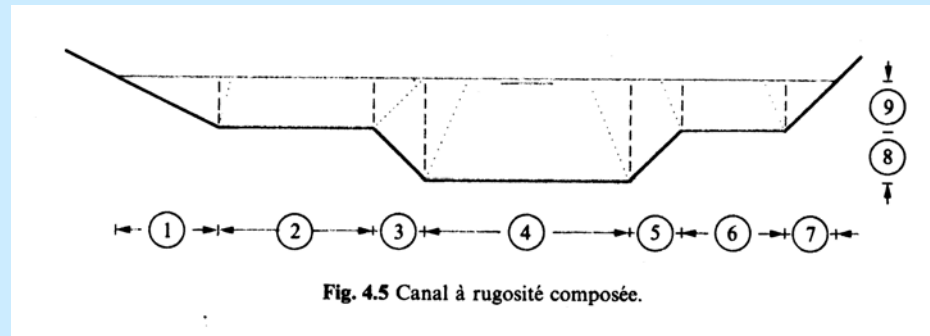
logarithmique $v_m = \sqrt{ghJ'} 2.5 \ln \left(12.27 \frac{h}{2d_{90}} \right)$

avec $J' = J \left(1 - e^{\frac{-0.02h}{d_{90}\sqrt{J}}} \right)$

- Loi de frottement de Strickler $v_m = k_{st} h^{2/3} J^{1/2}$

avec $k_{st} = \frac{21.1}{\sqrt[6]{d_{90}}}$

Canaux à rugosité composée



Coefficient de rugosité équivalent de la section complète

Hypothèse 1 : vitesses égales dans chaque sous-section

$$K = P^{2/3} \cdot \left[\sum_{i=1}^n (P_i / K_i^{3/2}) \right]^{-2/3}$$

Hypothèse 2 : force résistante totale égale à la somme de toutes les sous-forces

$$K = P^{1/2} \cdot \left[\sum_{i=1}^n (P_i / K_i^{3/2}) \right]^{-1/2}$$

Hypothèse 3 : débit total égal à la somme de tous les débits de sous-section

$$K = \left[PR_h^{5/3} \right]^{-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^n (P_i R_{hi}^{5/3} K_i) \right]$$

Interaction de l'écoulement avec les rives

L'effet des parois (rives) pour les canaux étroits

- Rayon hydraulique des surfaces partielles proches des rives

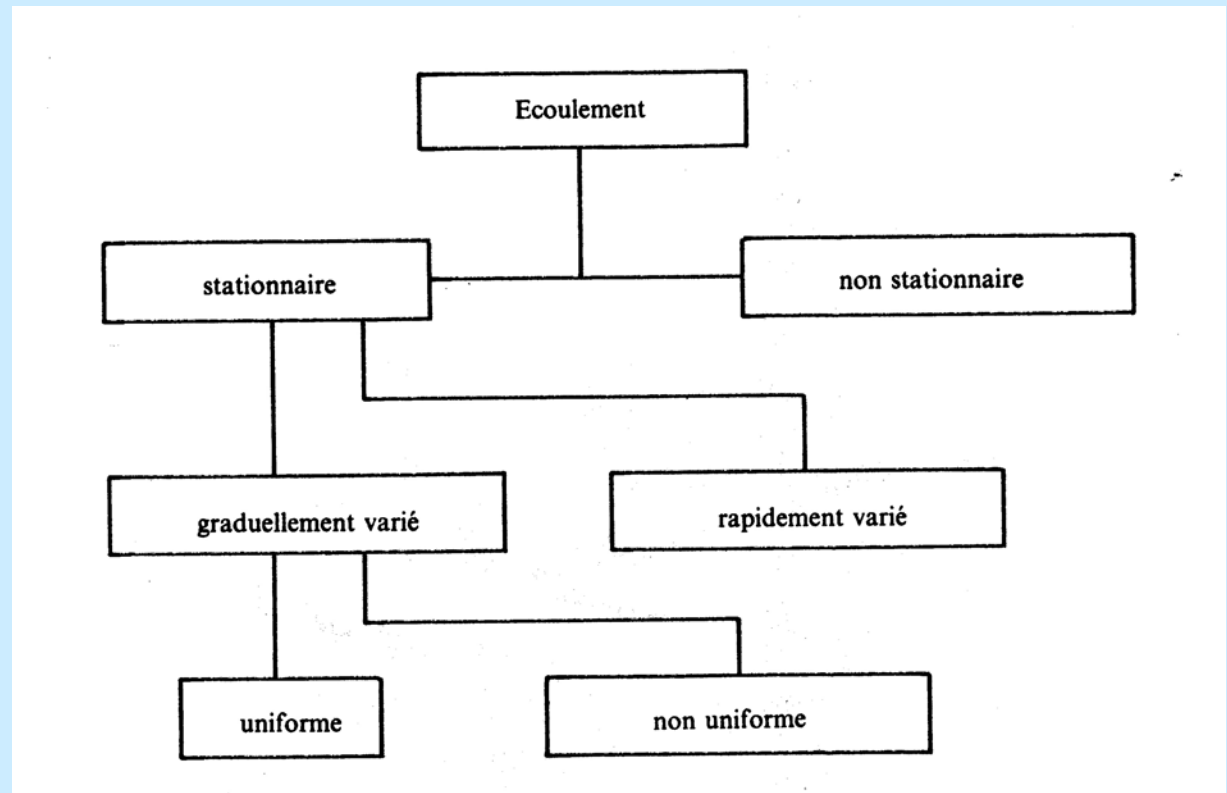
$$R_{ui} = \left(\frac{V_m}{k_{ui} J^{1/2}} \right)^{1.5}$$

- Surface effective pour le calcul du débit

$$A_{\text{eff}} = R_S B_F + \sum (R_{ui} P_{ui})$$

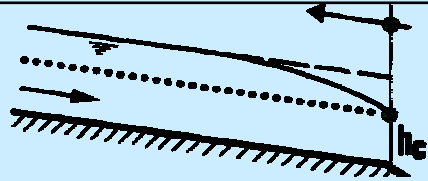
Courbes de remous

Les courbes de remous résultent d'un écoulement graduellement varié.



Courbes de remous

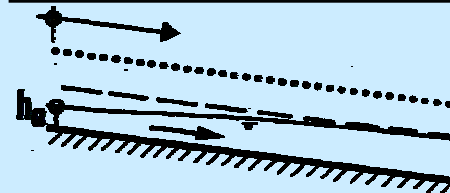
$F < 1$ ($h > h_c$, fluvial)
 $h < h_N$ (accélération)



A **M 2**

- Exemple :
- rugosité diminue
 - pente augmente, chute

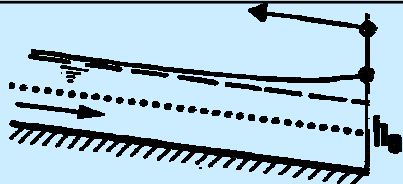
$F > 1$ ($h < h_c$, torrentiel)
 $h < h_N$ (ralentissement)



C **S 3**

- Exemple :
- rugosité augmente
 - pente diminue
 - aval d'un seuil, barrage

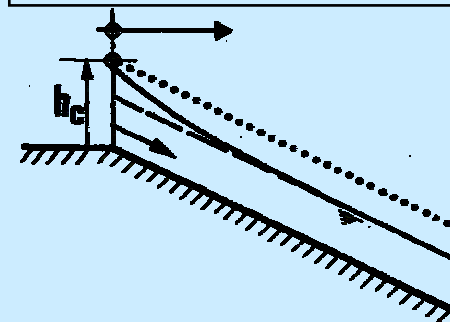
$F < 1$ ($h > h_c$, fluvial)
 $h > h_N$ (ralentissement)



B **M 1**

- Exemple :
- rugosité augmente
 - pente diminue
 - amont d'un seuil, barrage

$F > 1$ ($h < h_c$, torrentiel)
 $h > h_N$ (accélération)



D **S 2**

- Exemple :
- rugosité diminue
 - pente augmente
 - élargissement de section
 - à l'aval d'une crête de seuil

Théorie générale de la courbe de remous

$$\frac{dH}{dx} = -J_f \quad J_f: \text{pente de frottement}$$

$$H = z + h + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad A = \text{fct}(x, h) \quad \text{donc} \quad \frac{dA}{dx} = \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial h} \frac{dh}{dx}$$

Avec $J_s = \frac{dz}{dx}$ (pente du radier) on obtient:

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

pour des canaux prismatiques \rightarrow

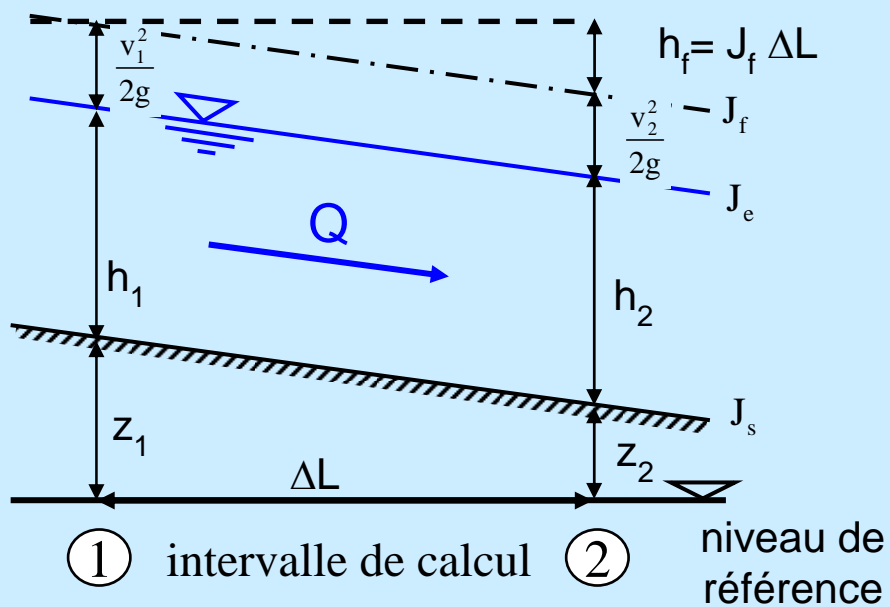
$$\frac{dh}{dx} = \frac{J_s - J_f}{1 - F^2}$$

$$F^2 = \frac{Q^2}{g \cdot A^3} \cdot \frac{dA}{dh}$$

Canaux - Ecoulement non-uniforme - Courbes de remous

Courbe de remous

$$J_s \neq J_f \neq J_e$$



A Bernoulli:

$$z_1 + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f$$

avec
$$h_f = J_f \cdot \Delta L = \frac{v_m^2}{K_m^2 \cdot R_m^{4/3}} \cdot \Delta L$$

selon la formule de Manning-Strickler

$$v_m = 1/2 (v_1 + v_2)$$

$$K_m = 1/2 (K_1 + K_2) \text{ si la rugosité varie}$$

$$R_m = 1/2 (R_1 + R_2) \text{ pour des canaux non prismatiques}$$

B Continuité:

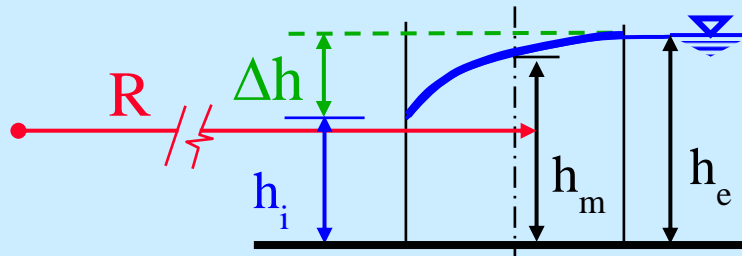
$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$$

Canaux courbes

↓ Répartition transversale des vitesses : $v(r) = C/r$

$$a = \frac{v^2}{r}$$

a : accélération transversale



C : constante de la circulation

r : coordonnée radiale

↓ Surélévation du plan d'eau à la paroi extérieure

$$b \ll R \quad \Delta h = h_e - h_i = \frac{v^2}{g \cdot R} \cdot b$$



$$\frac{\Delta h}{h_m} = \frac{b}{R} \mathbf{F}^2$$

$$\left(\mathbf{F}^2 = \frac{v^2}{g \cdot h_m} \right)$$

écoulement torrentiel

(Δh observée en pratique : 2 Δh)



↓ Perte de charge d'un écoulement courbe

$$\Delta z_p = \xi_p \frac{v^2}{2g} \quad \xi_p = \frac{2\sqrt{2} \sin(\delta/2)}{(1 + 2R/b)^2}$$