UNIVERSITÉ INTERNATIONALE DE CASABLANCA

Nous innovons pour votre réussite !

HYDRAULIQUE GENERALE

Abderrazak Ramadane, M. ing., Ph.D.

Filière génie civil

Université Internationale de Casablanca

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

Matière	Volume horaire	Enseignant
OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION (D.A.O. C.A.O.)	30	El MAskaoui
CALCUL DE STRUCTURES	40	M. HMIMIZ
Matériaux de construction	36	H. Guerroume
mecanique des sols	40	ALAOUI
HYDRAULIQUE GENERALE	36	RAMADANE
TOPOGRAPHE	30	M. SALHI
ENVIRONNEMENT ET ECOLOGIE	40	EL Mansouri
HYDROLOGIE	25	el mANSOURI
Ingénierie et management de l'innovation	24	
ANGLAIS 3	30	**Mme LABRINY**
GESTION BUDGETAIRE	16	**EL AKRY**
MANAGEMENT D'ENTREPRISE	24	**EL AKRY**
FINANCE AND FINANCIAL MANAGEMENT	16	
		SOUTENANCE DE STAGE DE DECOUVERTE DE L'ENTREPRISE

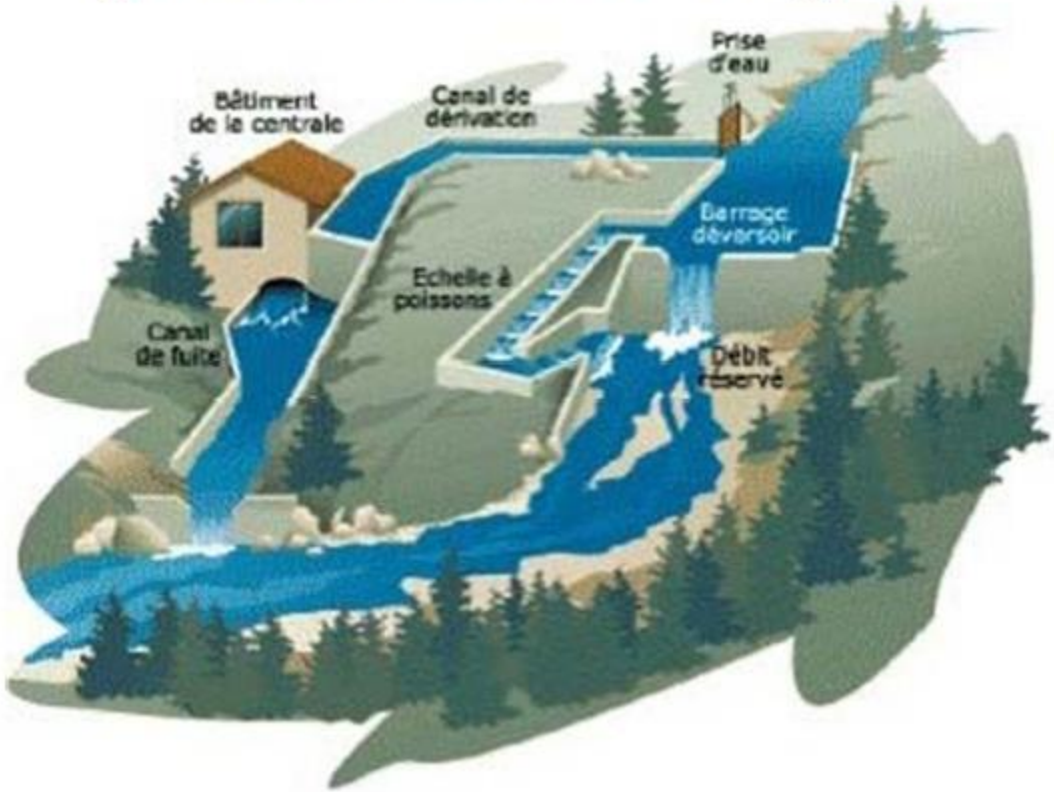
Quelques exemples d'application des notions d'hydraulique et d'hydrologie

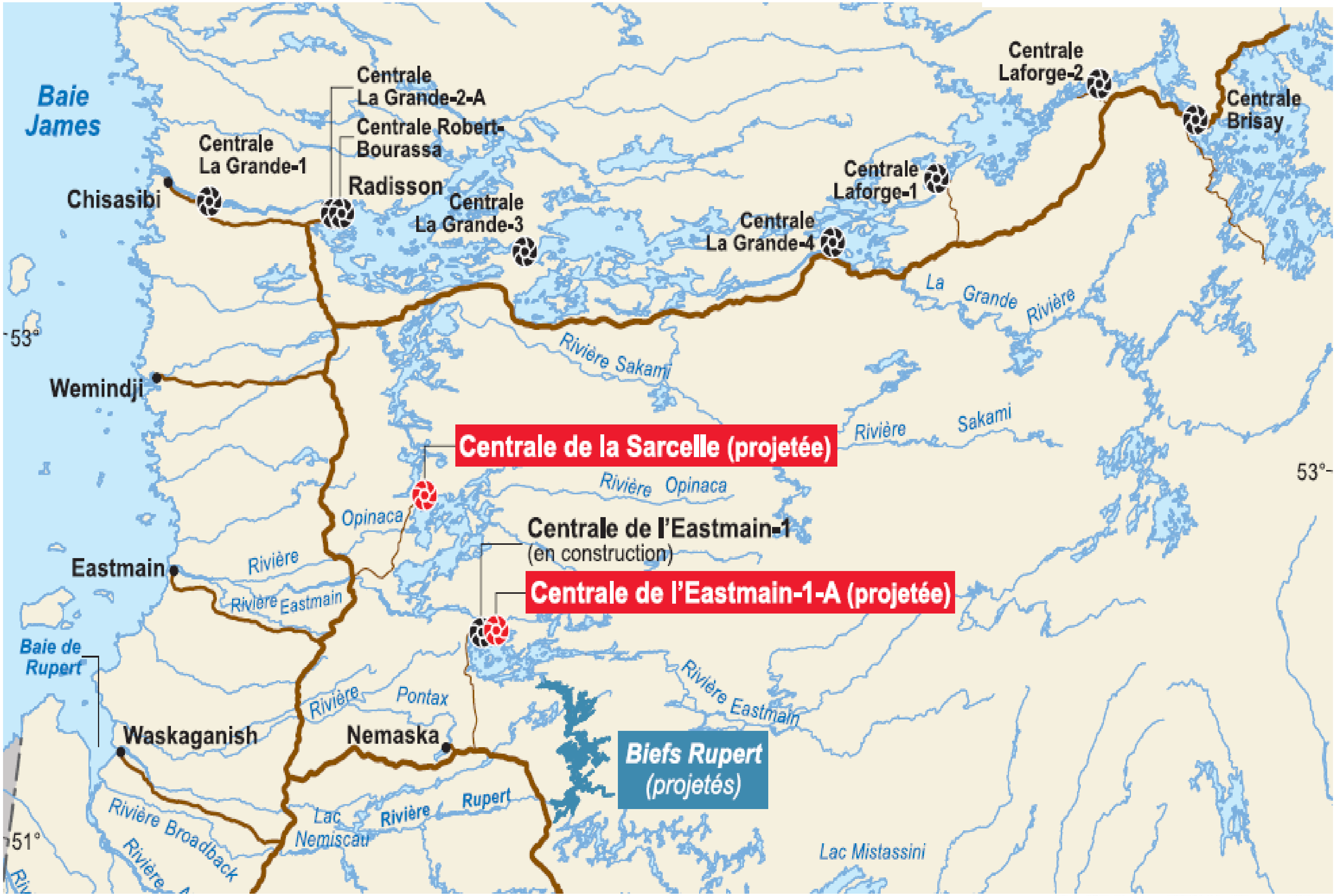
- Déluge du Saguenay en 1996

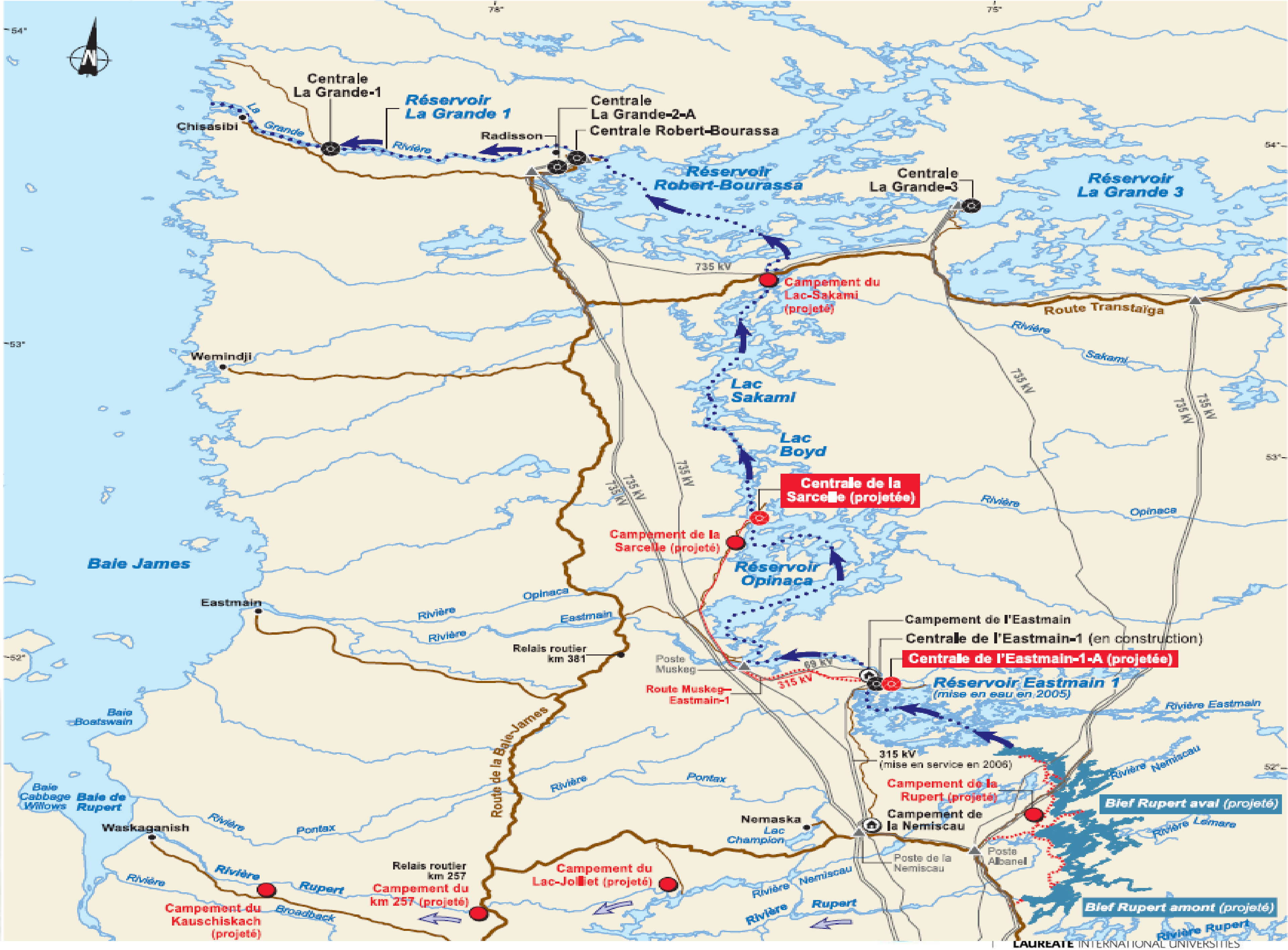
- Inondations répétées à Montréal

Travail de l'ingénieur en génie municipal

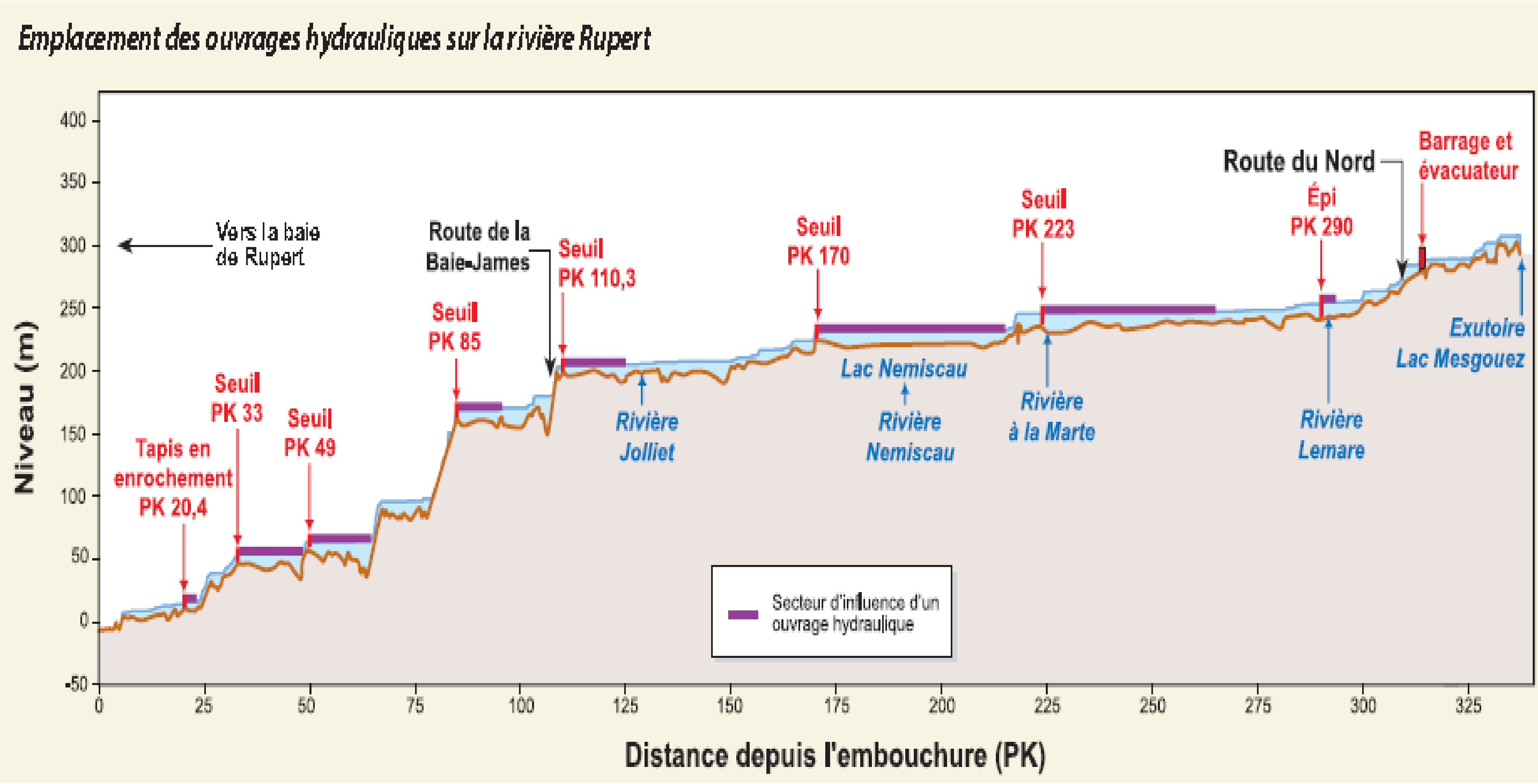
Planification, conception et gestion des barrages




Baie James
Chisasibi
Centrale La Grande-1
Centrale La Grande-2-A
Centrale Robert-Bourassa
Radisson
Centrale La Grande-3
Centrale La Grande-4
Centrale Laforge-1
Centrale Laforge-2
Centrale Brisay
La Grande Rivière
Rivière Sakami
Rivière Sakami
53°
Wemindji
Centrale de la Sarcelle (projetée)
Rivière Opinaca
Opinaca
Centrale de l'Eastmain-1
(en construction)
Centrale de l'Eastmain-1-A (projetée)
Eastmain
Rivière
Rivière Eastmain
Rivière Eastmain
Baie de Rupert
Rivière Pontax
Waskaganish
Nemaska
Biefs Rupert
(projetés)
Rivière Broadback
Lac Nemiscau
Rivière Rupert
Lac Mistassini
51°



Centrale
La Grande-1
Réservoir
La Grande 1
Chisasibi
La Grande Rivière
Centrale
La Grande-2-A
Centrale Robert-Bourassa
Radisson
Réservoir
Robert-Bourassa
Centrale
La Grande-3
Réservoir
La Grande 3
735 kV
Campement du
Lac-Sakami
(projeté)
Route Transtaïga
Rivière Sakami
Wemindji
Lac
Sakami
Lac
Boyd
Centrale de la
Sarcelle (projetée)
Rivière Opinaca
Campement de la
Sarcelle (projeté)
Réservoir
Opinaca
Baie James
Eastmain
Rivière Opinaca
Rivière Eastmain
Relais routier
km 381
Poste
Muskeg
Route Muskeg–
Eastmain-1
Campement de l'Eastmain
Centrale de l'Eastmain-1 (en construction)
Centrale de l'Eastmain-1-A (projetée)
69 kV
315 kV
Réservoir Eastmain 1
(mise en eau en 2005)
Rivière Eastmain
Baie
Boatswain
315 kV
(mise en service en 2006)
Route de la Baie-James
Rivière Pontax
Rivière Nemiscau
Campement de la
Rupert (projeté)
Bief Rupert aval (projeté)
Baie
Cabbage
Willows
Baie de
Rupert
Waskaganish
Rivière Pontax
Nemaska
Lac
Champion
Campement de
la Nemiscau
Rivière Lemare
Poste
Albanel
Poste de la
Nemiscau
Relais routier
km 257
Campement du
km 257 (projeté)
Campement du
Lac-Jolliet (projeté)
Rivière Rupert
Rivière Broadback
Campement du
Kauschiskach
(projeté)
Rivière Nemiscau
Rivière Rupert
Bief Rupert amont (projeté)
Rivière Rupert
78°
75°
54°
53°
52°


Emplacement des ouvrages hydrauliques sur la rivière Rupert
Niveau (m)
Distance depuis l'embouchure (PK)
Vers la baie de Rupert
Tapis en enrochement PK 20,4
Seuil PK 33
Seuil PK 49
Seuil PK 85
Route de la Baie-James
Seuil PK 110,3
Rivière Jolliet
Seuil PK 170
Lac Nemiscau
Rivière Nemiscau
Seuil PK 223
Rivière à la Marte
Épi PK 290
Rivière Lemare
Route du Nord
Barrage et évacuateur
Exutoire Lac Mesgouez
Secteur d'influence d'un ouvrage hydraulique
400
350
300
250
200
150
100
50
0
-50
0
25
50
75
100
125
150
175
200
225
250
275
300
325

Applications de l'hydraulique et l'hydrologie

- Approvisionnement en eau potable
- Traitement des eaux usées (égouts)
- Contrôle des inondations
- Ouvrages d'évacuation des eaux
- Aménagements hydroélectriques
- Gestion des ressources hydriques (crues)
- Structures temporaires (ex: batardeaux)

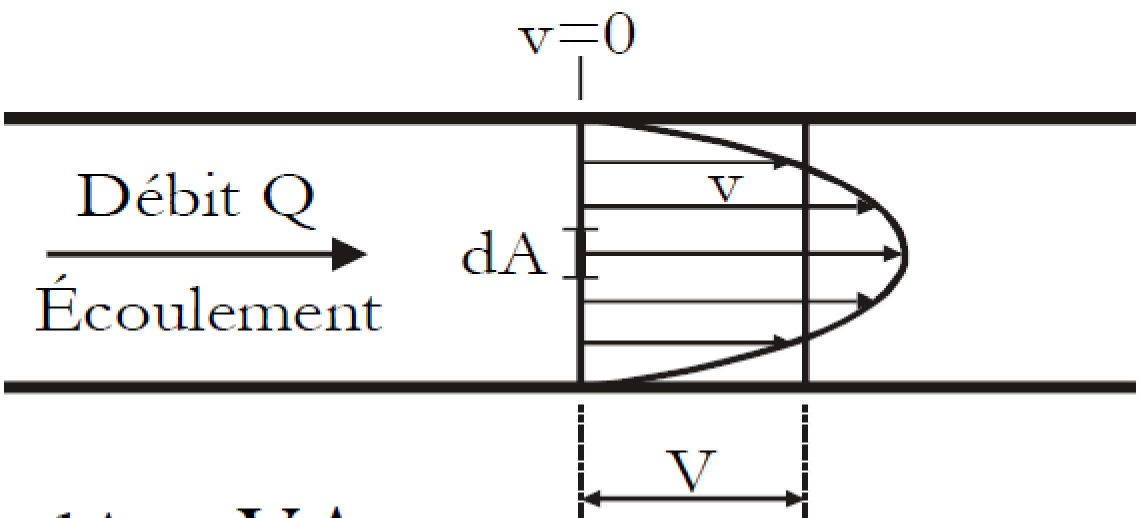
Objectifs du cours

- Élaborer le design des conduites et concevoir des systèmes simples de conduites en série et en parallèle;
- comprendre les caractéristiques et le design associés aux stations de pompage;
- calculer les caractéristiques d'un écoulement à surface libre (en écoulements uniformes, graduellement et brusquement variés);
- développer et valider les formules de mesure du débit par les déversoirs;

Contenus traités dans le cours
Rappel des notions de pression, de charge hydraulique, de vitesse et de débit; viscosité, coefficient de frottement, perte de charge; équations de la mécanique des fluides; équations de continuité et d'énergie.
Systèmes gravitaires en mouvement permanent, pertes de charge, calcul des conduites, conduites en série et en parallèle.
Pompes et stations de pompage, pompes centrifuges, point de fonctionnement, notion de NPSH et problème de cavitation.
Écoulements à surface libre, caractéristiques géométriques, équation d'énergie, écoulement uniforme, mesure du débit par les déversoirs.
Écoulement graduellement varié, courbes de remous, ressaut hydraulique.

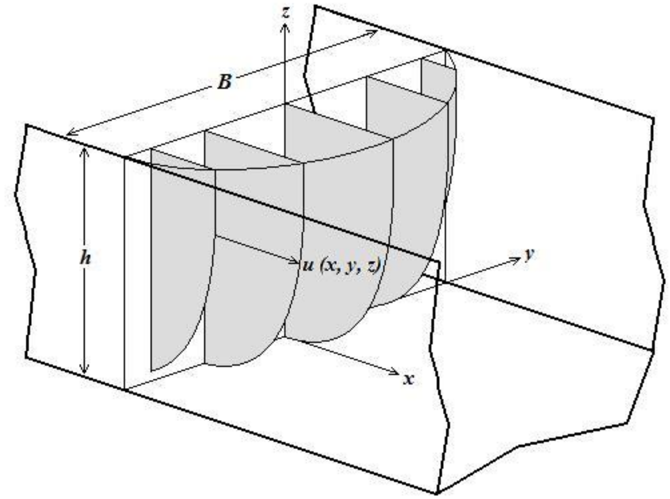
Chap 1: Équations de base des calculs hydrauliques

Vitesse et débit d'écoulement



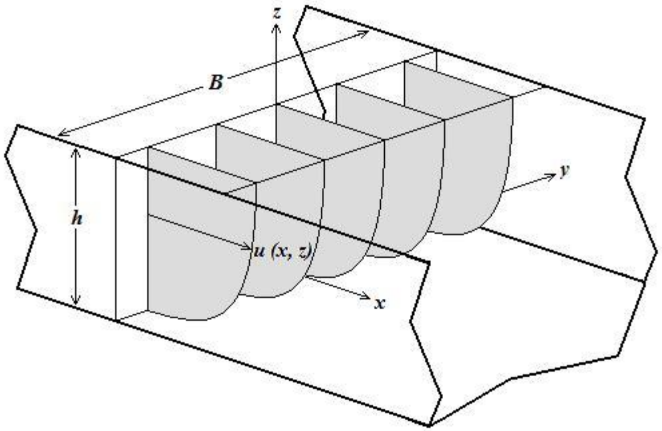
$$Q = \int_A v\,dA = VA$$

$$\dot{m} = \int_A \rho\, v\, dA = \rho Q$$



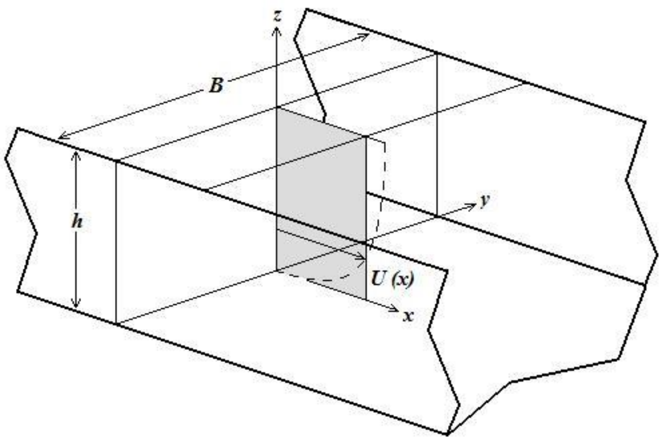
Écoulement 3D

$B \leq 3h$



Écoulement 2D

$B > 5h$

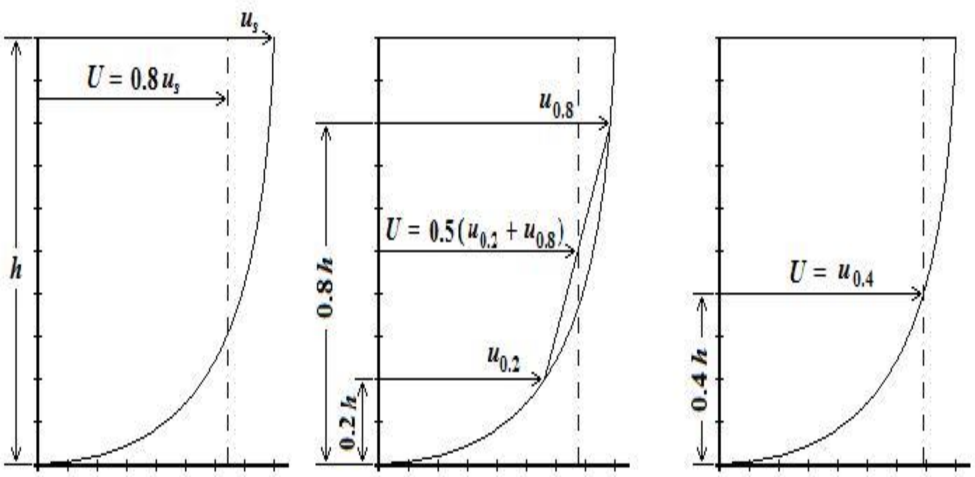


Écoulement 1D

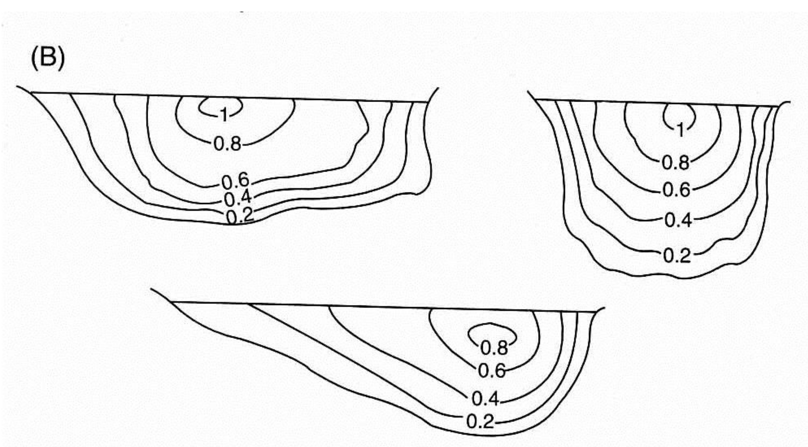
$$U = \frac{1}{h}\int_0^h u\,dz$$

- Répartitions de vitesse

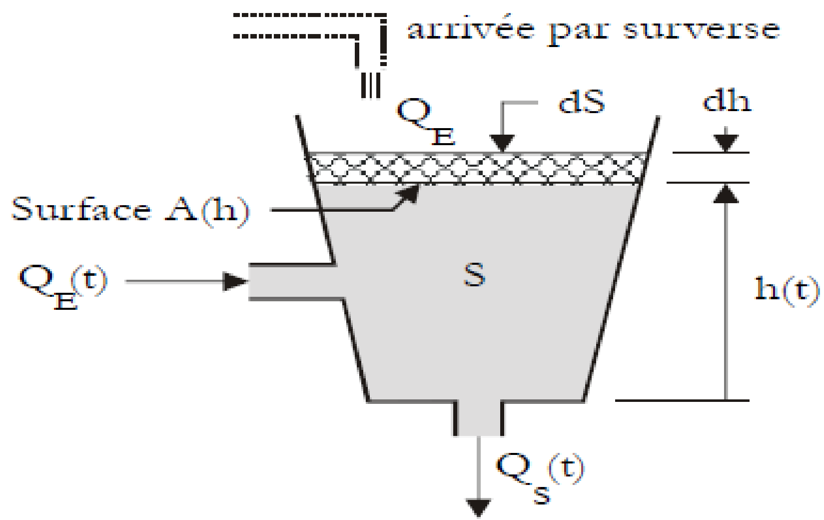
Relations approximatives



- $U = (0,8 \text{ à } 0,9)\, u_s$
- $U = 0,5(u_{0,2} + u_{0,8})$
- $U = u_{0,4}$

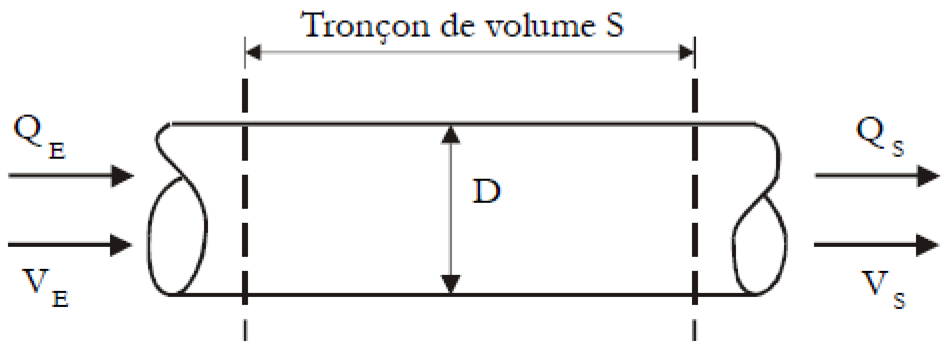


Équations de continuité



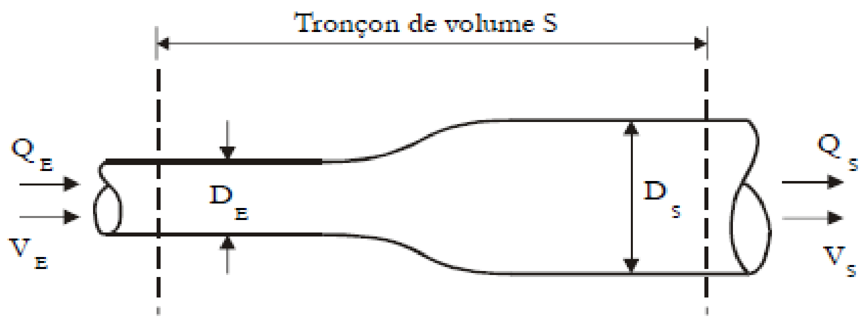
$$\frac{\partial}{\partial t}(S) = Q_E - Q_S$$

Équation de continuité: conduites avec diamètres identiques



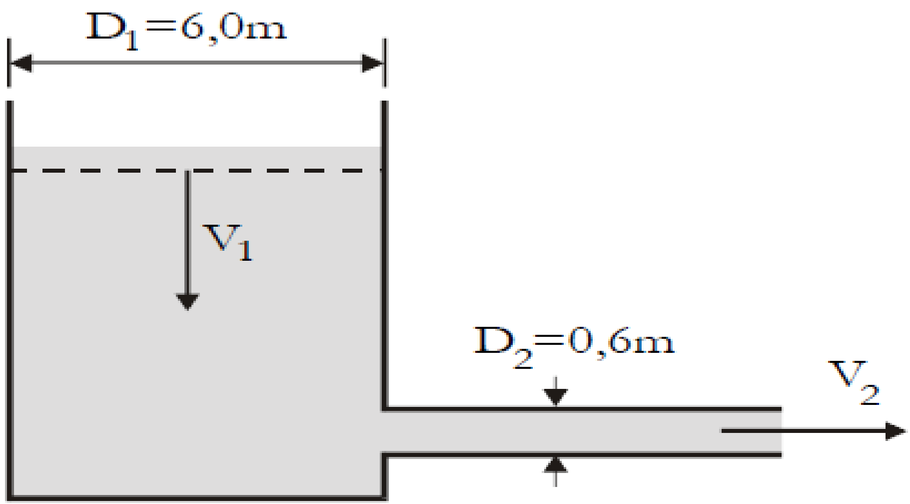
$$V_E = V_S$$

Équation de continuité: conduites avec diamètres variables



$$\frac{V_S}{V_E} = \left(\frac{D_E}{D_S} \right)^2$$

Application



Équation de Bernoulli

- Le long d'une trajectoire on a:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{1}{g}\int_1^2 \frac{\partial V}{\partial t} dx$$

$$H_t = Z + \frac{P}{\rho g} + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

Hypothèse 1 : écoulement permanent.

Hypothèse 2 : écoulement unidimensionnel et unidirectionnel.

Hypothèse 3 : écoulement incompressible.

Hypothèse 4 : liquide idéal.

Application

On considère le siphon schématisé par la figure 2.2. Le diamètre de la conduite est de 2,0cm. Il s'agit de calculer la vitesse et la pression aux points 1, 2, 3 et 4.

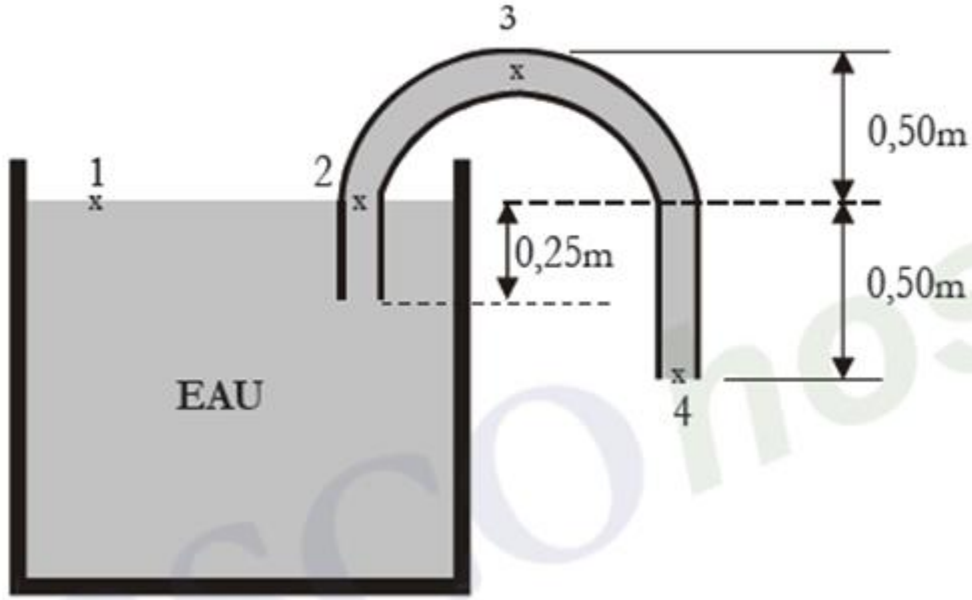


Fig. 2.2. Écoulement dans un siphon

Pat =101325 Pa

Par ailleurs, la pression P_4 égale la pression atmosphérique : $P_4/\rho g$ = 10,33m (eau).

En utilisant ces résultats, l'équation de Bernoulli donne :

$$\left(\frac{P_2}{\rho g}\right)_{absolue} = \frac{P_{atm}}{\rho g} - 0,5\text{m} = 10,33\text{m} - 0,50\text{m} = 9,83\text{m ou}$$

$$\left(\frac{P_2}{\rho g}\right)_{relative} = -0,50\text{m}.$$

Pour le calcul de P_3, l'application du théorème de Bernoulli entre les points 2 et 3 donne : $Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} = Z_3 + \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g}$, soit

$0 + 9,83\text{m} = 0,50\text{m} + \frac{P_3}{\rho g}$, V_2 étant égale à V_3 (diamètre constant).

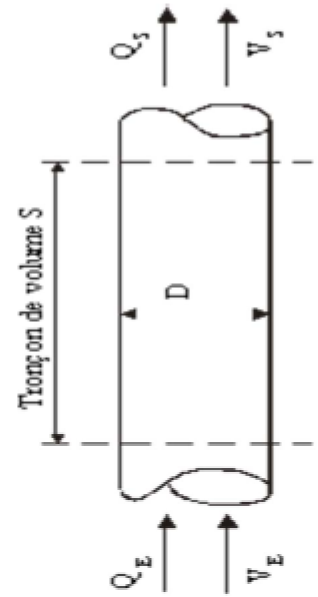
Donc $\left(\frac{P_3}{\rho g}\right)_{absolue} = 9,83\text{m} - 0,50\text{m} = 9,33\text{m}.$

Pour calculer la vitesse V_2, on applique le théorème de Bernoulli entre les points 1 et 2 :

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g}, \text{ soit } \; 0 + 0 + 0 = 0 + (-0,50\text{m}) + \frac{V_2^2}{2g}.$$

Donc $V_2 = \sqrt{g} = 3{,}13\text{m/s}$.

Équation de Bernoulli: Conduite ascendante



$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$V_E = V_S$$

$$(P_1 - P_2)/\rho g = Z_2 - Z_1$$

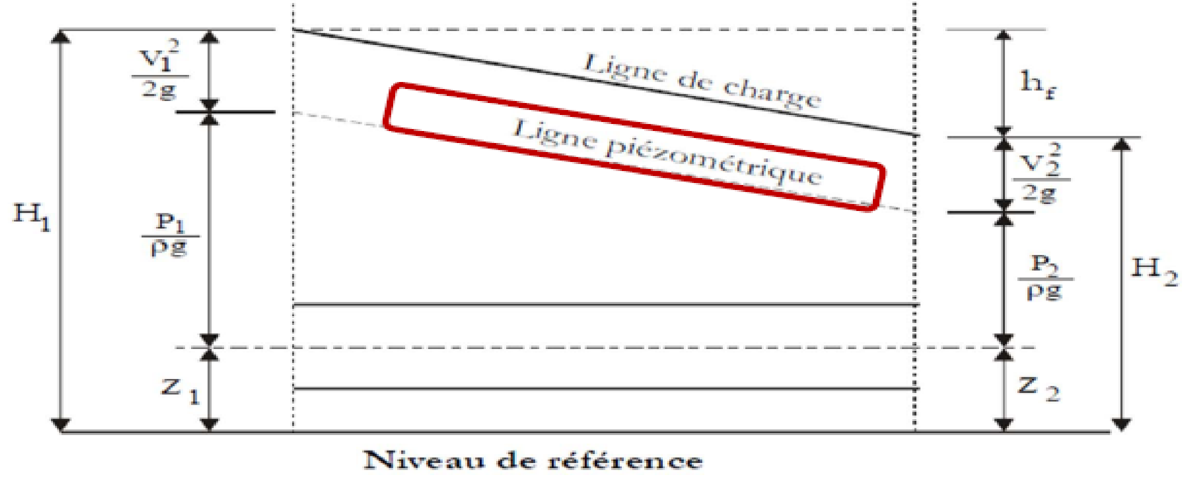
Ce qui est instructif
mais à corriger avec les
pertes de charge!

Chap 2: Calcul des conduites sous pression

Énergie ou charge totale

C'est la somme de l'énergie potentielle, de l'énergie de pression et de l'énergie cinétique

$$Ht = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$$



On définit la *hauteur de charge totale* d'un écoulement comme la somme de l'énergie potentielle, de la pression et de l'énergie cinétique par unité de poids, soit :

$$H_t = Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \tag{2.1}$$

où H_t est la hauteur de charge totale en mètres de liquide,
Z est la cote du point considéré par rapport à un niveau de référence, en mètres,
P est la pression au point considéré, en pascals,
ρ est la masse volumique du liquide, en kg par mètre cube,
g est l'accélération due à la gravité, en mètres par seconde^2,
V est la vitesse du liquide en mètres par seconde.

On appelle *ligne de charge* le lieu des points décrits par la fonction suivante :

$$H_t(x) = Z(x) + \frac{P(x)}{\rho g} + \frac{V^2(x)}{2g}$$

On définit la *hauteur piézométrique* d'un écoulement comme la somme de l'énergie potentielle et de la pression par unité de poids :

$$H = Z + \frac{P}{\rho g}$$

En pratique : pour les écoulements à **surface libre** la ligne piézométrique est confondue avec la surface libre . Pour les écoulements en charge, la ligne piézométrique représente le niveau qu'atteint l'eau grâce à sa pression.

Exemples:

- ✓ **Réseaux d'égout** se met en charge, la ligne piézométrique indique la hauteur des eaux dans les regards et identifie les régions problématique (voir figures).
- ✓ **Réseaux de distribution d'eau potable:** la ligne piézométrique indique en chaque point la pression résiduelle disponible chez le consommateur

Conditions de conception:

Écoulement uniforme avec pente de la conduite=pente de la ligne d'énergie(ligne piézométrique)

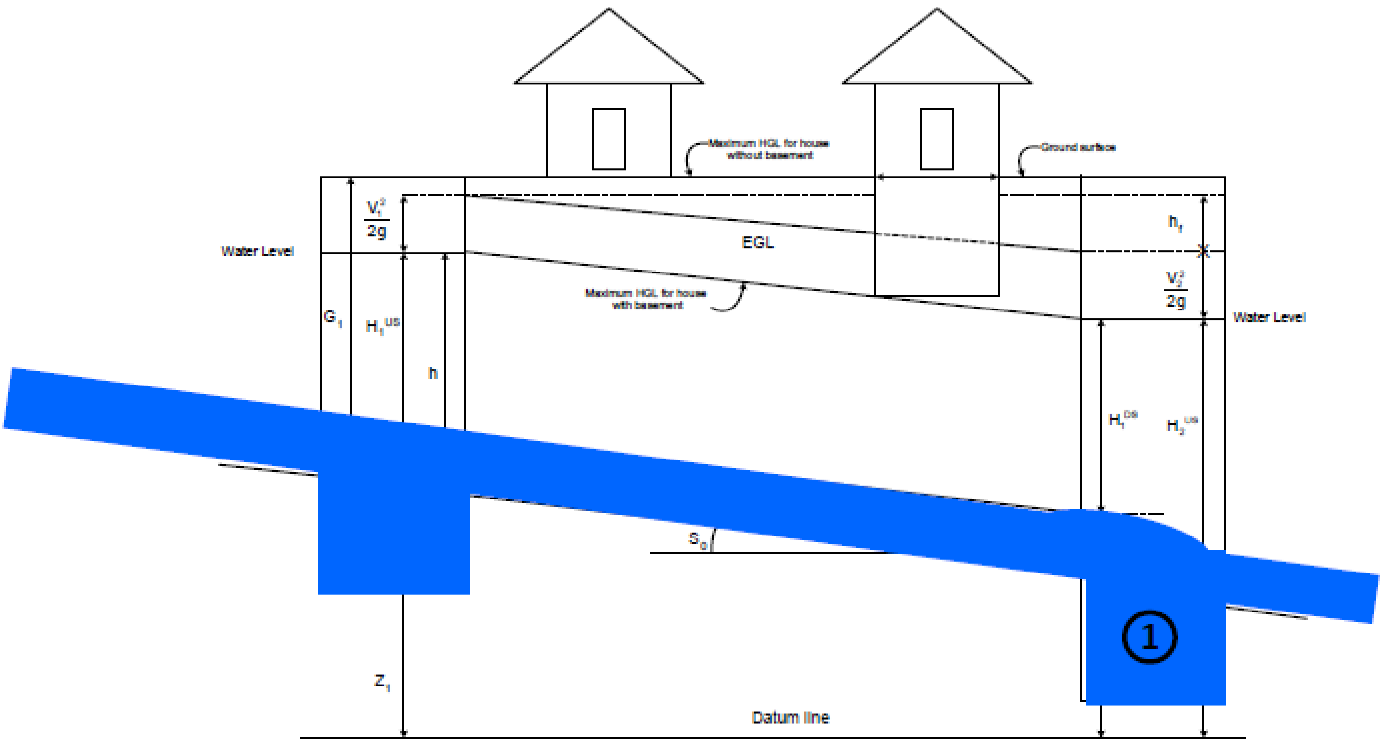
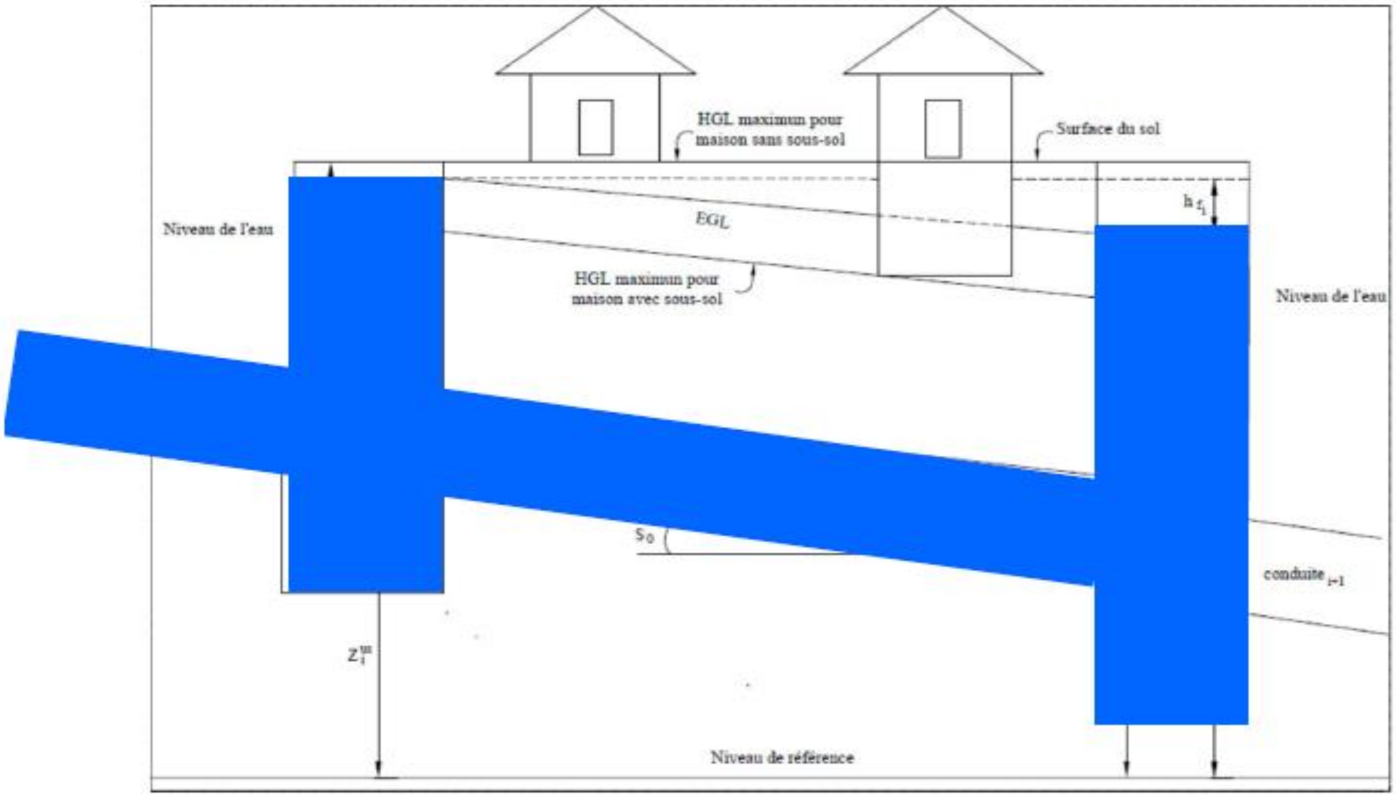
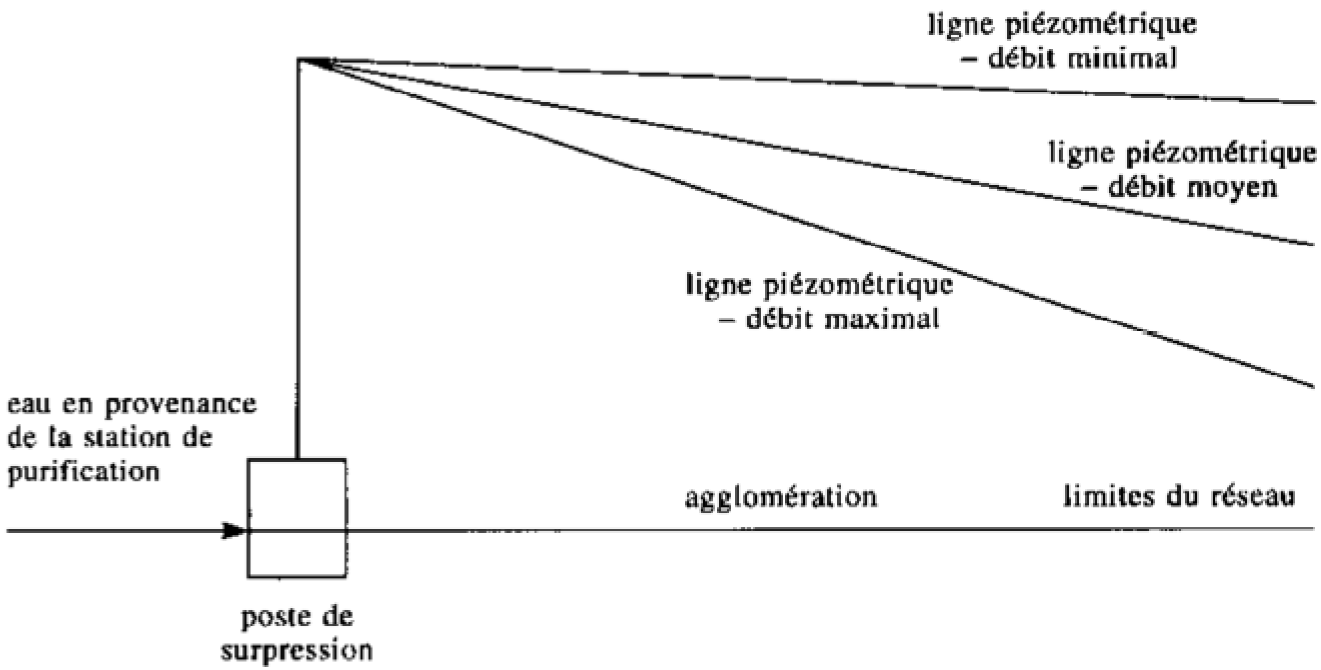


Figure .2 Schématic Representation of the Hydraulic Parameters

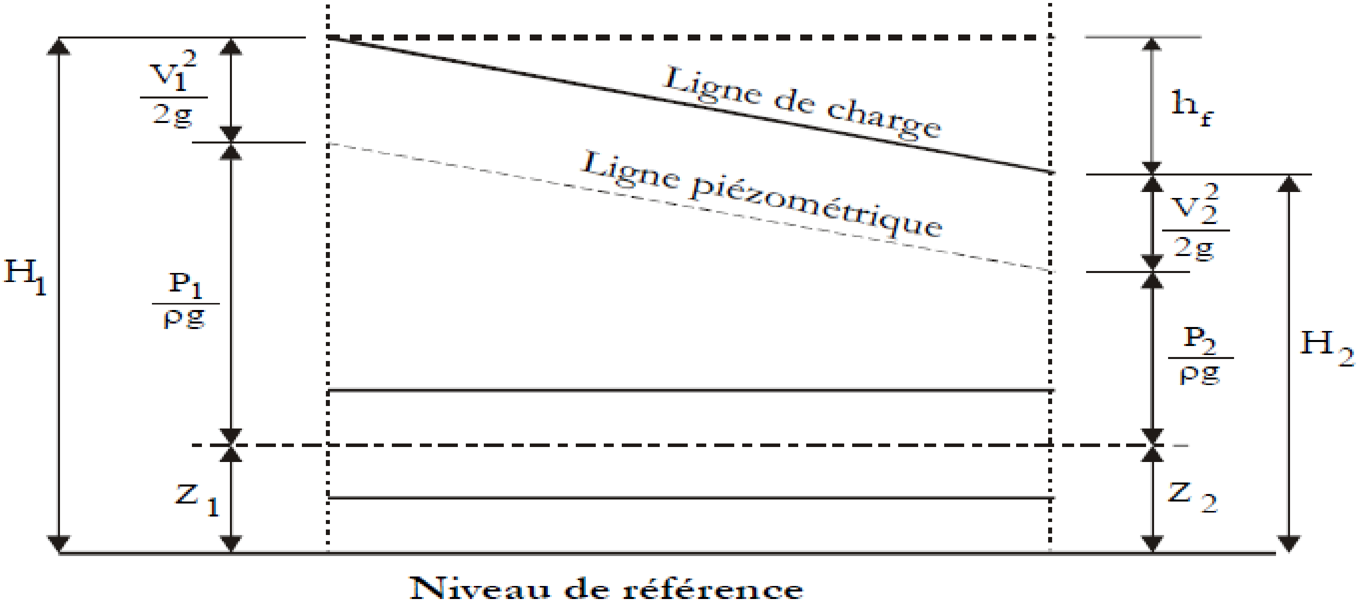
Ligne piézométrique dans un égout en charge



Ligne piézométrique dans un aqueduc selon le débit



Équation de Bernoulli généralisée



$$H_1 = H_2 + h_f + \sum h_s$$

Équation de Bernoulli généralisée

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_p = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f + h_s + h_t$$

h_f : pertes de charge par **frottement**

h_s : pertes de charges **singulières**

h_p : énergie fournie par une **pompe**

h_t : énergie soutirée par une **turbine**

Pertes de charge par frottement

Équation de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f\,\frac{L}{D}\,\frac{v^2}{2g}$$

$V^2/2g = 0{,}0826\,Q^2/D^4$

$$h_f = 0{,}0826\, f\, L\,\frac{Q^2}{D^5}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\,\log_{10}\left(\frac{\varepsilon/D}{3{,}71} + \frac{2{,}51}{Re\sqrt{f}}\right)$$

$10^{-6} < \frac{\varepsilon}{D} < 10^{-2}$ et $5\cdot 10^3 < Re < 10^8$

$$f = 0.0055\left[1 + \left(2\cdot 10^4\,\frac{\varepsilon}{D} + \frac{10^6}{Re}\right)^{1/3}\right]$$

Rugosité absolue des matériaux (mm)

Matériaux	RUGOSITÉ ABSOLUE ε (millimètres)
Métal étiré non ferreux : aluminium, laiton, cuivre	0,003
Conduites non métalliques : verre, plastique	0,003
Matériaux vitrifiés	0,03
Amiante-ciment, PVC	0,015
Bois	0,07
Enrobé d'asphalte centrifugé	0,03
Enrobé de béton centrifugé	0,03
Fer forgé	0,06
Fer forgé rouillé	0,6
Acier non protégé	0,03
Acier enduit	0,06
Acier galvanisé	0,15
Fonte enduite	0,16
Fonte non protégée	0,3

Utilisation du diagramme de Moody pour trouver « f »

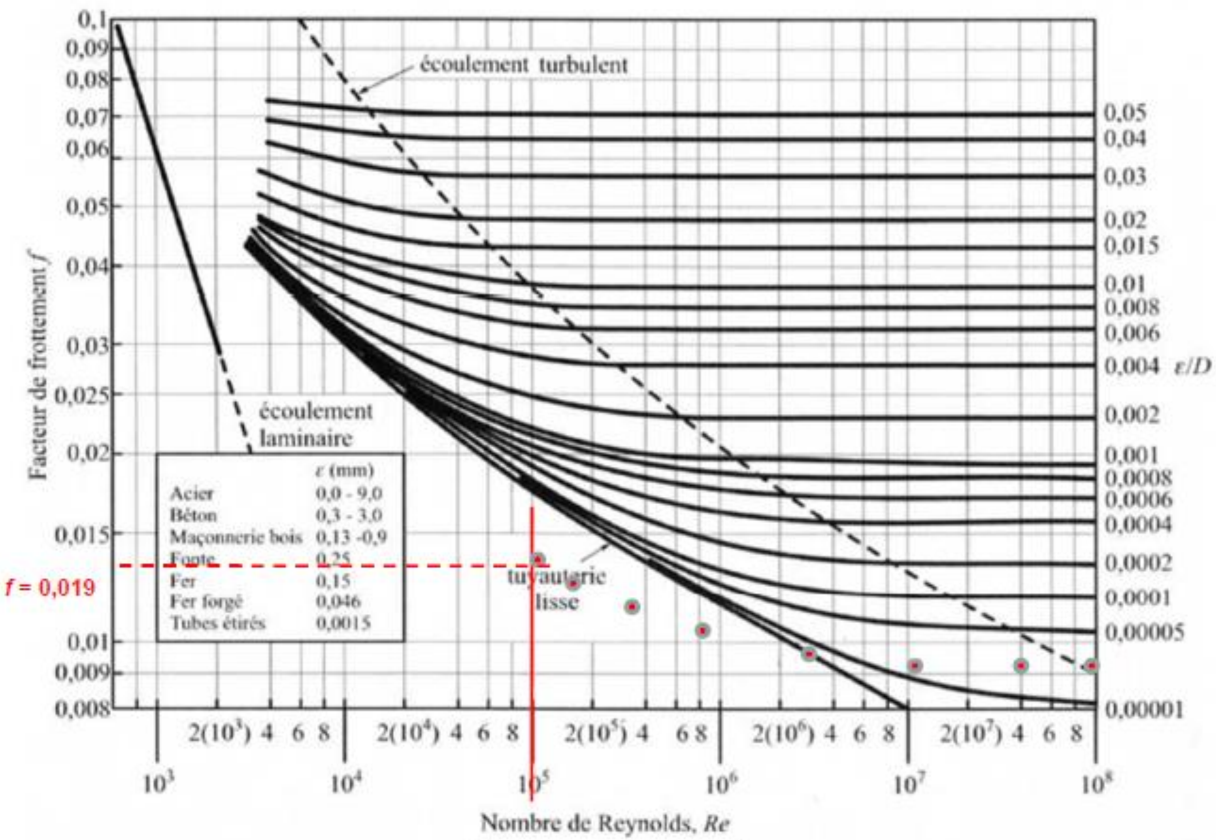


Diagramme de Moody.

Ex:

Re = 10^5

Є/D = 0,0002

Application

1) Calcul de h_f

L'ingénieur a identifié une bonne source d'eau située à une cote Z_1 = 1000m et ayant une température de 15°C. Il peut faire écouler cette eau d'une manière gravitaire pour remplir un réservoir de stockage (fig. 2.6).

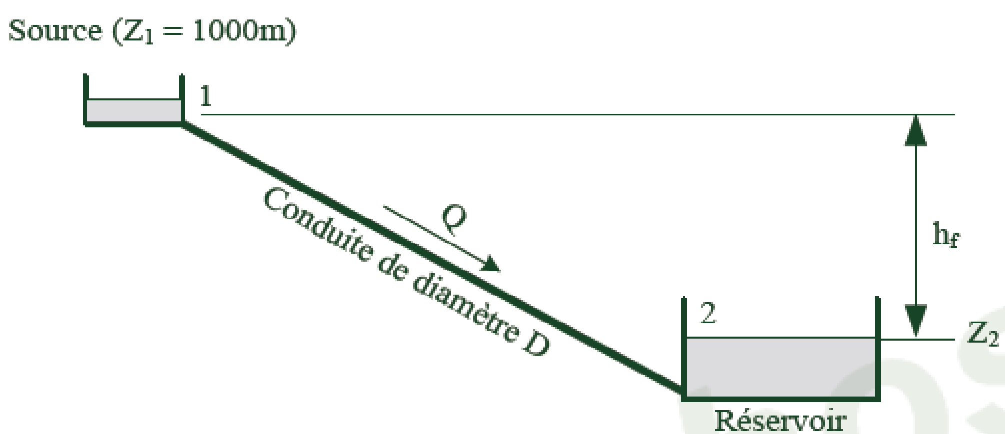
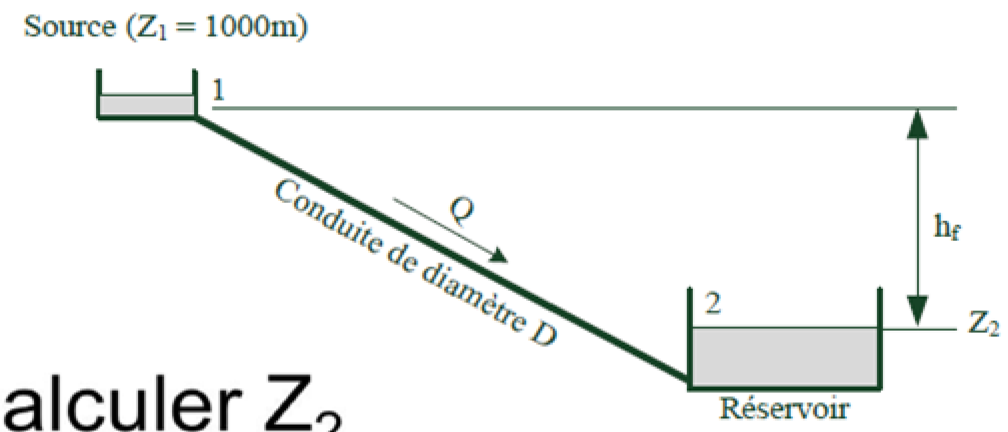


Fig. 2.6 Exemple d'écoulement gravitaire

Supposons que le débit de la source soit limité à une valeur Q = 1,0m^3/s. À cause de certaines considérations matérielles et techniques, le diamètre de la conduite a été fixé à 0,60m, la longueur à 1,0km et le matériau de la conduite est de la fonte (ε = 0,06mm). La question est : à quelle cote Z_2 placer le réservoir de stockage?

Application

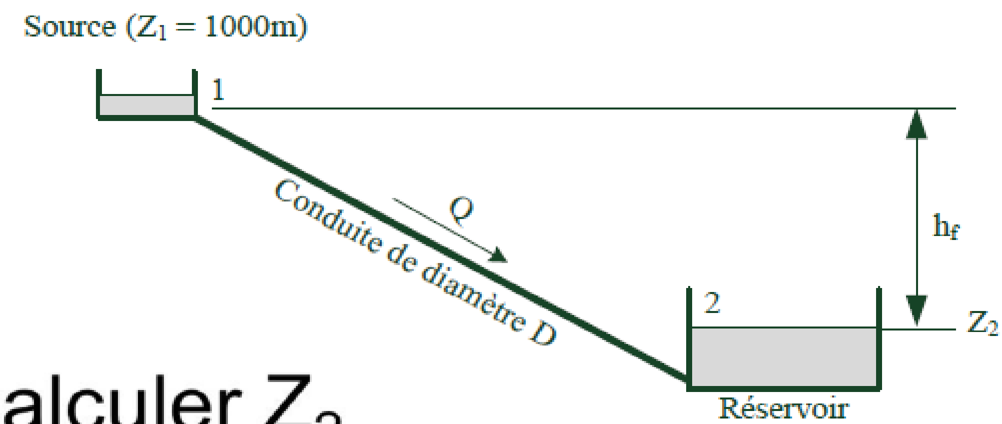
$Q=1m^3/s$ $L=1Km$ $D=600$ mm et $\epsilon=0.06$ mm



Calculer Z_2

Application 1 mm

Q=1m^3/s   L=1Km   D=600 mm et ϵ=0.06 mm



Calculer Z_2

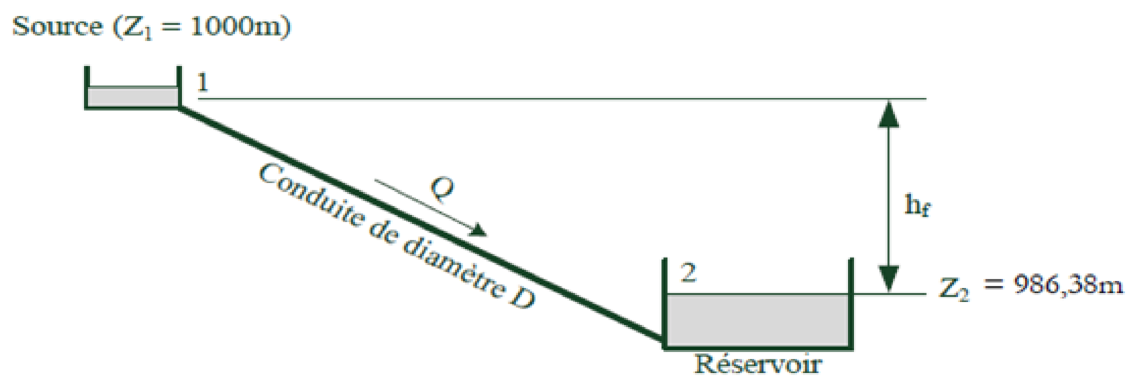
$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \qquad Z_2 = Z_1 - 0{,}0827\ f\ L\ Q^2/D^5$$

Moody permet de trouver f = 0,0128

$$Z_2 = 1000\text{m} - 0{,}0827 \cdot 0{,}0128 \cdot 1000 \cdot 1^2/0{,}6^5 = 986{,}38\text{m}$$

Application 2

$Q=1m^3/s$ $L=1Km$ et $\epsilon=0.06$ mm

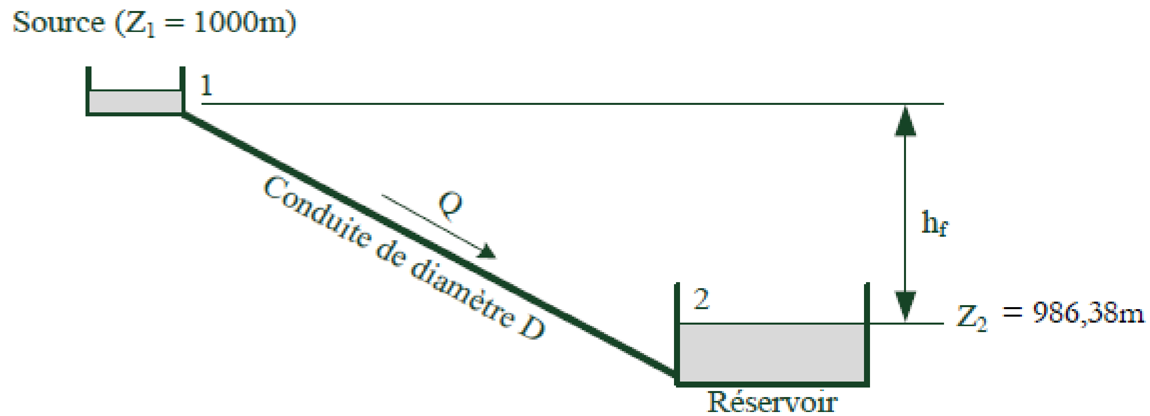


2) Calcul du diamètre

On traite le même problème que précédemment sauf qu'on suppose maintenant que la municipalité a identifié un emplacement stratégique pour le réservoir et par conséquent l'altitude Z_2 = 986,38m trouvée précédemment est maintenant connue. Les autres paramètres étant par ailleurs inchangés, on demande à l'ingénieur de calculer le diamètre de la conduite qui devient l'inconnue du problème.

Application 2

$Q=1m^3/s$ $L=1Km$ et $\epsilon=0.06$ mm



Calculer le diamètre D

$$Z_1+\frac{P_1}{\rho g}+\frac{V_1^2}{2g}=Z_2+\frac{P_2}{\rho g}+\frac{V_2^2}{2g}+h_f \qquad Z_1 - Z_2 = 0{,}0827\ f\ L\ Q^2/D^5$$

$$1000m - 986{,}38m = 0{,}0827\ f\{[(6 \cdot 10^{-5}/D), (1{,}11 \cdot 10^6/D)]\} \cdot 1000 \cdot 1^2/D^5.$$

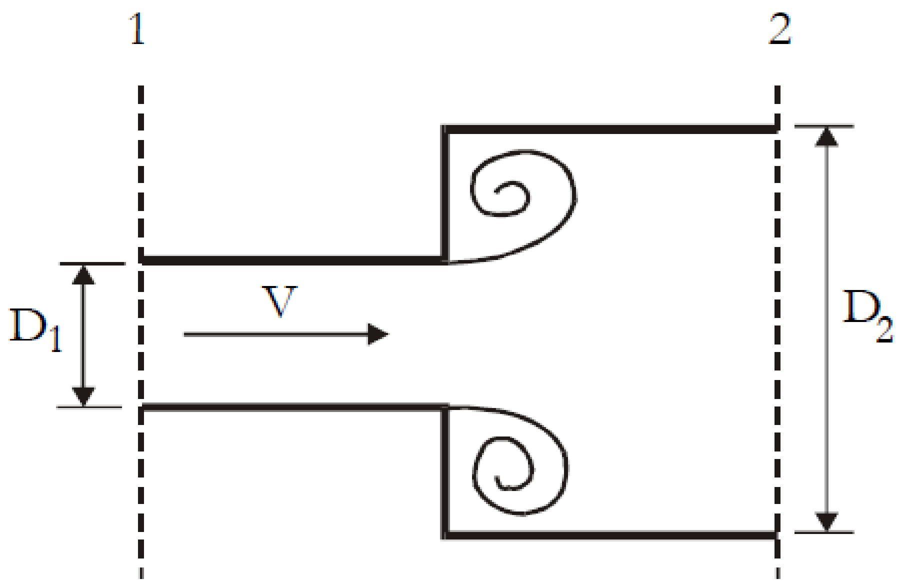
D =0,6 m

Calcul des pertes de charge: Équation de Hazen-William

$$h_f = L\left(\frac{3.59}{C_{HW}}\right)^{1.852} \frac{Q^{1.852}}{D^{4.87}}$$

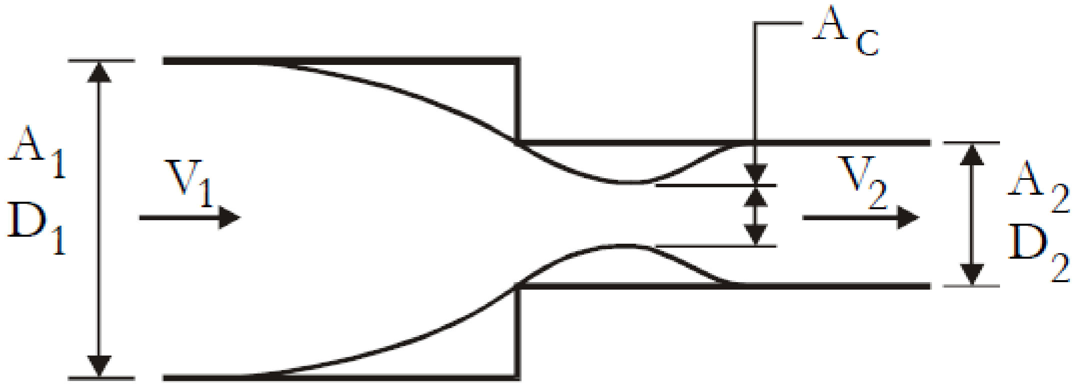
Matériau	C_{HW}
PVC	150
Amiante-ciment	140
Béton lissé	130
Acier soudé, neuf	120 - 140
Fonte neuve	130 - 140
Fonte âgée (10 ans)	110
Fonte âgée (20 ans)	100
Fonte âgée (30 ans)	85
Fonte âgée (40 ans)	75
Fonte âgée (50 ans)	70

Pertes de charge singulières



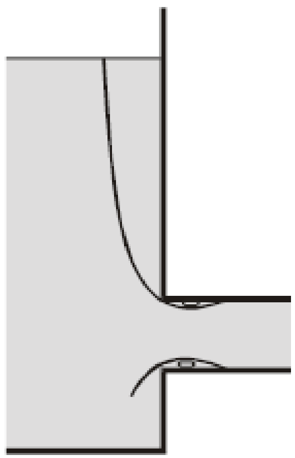
$$h_s = K\frac{V^2}{2g}$$

Perte de charge singulière dans un rétrécissement

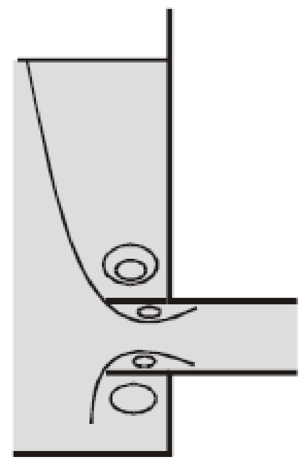


D_2/D_1	K
0,2	0,56
0,4	0.52
0,6	0,43
0,8	0,21

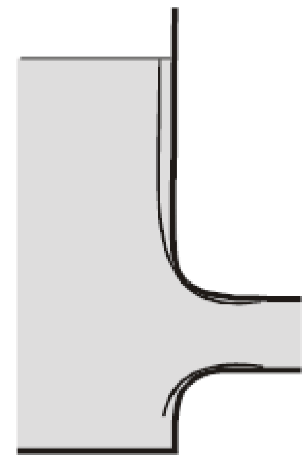
Perte de charge pour une prise d'eau



K=0,58
prise d'eau à angle droit

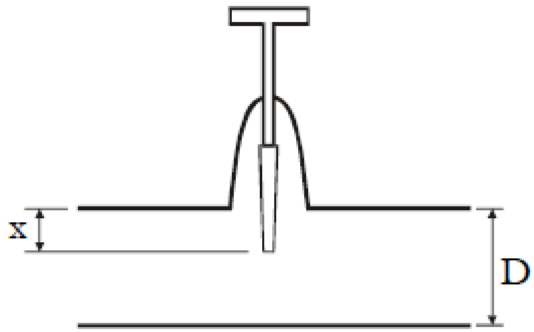


K=1,0
prise d'eau rentrante



K=0,04
prise d'eau profilée

Pertes de charges singulières

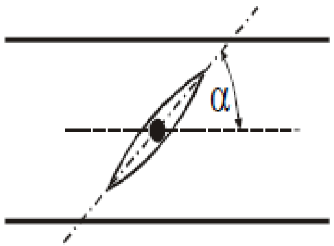


$$h_s = K \frac{V^2}{2g}$$

x/D	K
1/8	0,1
¼	0,3
½	2
¾	20
7/8	100

Robinet vanne

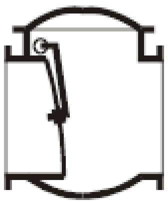
Perte de charge pour une vanne papillon



α (degrés)	K
0 (100%ouvert)	0,30
10	0,50
20	1,50
30	3,80
40	10,5
50	32
60	105

Vanne papillon a l'avantage de se fermer très rapidement, il permet d'isoler rapidement un tronçon de conduite en cas de bris. **Attention au coup de bélier**

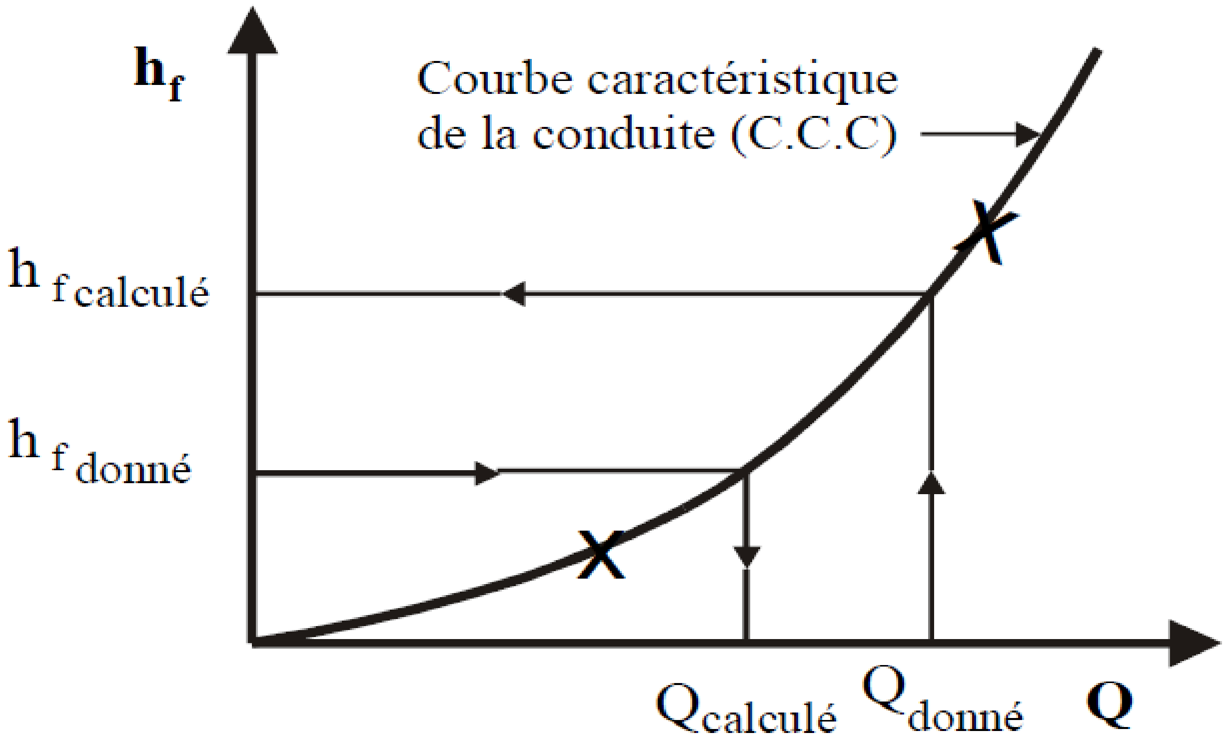
Perte de charge pour un clapet



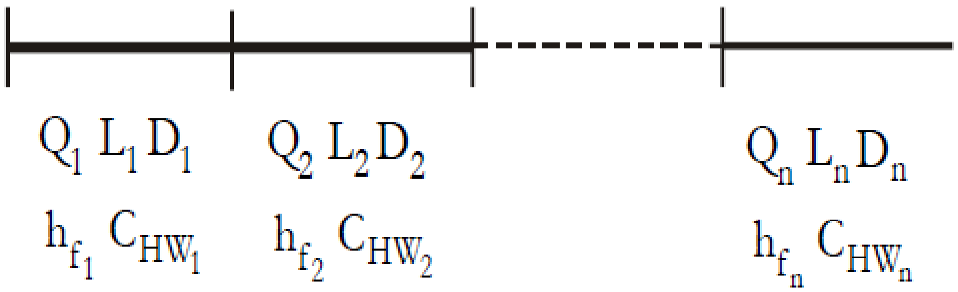
Pour un clapet complètement ouvert, K peut varier entre 0,5 et 2,5.

Il permet le passage de l'eau dans une sens prédéterminé sous l'effet de la pression.
Il est utilisé sur les conduites de refoulement.

Notion de Courbe caractéristique d'une conduite (CCC)



Conduites en série



$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \ldots = Q_n = Q$$

$$h_{f_{total}} = h_{f_1} + h_{f_2} + h_{f_3} + \ldots + h_{f_n}$$

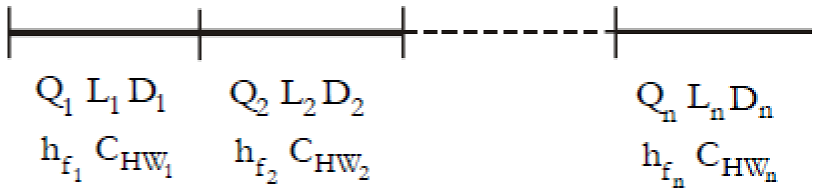
$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + 0,0827 f L \frac{Q^2}{D^5} + 0,0827 \frac{Q^2}{D^4} \sum K_i$$

Coefficient de débitance K

$$h_f = L\left(\frac{3,59}{C_{HW}}\right)^{1,852} \cdot \frac{Q^{1,852}}{D^{4,87}} = K\,Q^{1,852}$$

$$K = L\left(\frac{3,59}{C_{HW}}\right)^{1,852} \cdot \frac{1}{D^{4,87}}$$

Calcul des conduites en serie

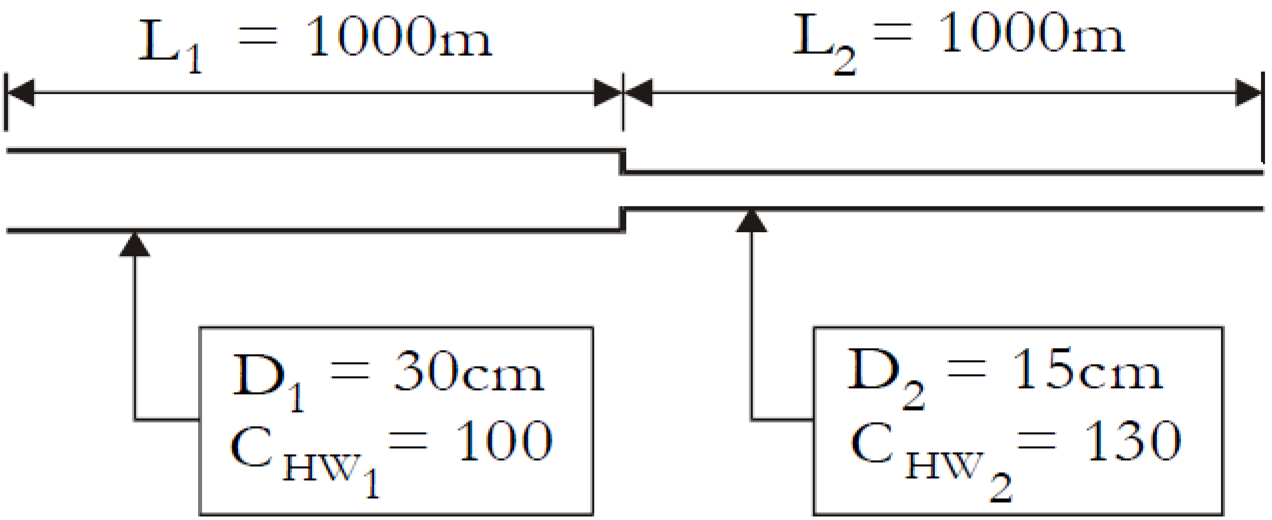


$$K_{eq} Q_{eq}^{1,852} = K_1 Q_1^{1,852} + \ldots + K_n Q_n^{1,852}$$

$$K_{eq} = \sum_{i=1}^{n} K_i$$

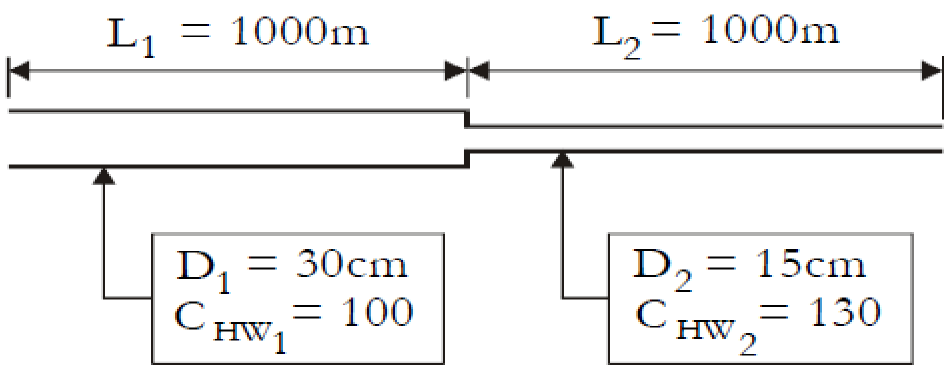
$$K_{eq} = L_{eq} \left(\frac{3,59}{(C_{HW})_{eq}} \right)^{1,852} \cdot \frac{1}{D_{eq}^{4,87}}$$

Exemple1: Calcul du diamètre équivalent en série



Trouver le diamètre d'une conduite : $C_{HW} = 140$ et L=2000

Calcul du diamètre équivalent en série



$$K = L\left(\frac{3,59}{C_{HW}}\right)^{1,852} \cdot \frac{1}{D^{4,87}}$$

$K_1 = 742{,}09$ $\qquad$ $K_2 = 13349$ $\qquad$ $K_{eq} = 14091$

$$K_{eq} = L_{eq}\left(\frac{3,59}{(C_{HW})_{eq}}\right)^{1,852} \cdot \frac{1}{D_{eq}^{4,87}}$$

$D_{eq} = 0{,}166m$

On aurait pu aussi procéder de la manière suivante :

- on suppose une valeur de débit, par exemple $Q = 0{,}01 m^3/s$,
- on calcule la perte de charge h_{f1} et h_{f2} dans chacune des conduites, en l'occurrence :

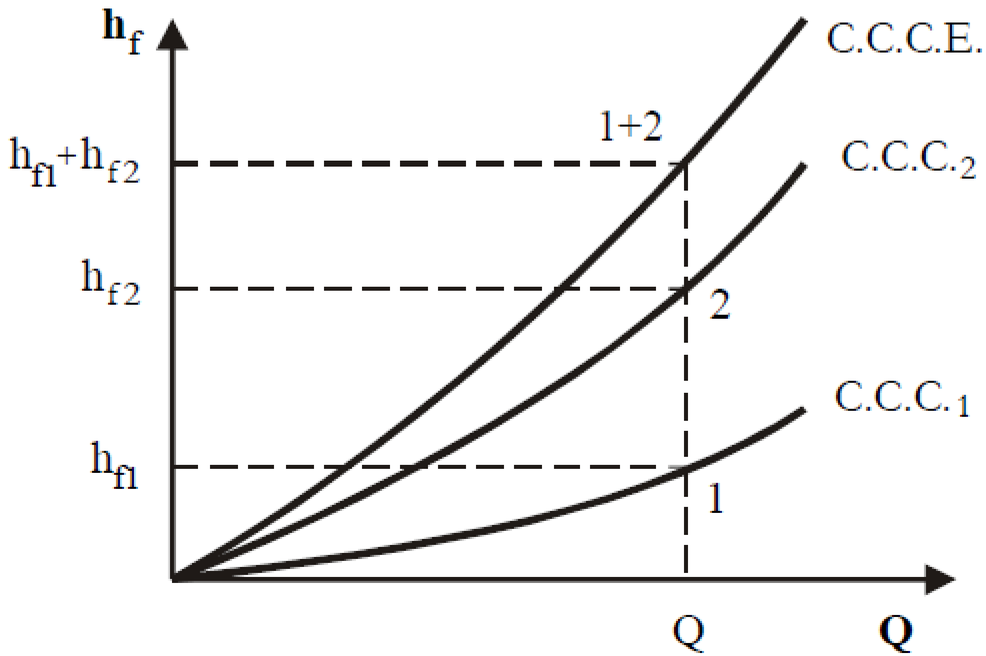
$$h_{f1} = 0{,}146m \text{ et } h_{f2} = 2{,}64m$$

- la perte de charge totale dans la conduite équivalente est $h_{fT} = 2{,}785m$, le débit étant le même $Q = 0{,}01m^3/s$.
- en utilisant ces valeurs dans la formule de Hazen-Williams

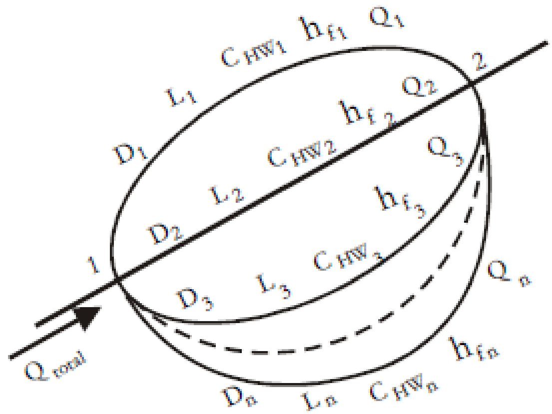
on trouve :

$$D_{eq} = 0{,}166m$$

Courbe caractéristique de deux conduites en série

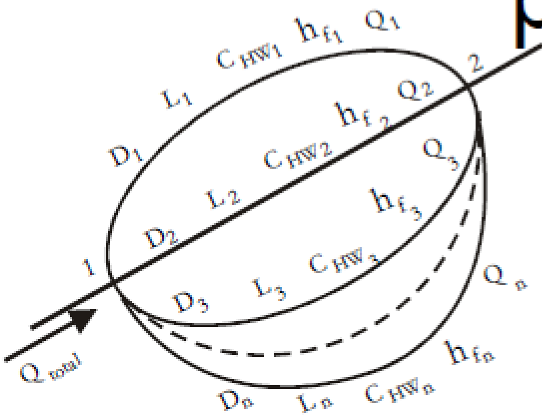


Conduites en parallèle



- QT = Q1 + Q2 + … + Qn.
- et
- hfT = hf1 = hf2 … = hfn

Calcul des conduites en parallèle



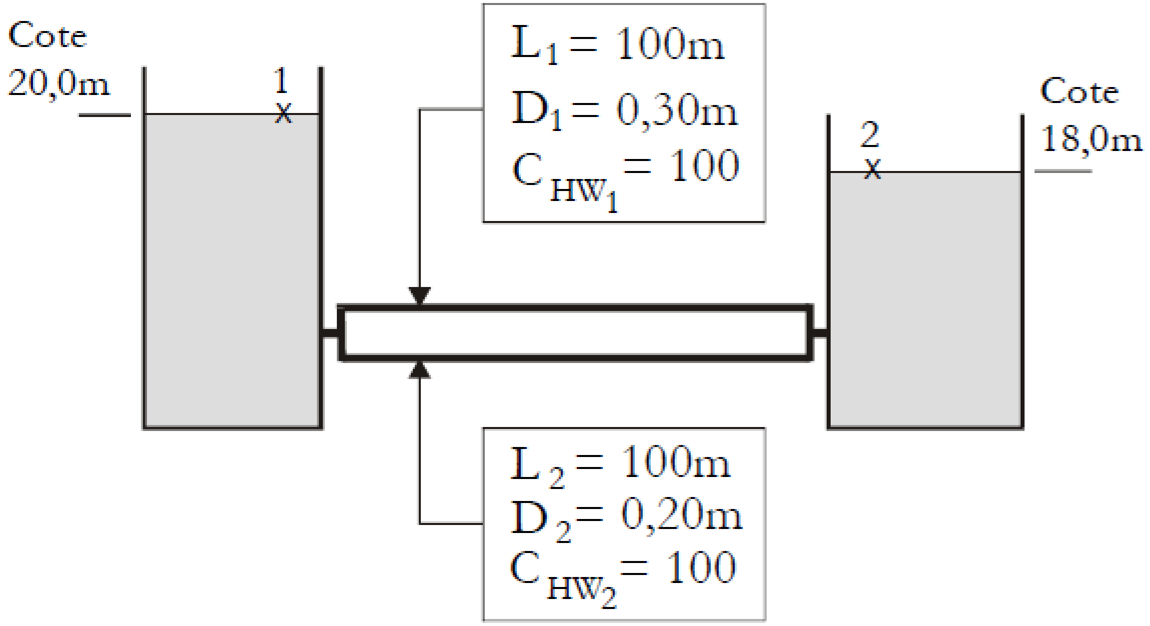
$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots + Q_n$$

$$Q_i = \left(\frac{h_{f_i}}{K_i}\right)^{1/1,852}$$

$$\frac{1}{K_{eq}} = \left[\left(\frac{1}{K_1}\right)^{1/1,852} + \left(\frac{1}{K_2}\right)^{1/1,852} + \ldots + \left(\frac{1}{K_n}\right)^{1/1,852}\right]^{1,852}$$

$$K_{eq} = L_{eq}\left(\frac{3,59}{(C_{HW})_{eq}}\right)^{1,852} \cdot \frac{1}{D_{eq}^{4,87}}$$

Exemple2: Calcul du diamètre équivalent en parallèle



Écrivons l'équation de Bernoulli pour une goutte d'eau qui est partie du point 1 de cote $Z_1 = 20m$, pour rejoindre le point 2 de cote $Z_2 = 18m$, en passant par la conduite de diamètre D_1 :

$$Z_1 = Z_2 + h_{f_1}$$

soit

$$h_{f_1} = Z_1 - Z_2 = 2,0m = L_1 \left(\frac{3,59}{C_{hw_1}}\right)^{1,852} \frac{Q_1^{1,852}}{D_1^{4,87}} \qquad (a)$$

Écrivons la même équation pour une autre goutte d'eau qui a emprunté la conduite de diamètre D_2 :

$$h_{f_2} = 2,0m = L_2 \left(\frac{3,59}{C_{HW_2}}\right)^{1,852} \frac{Q_2^{1,852}}{D_2^{4,87}} \qquad (b)$$

En comparant les deux équations (a) et (b), il est clair que $h_{f1} = h_{f2}$.

Par ailleurs, les débits Q_1 et Q_2 sont a priori différents et obéissent à la relation $Q_T = Q_1 + Q_2$, Q_T étant le débit total.

Pour trouver le diamètre de la conduite équivalente, on calcule K_1 et K_2 pour les deux conduites (2.42) :

$$K_1 = 74{,}21 \qquad K_2 = 534{,}6$$

La valeur du coefficient K équivalent se calcule par (2.48) :

$$K_{eq} = 42{,}90$$

Finalement l'équation (2.49) fournit le diamètre équivalent :

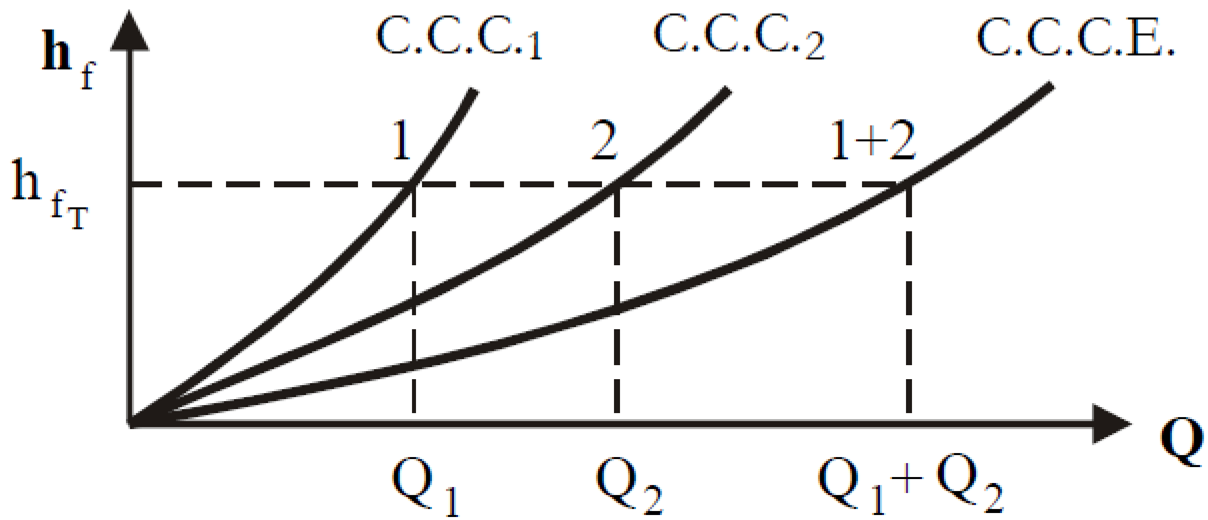
$$D_{eq} = 0{,}335\text{m}$$

On aurait pu procéder d'une manière plus rapide en calculant les débits Q_1 et Q_2 par l'utilisation directe de l'équation de Hazen-Williams (2.26) :

$$Q_1 = 0{,}1421\text{m}^3/\text{s}$$
$$Q_2 = 0{,}0489\text{m}^3/\text{s}$$

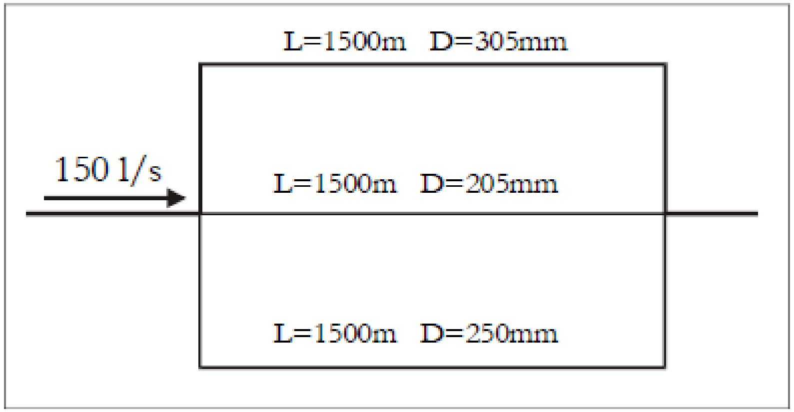
L'utilisation du débit total dans la conduite équivalente avec la même perte de charge de 2,0m donne directement le diamètre équivalent $D_{eq} = 0{,}335$m.

Courbe caractéristique de deux conduites en parallèle

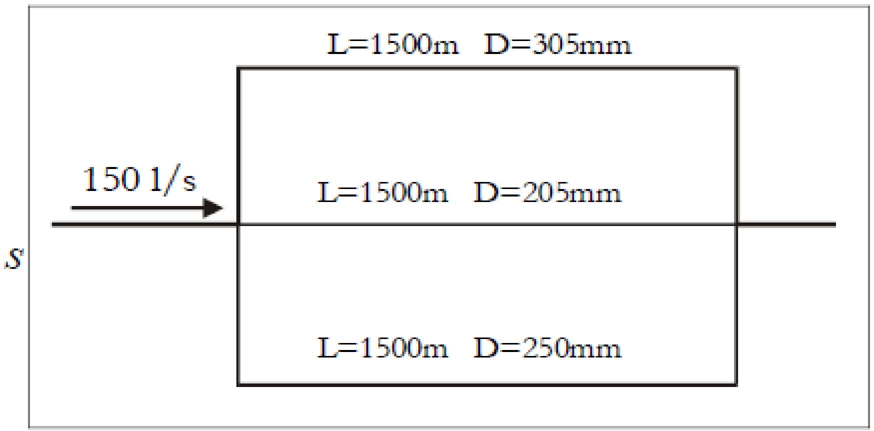


Exemple 3: Répartition du débit pour des conduites en parallèle

- Trois conduites de distribution d'eau sont placées en parallèle.
- Il faut calculer le débit dans chacune des conduites. Le coefficient $C_{HW} = 100$ pour toutes les conduites.



Répartition des débits dans des conduites en parallèle



$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 150 l/s$$

$$h_{f_1} = h_{f2} = h_{f3}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dfrac{Q_1^{1,852}}{D_1^{4,87}} = \dfrac{(Q - Q_1 - Q_3)^{1,852}}{D_2^{4,87}} \\ \dfrac{Q_1^{1,852}}{D_1^{4,87}} = \dfrac{Q_3^{1,852}}{D_3^{4,87}} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{Q_1^{1,852}}{D_1^{4,87}} = \frac{\left(Q - Q_1 - \left(\dfrac{D_3}{D_1} \right)^{4,87/1,852} \cdot Q_1 \right)^{1,852}}{D_2^{4,87}}$$

$Q_1 = 77,2\ l/s$ $\qquad Q_2 = 27,2\ l/s$ $\qquad Q_3 = 45,6\ l/s$

ıssite !

Répartition des débits dans des conduites en parallèle

On suppose que : $Q_1 = 60l/s$ Donc :

$$h_{f1} = 10,675 \times L_1 \times \left(\frac{Q_1}{C_{HW1}}\right)^{1,852} \times \frac{1}{D_1^{4,87}}$$

$$= 10,675 \times 1500 \times \left(\frac{0,06}{100}\right)^{1,852} \times \frac{1}{0,305^{4,87}} = 5,61m$$

On a :

$$h_{f2} = h_{f3} = h_{f1} = 10,675 \times L_2 \times \left(\frac{Q_2}{C_{HW2}}\right)^{1,852} \times \frac{1}{D_2^{4,87}}$$

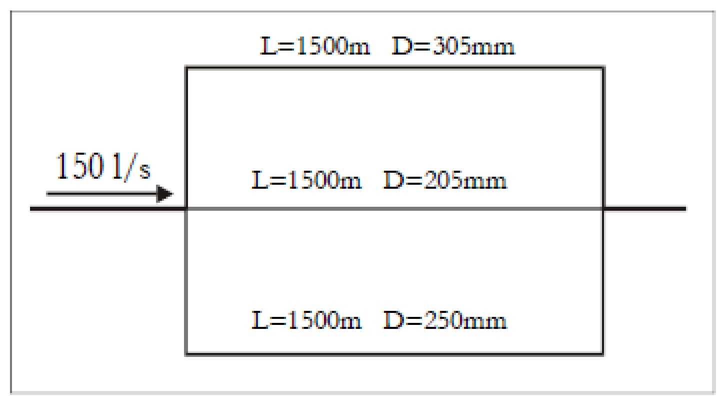
Donc :

$$Q_2 = C_{HW2}\left(\frac{h_{f1} \times D_2^{4.87}}{10,675 \times L_2}\right)^{\frac{1}{1,852}} = 21,1l/s$$

et

$$Q_3 = C_{HW3}\left(\frac{h_{f1} \times D_3^{4.87}}{10,675 \times L_3}\right)^{\frac{1}{1,852}} = 35,7l/s$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 116,7l/s \quad < 150l/s$$



Répartition des débits dans des conduites en parallèle

On corrige tous les débits:

$$Q_1 = 60 l/s \times \frac{150}{116{,}7} = 77{,}14 l/s$$

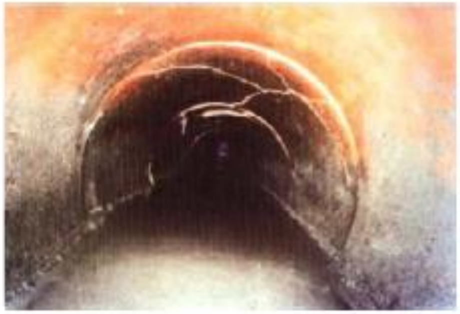
$$Q2 = 21{,}1 l/s \times \frac{150}{116{,}7} = 27.12 l/s$$

$$Q3 = 35{,}7 l/s \times \frac{150}{116{,}7} = 45{,}88 l/s$$

et

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 77{,}14 + 27{,}12 + 45{,}88 = 150 l/s$$

Écoulements à surface libre



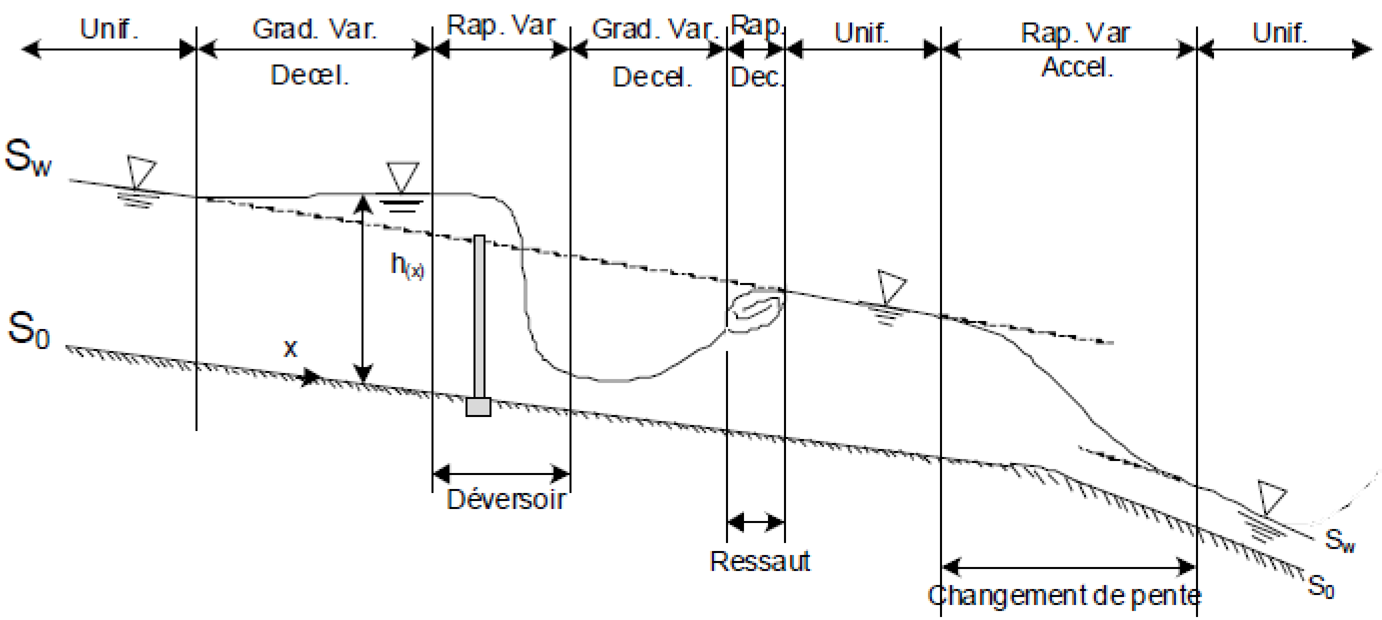
Écoulements à surface libre

- Objectifs
  - Savoir calculer les propriétés géométriques et hydrauliques d'un écoulement à surface libre.
  - Définir les critères d'optimalité de la section et d'érosion pour le dimensionnement des conduites et des canaux.
  - Être capable de classifier un écoulement selon son régime et la variation des propriétés géométriques et hydrauliques.
  - Savoir calculer la courbe de remous pour un écoulement variant graduellement.
  - Connaître les propriétés du ressaut hydraulique et les principes de construction d'un bassin d'amortissement.

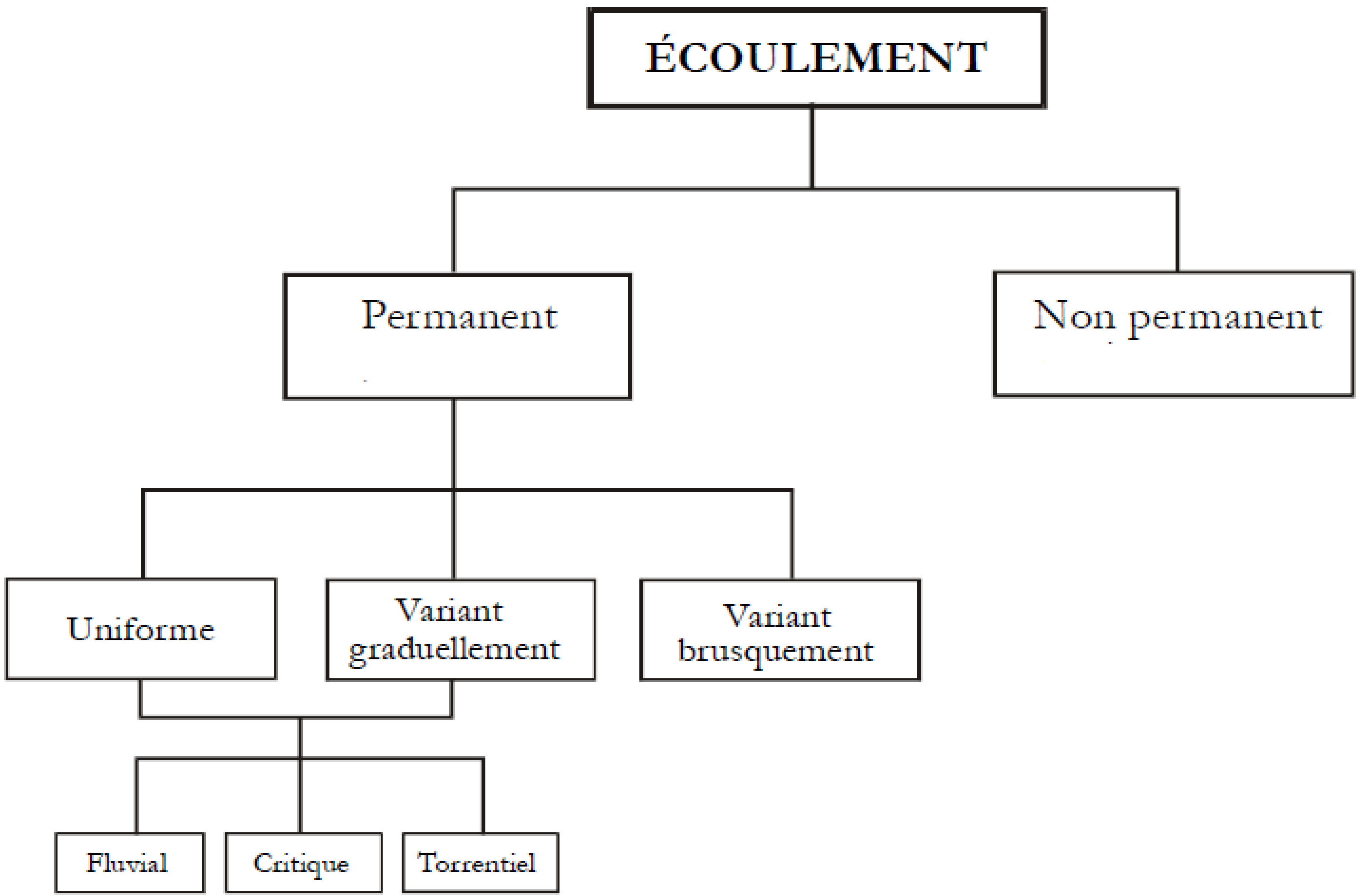
Écoulements permanents et non permanents

- Un écoulement est dit *permanent* lorsque ses caractéristiques hydrauliques demeurent constantes en fonction du temps dans toutes les sections du cours d'eau.
- Les propriétés hydrauliques peuvent, cependant, varier d'un point à un autre (écoulement non uniforme=écoulement varié)

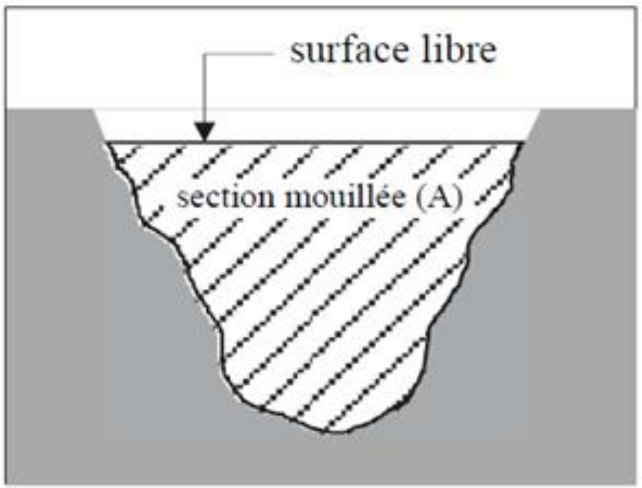
Types d'écoulements



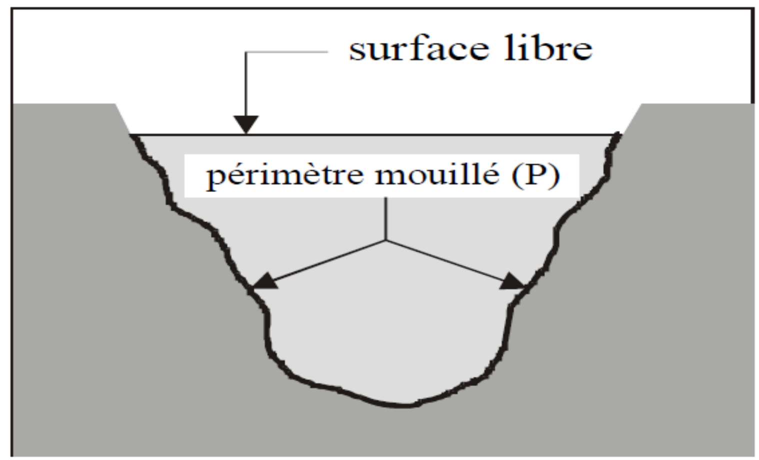
Classification des écoulements



Section mouillée



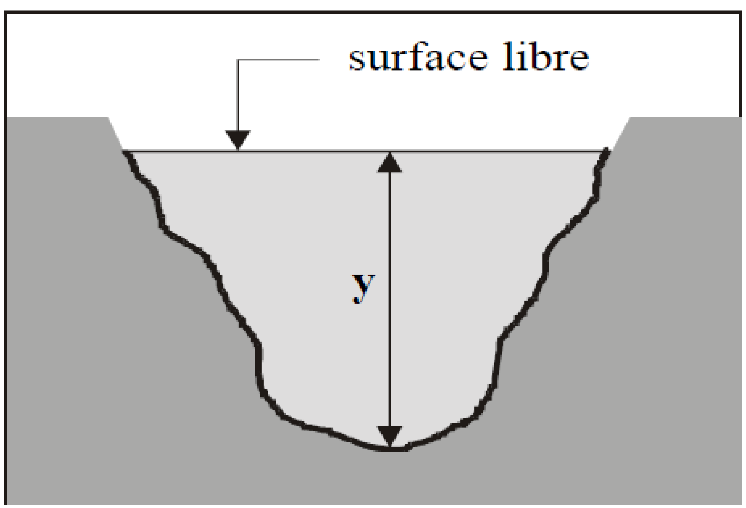
Périmètre mouillé



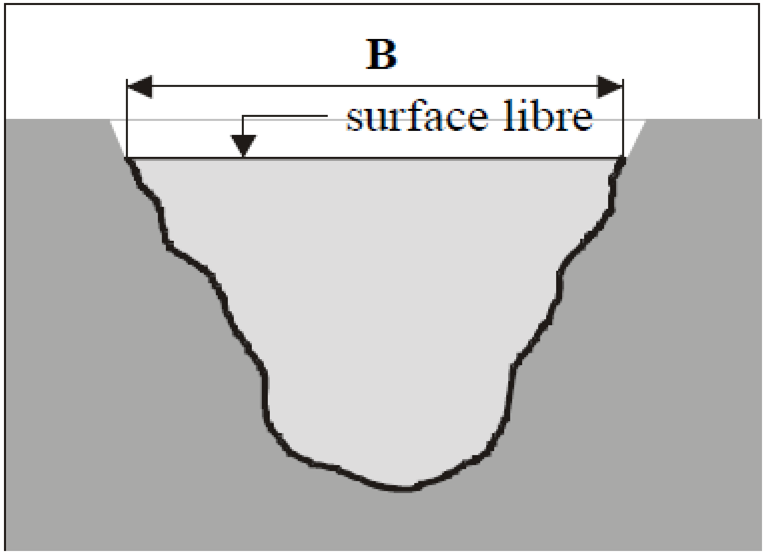
Rayon hydraulique

$$R_H = \frac{A}{P}$$

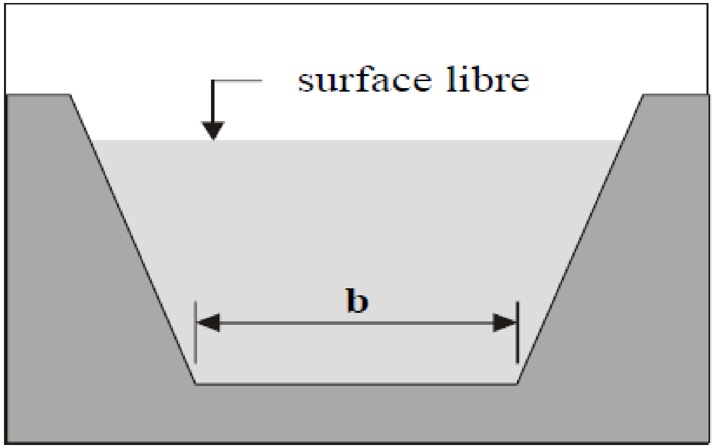
Profondeur ou tirant d'eau



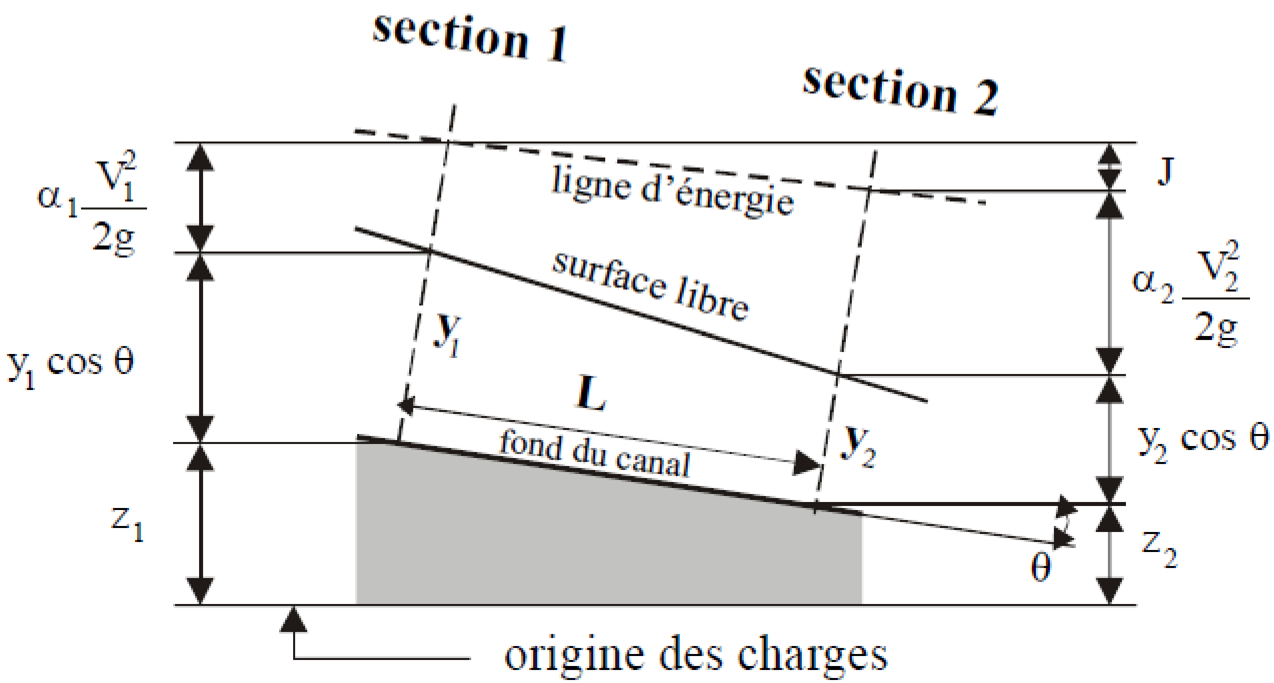
Largeur au plan d'eau

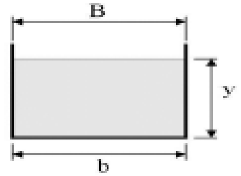
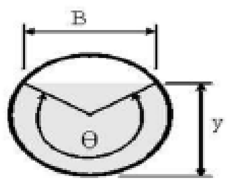
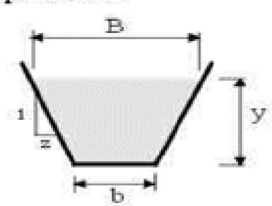
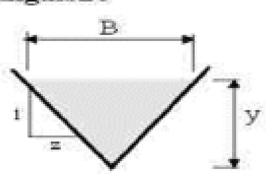


Largeur au radier



Pente d'un canal



Forme de la section	Section mouillée A	Périmètre mouillé P	Rayon Hydraulique R_H	Largeur B
rectangulaire 	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
circulaire 	$\frac{D^2}{8}(\theta - \sin\theta)$	$\frac{\theta D}{2}$	$\frac{D}{4}\left(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}\right)$	$D \sin\frac{\theta}{2}$
trapézoïdale 	$(b+zy)y$	$b + 2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
triangulaire 	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$

Propriétés géométriques des sections courantes