Réseaux de conduites et pertes de charge

FIAPertesCharge210515

Centre Lyonnais d'Acoustique
UNIVERSITE DE LYON

ÉCOLE CENTRALELYON

ÉCOLE CENTRALE LYON
Gilles Robert

Contexte

Contexte et objectif

Le transport de fluides se fait généralement à travers des réseaux de conduites plus ou moins complexes composés de conduites de différents diamètres, de raccordement, de pompes pour assurer le mouvement …

Les applications sont nombreuses:

- Adduction d'eau
- Réseau hydraulique
- Gazoduc, oléoduc (transport sur des très grandes distances)
- Réseau de chauffage
- Installations pétrochimique.
- Traitement de l'air, climatisation
- …..

Il s'agit dans ce chapitre de dimensionner les conduites, les pompes et ventilateurs, d'estimer les énergies mises en jeux ….

Problématique et analyse du problème

Gilles Robert

On peut toujours essayer d'intégrer le système d'équations de NS

Equations de conservation

Masse $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho \vec{V}) = 0$

PFD
- **Qté mouvement** $\rho \frac{DV_i}{Dt} = \rho f_i + \sigma_{ij,j}$
- **Moment dynamique** $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$

Energie: $\rho \frac{D}{Dt}\left(u + \frac{V^2}{2}\right) = \rho f_i V_i + \frac{\partial \sigma_{ij} V_i}{\partial x_j} + \rho \frac{Dq}{Dt}$

Équations dérivées

ThK $\rho \frac{D}{Dt}\left(V^2/2\right) = \rho f_i V_i + V_i \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$

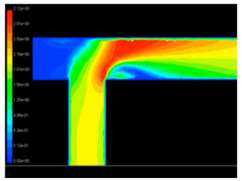
Equation d'énergie interne $\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{Dq}{Dt} + \sigma_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}$

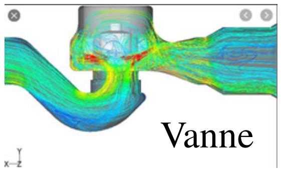
Lois de comportement

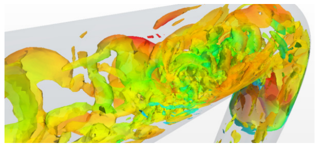
- Mécanique : $\sigma_{ij} = \left(-p(\rho,T) + \lambda(\rho,T) \cdot \mathrm{div}\mathbf{V}\right) \cdot \delta_{ij} + 2\mu(\rho,T) D_{ij}$
- Thermique: $\vec{q} = -k(\rho,T) \cdot \overrightarrow{\mathbf{grad}}(T)$

Equations d'état $u = u(T,p)$, $\rho = \rho(T,p)$

+Cond. Initiales
+Cond. Limites







Comment estimer l'écoulement dans un réseau de conduites?

H **incompressible**

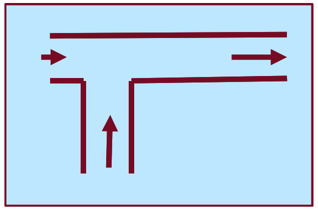
On commence à savoir faire, mais les calculs sont très lourds, les temps de calcul sont très longs. L'approche est inadaptée au dimensionnement.

Par ailleurs, on n'a pas besoin du détail de l'écoulement. On cherche à estimer un débit, une pression, une puissance de pompe, …

→ On va construire un modèle 1D

ÉCOLE CENTRALE LYON
Gilles Robert

H incompressible stationnaire



Stratégie d'approche

Modèle 1D

Approche 3D

Equations de conservation

Masse $\frac{\partial\rho}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho\vec{V})=0$

Équations dérivées

PFD
- Qté mouvement $\rho\frac{DV_i}{Dt}=\rho f_i+\sigma_{ij,j}$
- Moment dynamique $\sigma_{ij}=\sigma_{ji}$

ThK $\rho\frac{D}{Dt}\left(V^2/2\right)=\rho f_i V_i+V_i\frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j}$

Energie: $\rho\frac{D}{Dt}\left(u+\frac{V^2}{2}\right)=\rho f_i V_i+\frac{\partial\sigma_{ij}V_i}{\partial x_j}+\rho\frac{Dq}{Dt}$

Equation d'énergie interne $\rho\frac{Du}{Dt}=\rho\frac{Dq}{Dt}+\sigma_{ij}\frac{\partial V_i}{\partial x_j}$

Lois de comportement

Mécanique : $\sigma_{ij}=(-p(\rho,T)+\lambda(\rho,T)\cdot\mathrm{div}V)\cdot\delta_{ij}+2\mu(\rho,T)\,D_{ij}$

Thermique: $\vec{q}=-k(\rho,T)\cdot\overrightarrow{\mathrm{grad}}(T)$

Equations d'état $u=u(T,p)$, $\rho=\rho(T,p)$

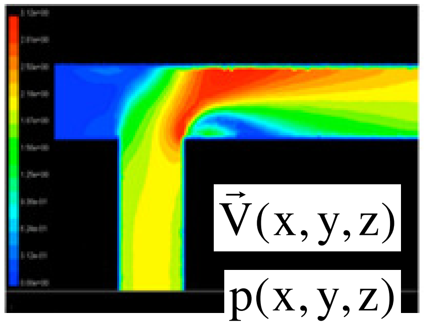
+Cond. Initiales
+Cond. Limites

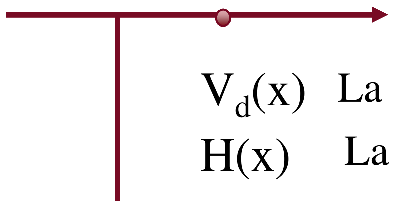
On moyenne sur la section

Modèle 1D

Modèle 1D avec 2 équations
- Conservation du débit
- Équation de la charge

Modèles expérimentaux (loi de comportement)





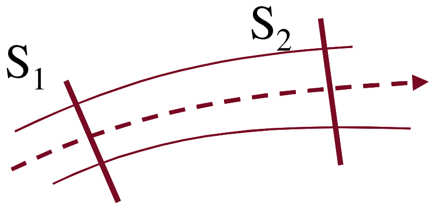
$V_d(x)$ La vitesse de débit
$H(x)$ La charge

La solution est caractérisée par 4 fonctions inconnues à 3 variables

La solution est caractérisée par 2 fonctions inconnues à une variable

ÉCOLE CENTRALE LYON
Gilles Robert

Les équations



On moyenne sur la section

H

incompressible
stationnaire

Découplage
méca/thermique

Equations de conservation

Masse $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho \vec{V}) = 0$

Equations dérivées

PFD
Qté mouvement $\rho \frac{DV_i}{Dt} = \rho f_i + \sigma_{ij,j}$
Moment dynamique $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$

ThK
$\rho \frac{D}{Dt}\left(V^2/2\right) = \rho f_i V_i + V_i \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$

Energie: $\rho \frac{D}{Dt}\left(u + \frac{V^2}{2}\right) = \rho f_i V_i + \frac{\partial \sigma_{ij} V_i}{\partial x_j} + \rho \frac{Dq}{Dt}$

Equation d 'énergie interne
$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{Dq}{Dt} + \sigma_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}$

Lois de comportement

Mécanique : $\sigma_{ij} = (-p(\rho,T) + \lambda(\rho,T)\cdot \mathrm{div}\mathbf{V})\cdot \delta_{ij} + 2\mu(\rho,T)\, D_{ij}$

Thermique: $\vec{q} = -k(\rho,T)\cdot \overrightarrow{\mathbf{grad}}(T)$

Equations d 'état $u = u(T,p)$, $\rho = \rho(T,p)$

+Cond. Initiales
+Cond. Limites

Conservation du débit volume

$$Q_v \equiv \int_{\text{Section}} \vec{V}\cdot\vec{n}\, dS \equiv V_d S = Cte$$

Vitesse de débit

Equation de la charge

$$H_2 = H_1 - \Delta H_{\text{dissipation}} + \Delta H_{\text{méca}}$$

Énergie moyenne dans la section 2 par unité de volume (Pa)

Énergie dans la section 1

Pertes par dissipation

Apport par les pompes et compresseurs

Il y a deux équations qui gèrent le problème: conservation du débit, équation de la charge

L'équation de la charge est une équation de bilan d'énergie mécanique

ÉCOLE CENTRALE LYON
Gilles Robert

La notion de charge

Flux d'énergie qui traverse la section

Déf

$$H \equiv \frac{\int_S \left(p + \rho g z + \frac{1}{2}\rho V^2 \right) \vec{V} \cdot \vec{n}\, dS}{\int_S \vec{V} \cdot \vec{n}\, dS} = p + \rho g z + \alpha \frac{1}{2} \rho V_d^2$$

Énergie moyenne dans la section par unité de volume (Pa)

Débit qui traverse la section

Le coefficient α **est appelé coefficient d'énergie cinétique**. Il rend compte dans une certaine mesure de la forme du profil de vitesse.

$$\alpha \frac{1}{2} \rho V_d^2 \equiv \frac{1}{V_d S} \int_S \rho \frac{V^3}{2} ds$$

Régime laminaire
$\alpha = 2$

Régime turbulent
$1.01 < \alpha < 1.12 \quad \approx 1$

Puissance hydraulique de l'écoulement

La puissance transportée par le fluide est reliée à la charge

$$\mathrm{W} \longrightarrow \boxed{P_{fluide} = Q_v H} \longleftarrow \mathrm{Pa}$$

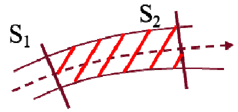
m^3/s

Dans certaines approches la charge est définie de la façon suivante $H^{(m)} = \frac{H^{(Pa)}}{\rho g} = \frac{p}{\rho g} + z + \alpha \frac{1}{2g} V_d^2$

ÉCOLE CENTRALE LYON

Gilles Robert

Pertes par dissipation visqueuse et turbulente

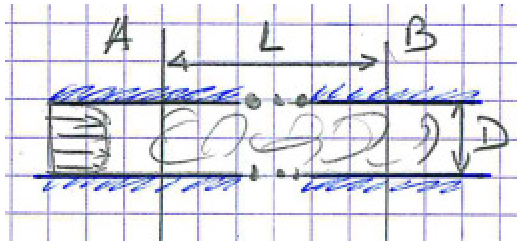


$$H_2 = H_1 - \Delta H_{dissipation} + \Delta H_{méca}$$

$$\Delta H_{dissipation} = \frac{1}{Q_v} \int_D V_i \left(\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + turb \right) dv$$

Pertes régulières

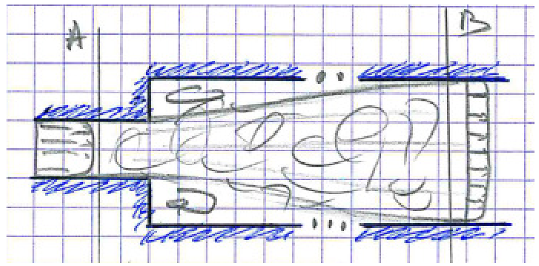
Viscosité, turbulence



$$\frac{H_A - H_B}{\frac{1}{2}\rho V_d^2} = \lambda\left(Re, \frac{\varepsilon}{D}\right)\frac{L}{D} \quad (*)$$

Pertes singulières

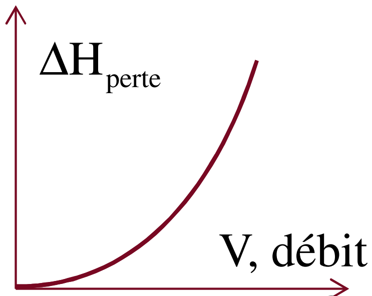
Homogénéisation par la turbulence



$$\frac{H_A - H_B}{\frac{1}{2}\rho V_d^2} = K(\text{Géométrie}, Re) \quad (*)$$

Les pertes sont en gros proportionnelles à l'énergie cinétique $\frac{1}{2}\rho V_d^2$

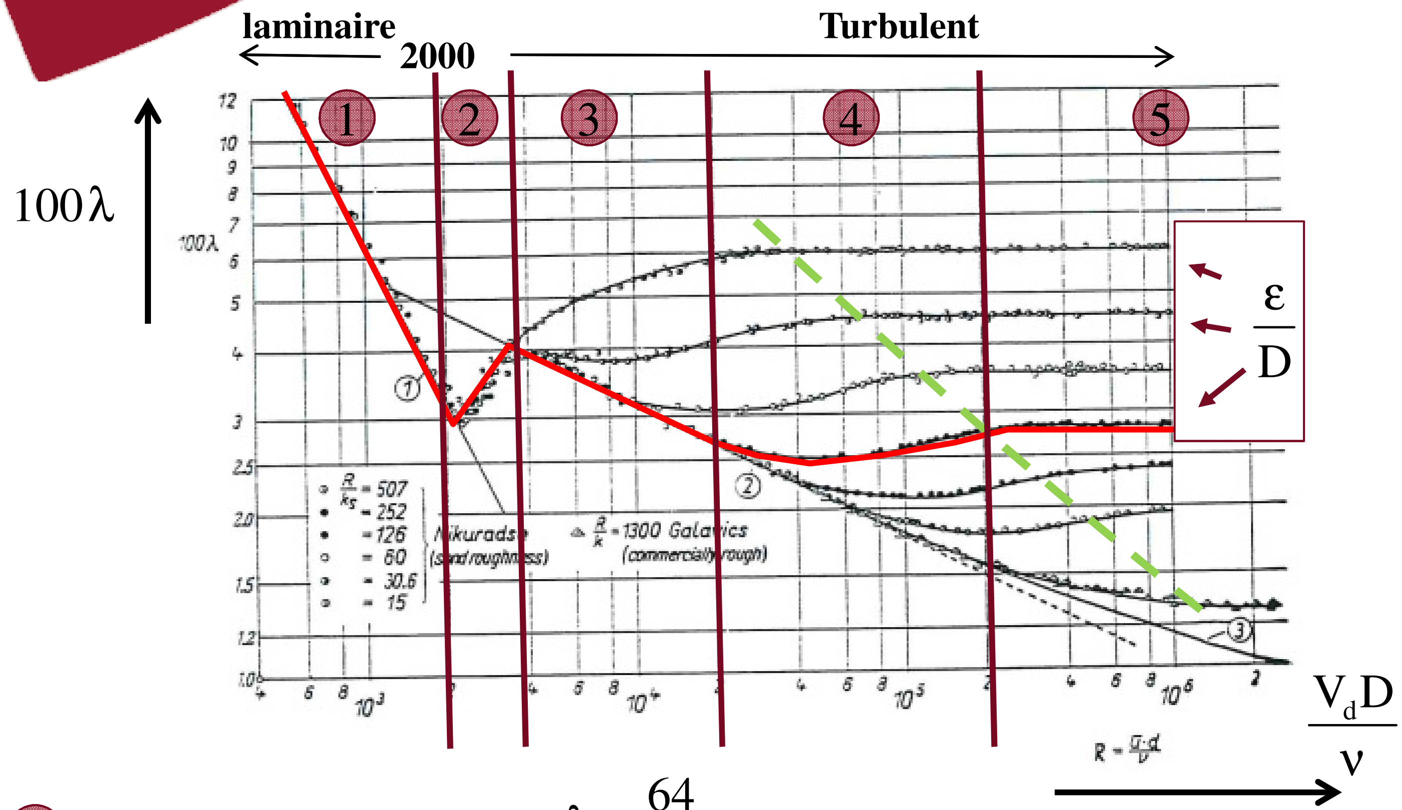
Les coefficients de proportionnalité sont obtenus par la mesure

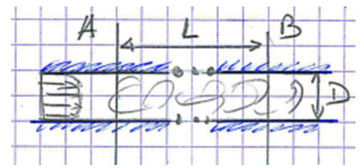


(*) Analyse dimensionnelle

Coefficient de pertes de charge linéiques : Conduite circulaire

Résultats expérimentaux (Nikuradse)





$$\frac{H_A - H_B}{\frac{1}{2}\rho V_d^2} = \lambda\left(\mathrm{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right)\frac{L}{D}$$

ε épaisseur des rugosités de la paroi

1 Laminaire : Re<2000 $\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}$

2 Zone transition laminaire turbulent

3 Turbulent lisse : Re >2000, Blasius $\lambda = \frac{0.3164}{\mathrm{Re}^{0.25}}$

4 Zone de transition $\lambda\left(\mathrm{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right)$

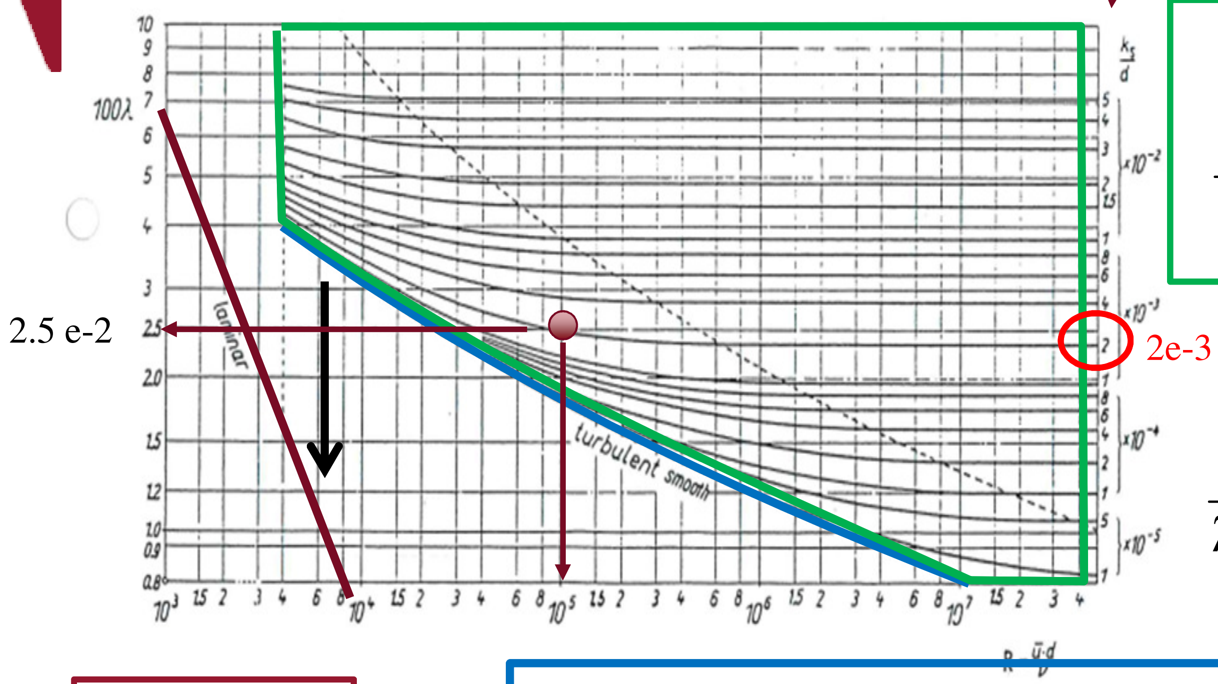
5 Conduite rugueuse, régime turbulent pleinement développé $\lambda\left(\cancel{\mathrm{Re}}, \frac{\varepsilon}{D}\right)$

Coefficient de pertes de charge linéiques : Conduite circulaire

Gilles Robert

En pratique on utilise le diagramme de Moody

Rugosité relative ε/D



Colebrook, formule implicite

$$\frac{1}{\lambda^{1/2}} = -2.0 \log\left(\frac{\varepsilon / D}{3.7} + \frac{2.51}{Re_D\, \lambda^{1/2}}\right)$$

Haaland, formule explicite

$$\frac{1}{\lambda^{1/2}} \approx -1.8 \log\left(\left(\frac{\varepsilon / D}{3.7}\right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re_D}\right)$$

laminaire

$$\lambda = \frac{64}{Re_D}$$

Turbulent lisse (Blasius)

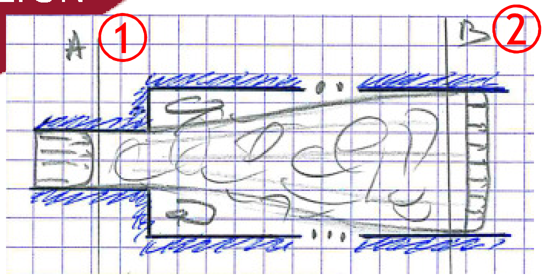
$$\lambda = 0.316\, Re_D^{-1/4} \quad \text{pour} \quad 4000 < Re_D < 10^5$$

$$\lambda = \left(1.8 \log\left(\frac{Re_D}{6.9}\right)\right)^{-2}$$

On voit très nettement que pour un Reynolds donné le coefficient de perte turbulent est supérieur au coefficient laminaire. Cela traduit bien que la dissipation est plus forte en régime turbulent.

ÉCOLE CENTRALE LYON

Gilles Robert



Pertes de charge singulières

$$\frac{H_A - H_B}{\frac{1}{2}\rho V_d^2} = K(\text{Géométrie}, \text{Re})$$

Ces pertes correspondent à l'énergie qu'il faut fournir pour homogénéiser l'écoulement après la singularité

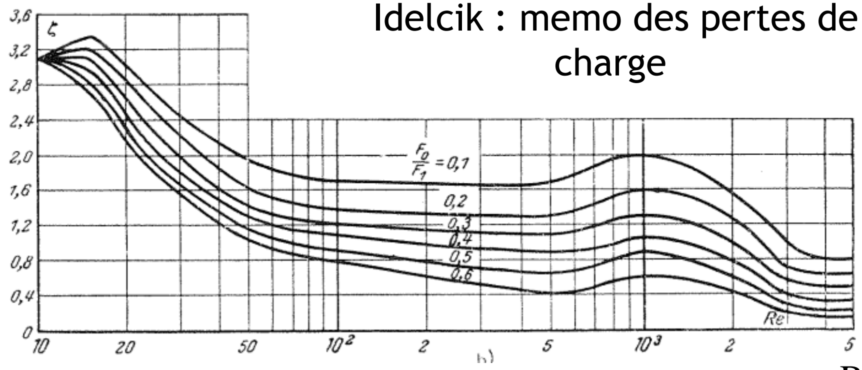
Exemple Pour l'élargissement brusque avec une répartition de vitesse uniforme $K\left(\text{Re}, \frac{S_1}{S_2}\right)$

① $1 < \text{Re} < 8 \Rightarrow K = \frac{26}{\text{Re}}$

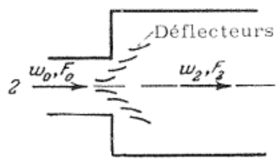
② $\text{Re} > 3.5\,10^3 \Rightarrow K = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$

$10 < \text{Re} < 3.5\,10^3 \Rightarrow K = f\left(\text{Re}, \frac{S_1}{S_2}\right)$

Idelcik : memo des pertes de charge



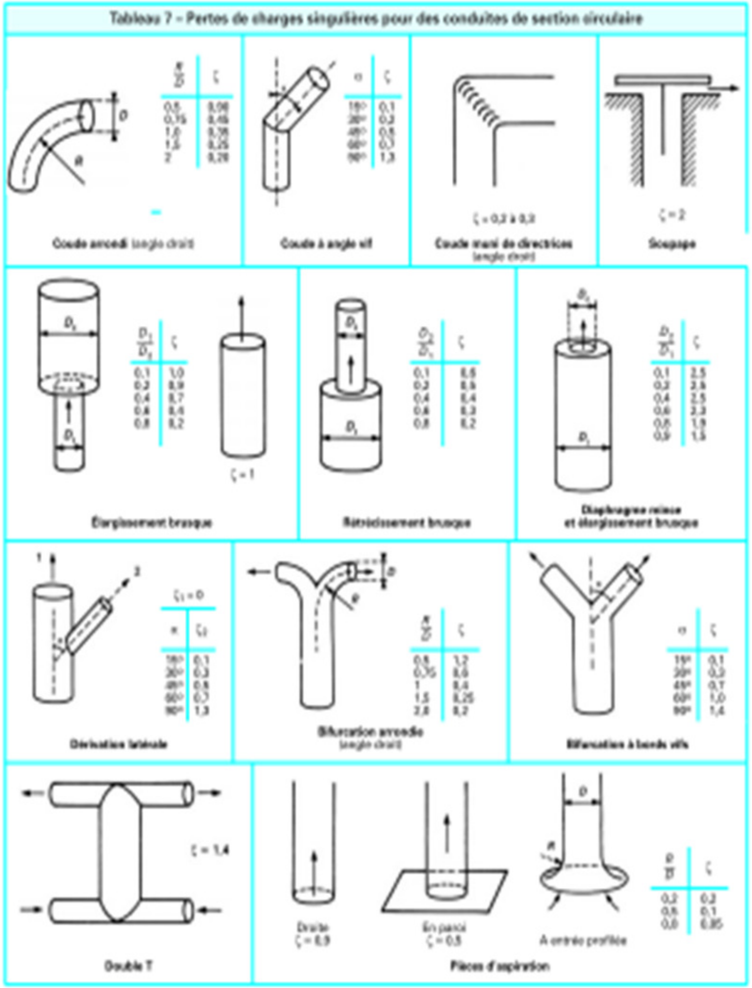
On peut diminuer les pertes en favorisant l'homogénéisation aval par des déflecteurs



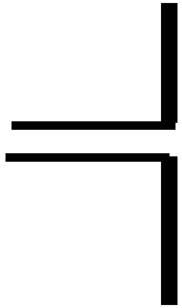
$\text{Re} > 3.5\,10^3 \Rightarrow K = 0.6\left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$

ÉCOLE CENTRALE LYON
Gilles Robert

Pertes de charge singulières



Sortie à l'atmosphère



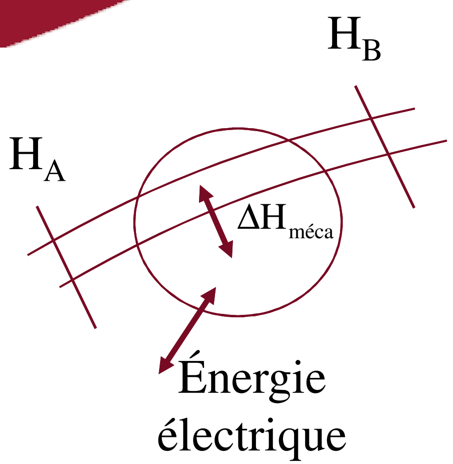
$$\Delta H = \frac{1}{2}\rho V_{d1}^2$$

On perd toute la dynamique

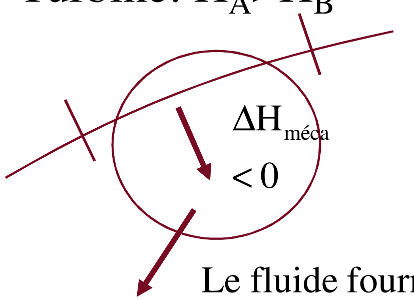
Rq Lorsque deux singularités se suivent, la perte est généralement <u>inférieure</u> à la somme des pertes de charge des deux singularités prises isolément.

Pompes, Ventilateurs, Turbines …

Ils servent soit à fournir (pompe, ventilateur) soit à récupérer (turbine) de l'énergie au (du) fluide

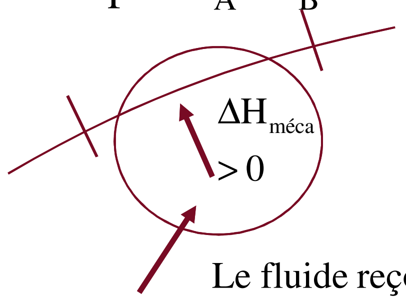


Turbine: $H_A > H_B$



Le fluide fournit de l'énergie

Pompe: $H_A < H_B$



Le fluide reçoit de l'énergie

Puissance fournie au fluide par l'extérieur

$$\boxed{P_{ext \to f} = Q_v \left(H_B - H_A\right)}$$

$P_{ext \to f}$: W ; Q_v : m^3/s ; $H_B - H_A$: Pa

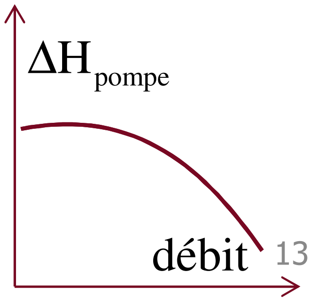
Rendement

En général, il y aura des pertes mécanique par frottement dans la machine. Il faudra alors fournir à cette pompe une puissance électrique supérieure à Pf . On introduit alors la notion de rendement

$$\eta_{pompe} = \frac{P_{p \to f}}{P_{élec}} \qquad \eta_{turbine} = \frac{P_{électrique\,récupérée}}{P_{f \to t}}$$

Caractéristique d'une pompe

L'énergie fournie par une pompe est généralement fonction du débit



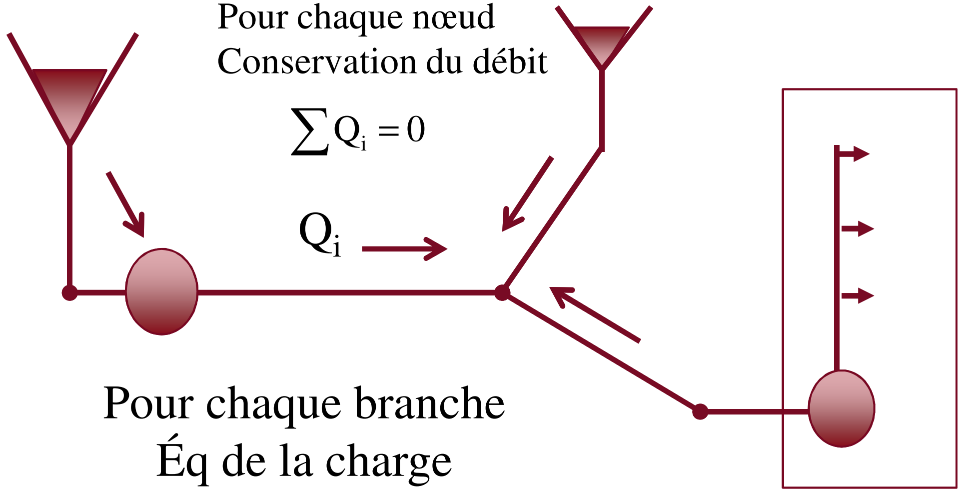
ÉCOLE CENTRALE LYON

Gilles Robert

Applications, dimensionnement de réseaux…

Pour chaque nœud
Conservation du débit

$$\sum Q_i = 0$$



Pour chaque branche
Éq de la charge

$$\Delta H_i = -\Delta H_{perte} + \Delta H_{méca}$$

Dimensionnement de pompe

Dimensionnement des conduites D, épaisseurs

Calcul de débit

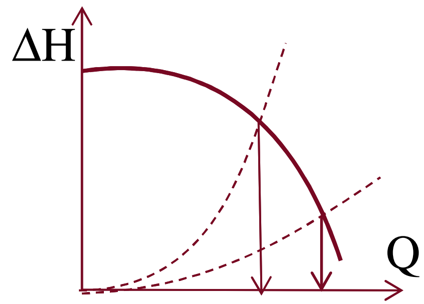
La formulation de ce type de problèmes repose sur
- La conservation du débit appliquée à chaque nœud
- L'équation de la charge appliquée à chaque branche

Point de fonctionnement

Pour la branche i, pour un ΔH donné

La pompe « équilibre les pertes »

On a un débit Q



On augmente le diamètre de la conduite

La vitesse diminue

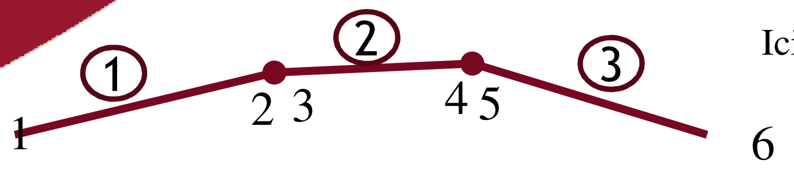
Les pertes diminuent

Le débit augmente

Nouveau point de fonctionnement

Gilles Robert

Pratiques de calcul de pertes de charge dans une branche



Ici le débit Qv et les conduites sont supposés connus.

1. On calcule les vitesses de débit dans chaque tronçons avec l'équation de débit $V_d^{(i)} = \dfrac{4Q_v}{\pi D_{(i)}^2}$

2. On en déduit le nombre de Reynolds et le régime dans chaque conduite $Re^{(i)} = \dfrac{V_d^{(i)} D^{(i)}}{\nu}$

3. Les pertes de charge linéiques
$$\Delta H_{(i)} = \frac{1}{2}\rho V_{(i)}^2 \frac{L_{(i)}}{D_{(i)}} \lambda\left(Re_{(i)}, \frac{\varepsilon_{(i)}}{D_{(i)}}\right)$$

4. Les pertes de charges singulières ΔH_s

5. On en déduit la perte de charge totale par sommation
$$\Delta H_{perte} = \sum \Delta H_{(i)} + \sum \Delta H_s$$

Rq Si la sortie est à l'atmosphère
$$H_{sortie} = p_{atm} + \frac{1}{2}\rho V_{ds}^2 + \rho g z_s$$

On sait alors quelle énergie le fluide aura perdu.
Donc à l'entrée du réseau, il faudra une énergie de
$$H_{entrée} = \Delta H_{pertes} + H_{sortie}$$
ou il faudra pour contre balancer ces pertes mettre une pompe de puissance
$$P_{Pompe} = Q_v \; \Delta H_{totale}$$

Ce qu'il faut retenir

Le calcul de réseaux utilise un modèle 1D qui repose sur 2 équations
- Conservation du débit
- Équation de la charge

Pour un réseaux de conduites donné, les inconnues sont:
- La vitesse dans les conduites
- La charge ou la pression

La définition de la charge $H \equiv p + \rho g z + \alpha \frac{1}{2} \rho V_d^2$

α=1 si turbulent
α=2 si laminaire

La relation charge - puissance $\text{Puiss} = Q_v \, \Delta H$

Les notions de pertes de charges régulières (Moody) et singulières

Savoir faire un calcul de pertes de charge

Gilles.robert@ec-lyon.fr

ÉCOLE CENTRALE LYON

36 av. Guy de Collongue
69134 Écully cedex
T + 33 (0)4 72 18 60 00
www.ec-lyon.fr