



HYDRAULIQUE INDUSTRIELLE

Cours Magistral : 10 heures
Travaux Dirigés : 10 heures
Travaux Pratiques : 16 heures

Niveau : Licence Génie des Systèmes Industriels

Objectifs :

- Permettre aux étudiants d'appréhender un système hydraulique pour en modifier le cahier des charges et lui donner une fonctionnalité supplémentaire.
- Permettre aux étudiants d'appréhender un système hydraulique pour lui redonner la fonctionnalité pour lequel il avait été prévu, en changeant, modifiant des éléments n'assurant plus leur fonction ou ayant un mode de fonctionnement dégradé.

Bibliographie :

- Mannesmann Rexroth : Le cours d'hydraulique Tome 1 à 3
- Industries et Techniques : Mécanismes Hydrauliques et Pneumatiques chez DUNOD par J. Faisandier
- L'Usine Nouvelle : Aide Mémoire Hydraulique Industrielle chez DUNOD par J. Roldan Vilorio
- Etapes : Génie Mécanique Automatismes Industriels chez NATHAN par J.M. Bleux et J.L. Fanchon
- Sciences Industrielles : Hydrostatique 1 chez ELLIPSES par F. Esnault et P. Bénéteau
- Sciences Industrielles : Hydrostatique 2 chez ELLIPSES par F. Esnault et P. Bénéteau
- Hydraulique : Machines et composants chez EYROLLES par G. FAYET
- Documentation Bosh

Auteur : Thierry Boulay Professeur Agrégé de génie Mécanique

SOMMAIRE

1. Principes généraux -----	5
1A. Relations entre énergie mécanique et énergie hydraulique -----	5
1A1. La pression -----	5
1A2. Théorème du travail -----	5
1A3. Théorème des puissances -----	5
1A4. Comportement des fluides en mouvement -----	6
1A5. Les unités fondamentales -----	6
1A6. Relations importantes -----	7
1B. Viscosité -----	7
1B1. Viscosité dynamique μ (Mu) -----	7
1B2. Viscosité cinématique ν (Nu) -----	8
1B3. Autres viscosités -----	8
1C. Régimes d'écoulements -----	8
1C1. Nombre de Reynolds Re -----	8
1C2. Régime laminaire -----	8
1C3. Régime turbulent -----	8
1C4. Régime transitoire -----	9
1D. Compressibilité et dilatation -----	9
1D1. Coefficient de compressibilité -----	9
1D2. Coefficient volumique de dilatation thermique -----	9
1E. Pertes de charge -----	9
1E1. Introduction -----	9
1E2. Pertes de charge systématiques en régime laminaire -----	10
1E3. Pertes de charge systématiques en régime turbulent lisse -----	10
1E4. Pertes de charge systématiques en régime turbulent rugueux -----	10
1E5. Pertes de charge singulières -----	11
2. Le fluide hydraulique -----	Erreur ! Signet non défini.
2A. Produits aqueux -----	Erreur ! Signet non défini.
2B. Huiles minérales -----	Erreur ! Signet non défini.
2C. Huiles de synthèse -----	Erreur ! Signet non défini.
2D. Caractéristiques -----	Erreur ! Signet non défini.
2D1. Indice de viscosité V_i -----	Erreur ! Signet non défini.
2D2. Point d'aniline -----	Erreur ! Signet non défini.
2D3. Onctuosité -----	Erreur ! Signet non défini.
2D4. Point éclair ou d'inflammabilité -----	Erreur ! Signet non défini.
2D5. Point de feu ou point de combustion -----	Erreur ! Signet non défini.
2D6. Point d'auto inflammation -----	Erreur ! Signet non défini.
2D7. Points de congélation -----	Erreur ! Signet non défini.
2D8. Propriétés anti-corrosives ou indice d'acide -----	Erreur ! Signet non défini.
2D9. Carbone résiduel -----	Erreur ! Signet non défini.
2D10. Comportement vis-à-vis de l'air ou désémulsion -----	Erreur ! Signet non défini.
2D11. Conductibilité thermique -----	Erreur ! Signet non défini.
2D12. Non conductibilité électrique -----	Erreur ! Signet non défini.
2D13. Autres caractéristiques -----	Erreur ! Signet non défini.
2E. Désignation des huiles minérales -----	Erreur ! Signet non défini.
2F. Contrôles -----	Erreur ! Signet non défini.
2F1. Qualitatif -----	Erreur ! Signet non défini.
2F2. Quantitatif -----	Erreur ! Signet non défini.

3. La symbolique hydraulique ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 3A. Autour du réservoir ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 3B. Autour du groupe de pompage ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 3C. Autour de la distribution----- **Erreur ! Signet non défini.**
 3D. Autour des actionneurs ----- **Erreur ! Signet non défini.**
4. La technologie ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4A. Le réservoir (voir page suivante)----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4B. Le filtre ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4B1. Techniques de filtration----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4B2. Filtre à tamisage----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4C. Les canalisations ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4C1. Canalisation rigide----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4C2. Canalisation souple ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4C3. Les raccords ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4C4. Dimensionnement----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4C5. Abaque de pertes de charge pour tubes rigides de la série millimétrique --- **Erreur ! Signet non défini.**
 4C6. Détermination de la dimension nominale de passage --- **Erreur ! Signet non défini.**
 4D. Les accumulateurs ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4D1. Leur rôle ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4D2. Détermination d'un accumulateur ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4E. Le clapet anti-retour----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4E1. Standard ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4E2. Piloté----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4F. Le limiteur de pression réglable ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4G. Le réducteur de pression ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4H. Le limiteur de débit ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4I. Le régulateur de débit----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4J. Le diviseur de débit ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4K. Le distributeur ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4K1. A tiroir ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4K2. A clapet ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4K3. Synthèse sur les distributeurs ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L. La pompe ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L1. A engrenages ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L1.1 A dentures extérieures,----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L1.2 A dentures intérieures, ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L2. A palettes----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L2.1 A stator cylindrique ----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L2.2 A stator en forme de came----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L3. A pistons axiaux----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L3.1 Glace fixe, bloc cylindre tournant, axe d'entraînement brisé, cylindrée fixe, **Erreur ! Signet non défini.**
 4L3.2 Plateau tournant, bloc cylindre fixe, axe d'entraînement aligné, cylindrée fixe, **Erreur ! Signet non défini.**
 4L3.3 Glace fixe, bloc cylindre tournant, axe d'entraînement aligné, cylindrée variable,----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L3.4 Plateau fixe mais inclinable, bloc cylindre tournant, axe d'entraînement aligné, cylindrée variable,----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L4. A pistons radiaux----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L4.1 A système bielle manivelle----- **Erreur ! Signet non défini.**
 4L4.2 A excentrique ----- **Erreur ! Signet non défini.**

4L4.3 A bloc cylindres excentrés -----	Erreur ! Signet non défini.
4L5. A pistons en lignes -----	Erreur ! Signet non défini.
4L6. Synthèse sur les pompes -----	Erreur ! Signet non défini.
4M. Le vérin -----	Erreur ! Signet non défini.
4M1. Le vérin simple effet -----	Erreur ! Signet non défini.
4M2. Le vérin double effet -----	Erreur ! Signet non défini.
4M2.1 Simple -----	Erreur ! Signet non défini.
4M2.2 Différentiel -----	Erreur ! Signet non défini.
4M2.3 Double tige -----	Erreur ! Signet non défini.
4M3. Le vérin télescopique -----	Erreur ! Signet non défini.
4M4. Le vérin rotatif -----	Erreur ! Signet non défini.
4M4.1 A pignon crémaillère -----	Erreur ! Signet non défini.
4M4.2 A palettes -----	Erreur ! Signet non défini.
4M5. Etude dynamique -----	Erreur ! Signet non défini.
4M6. Raideur du vérin -----	Erreur ! Signet non défini.
4M7. Flambage -----	Erreur ! Signet non défini.
4M8. Amortissement -----	Erreur ! Signet non défini.
4N. Les moteurs -----	Erreur ! Signet non défini.
4O. Synthèse sur la technologie des composants -----	Erreur ! Signet non défini.
5. Les solutions technologiques -----	Erreur ! Signet non défini.
5A. Le circuit ouvert -----	Erreur ! Signet non défini.
5B. Le circuit fermé -----	Erreur ! Signet non défini.
5C. Différentes applications -----	Erreur ! Signet non défini.
6. Les servo – mécanismes -----	Erreur ! Signet non défini.
7. Risques et Prévention en intervention -----	Erreur ! Signet non défini.
7A. Les risques -----	Erreur ! Signet non défini.
7A1. Définition du risque et utilisation des systèmes -----	Erreur ! Signet non défini.
7A2. Le système normatif -----	Erreur ! Signet non défini.
7A3. Liste des risques -----	Erreur ! Signet non défini.
7A4. Pour fixer les idées -----	Erreur ! Signet non défini.
7B. La prévention -----	Erreur ! Signet non défini.
7B1. Principales causes d'accidents -----	Erreur ! Signet non défini.
7B2. Mesures préventives -----	Erreur ! Signet non défini.
7C. La maintenance corrective -----	Erreur ! Signet non défini.
7D. L'habilitation -----	Erreur ! Signet non défini.
7D1. Petite mise au point -----	Erreur ! Signet non défini.
7D2. La formation -----	Erreur ! Signet non défini.
7D3. Les niveaux d'habilitation -----	Erreur ! Signet non défini.
7E. Logigramme de sécurité -----	Erreur ! Signet non défini.

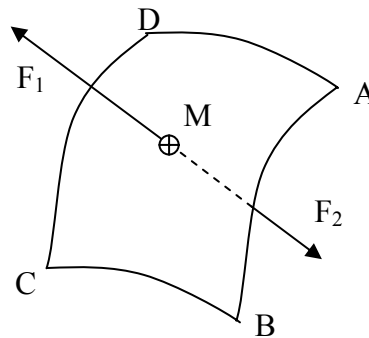
HYDRAULIQUE

1. Principes généraux

1A. Relations entre énergie mécanique et énergie hydraulique

1A1. La pression

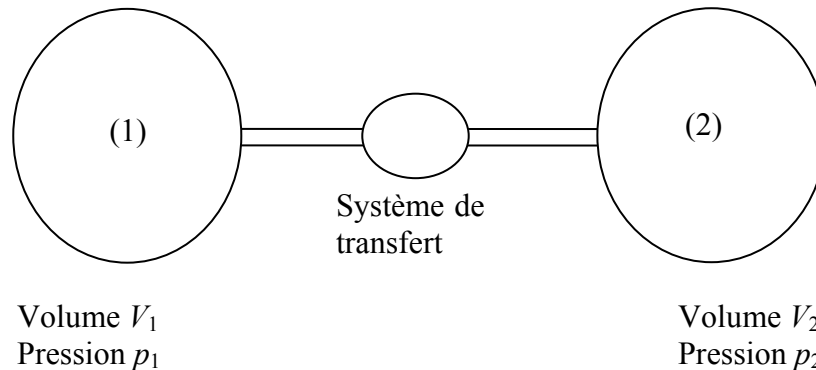
Soit une surface quelconque, ABCD (S) de centre M, le liquide exerce de chaque coté de la surface une force. Les forces sont égales et opposées.



$$F_1 = F_2 = F$$

Si on fait tendre ABCD vers O le rapport $\frac{dF}{dS}$ tend vers une valeur finie p que l'on appelle la pression.

1A2. Théorème du travail



- Pour faire passer un volume V de (1) vers (2) si $p_1 < p_2$ il faut exercer sur le système de transfert un travail mécanique W .

$$W = V \cdot (p_2 - p_1)$$

- Pour faire passer un volume V de (2) vers (1) si $p_1 < p_2$ on récupère sur le système de transfert un travail mécanique (récupérable sur un moteur) W identique au précédent.

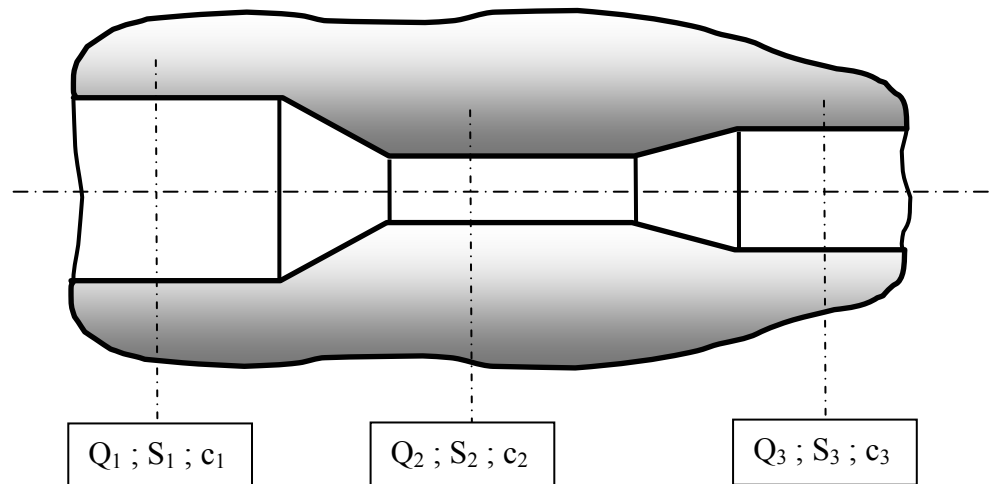
1A3. Théorème des puissances

$$P = \frac{W}{t} = \frac{V}{t} \cdot (p_2 - p_1) = q_v \cdot (p_2 - p_1) = q_v \cdot p$$

q_v est le débit volumique par seconde et p la pression relative

1A4. Comportement des fluides en mouvement

- Principe



- Equation de continuité
Dans le cas d'un fluide qui s'écoule dans un tube de section variable, le volume ou débit qui passe par une section en un temps déterminé est le même quelle que soit la section considérée.

$$Q_1 = S_1 \cdot c_1 = Q_2 = S_2 \cdot c_2 = Q_3 = S_3 \cdot c_3$$

On obtient alors :

- $c_1 < c_2$ puisque $S_1 > S_2$
- $c_3 < c_2$ puisque $S_3 > S_2$
- Equation de l'énergie selon Bernoulli
L'énergie contenue dans un fluide qui passe dans un tube se décompose en :
 - énergie potentielle : elle dépend de la hauteur de la colonne de fluide et de la pression statique ;
 - énergie cinématique : elle dépend de la vitesse du fluide et de la pression dynamique.

De la loi de conservation de l'énergie découle l'équation de Bernoulli :

$$p + \rho g z + \frac{1}{2} \rho c^2 = cste$$

1A5. Les unités fondamentales

Par décret du 03/05/61 modifié le 04/12/75 le système légal est le S.I. soit :

- Le mètre (m) → longueur
- Le kilogramme (kg) → masse
- La seconde (s) → temps
- L'ampère (A) → intensité
- Le kelvin (K) → température
- La mole (mol) → matière
- Le candela (cd) → intensité lumineuse

A retenir :

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$$

$$T \text{ (K)} = T \text{ (}^\circ\text{)} + 273,18$$

$$1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$$

$$1 \text{ ch.} = 736 \text{ W}$$

En hydraulique :L'unité est le bar. 1 bar = 1 daN/cm²

Les unités retenues sont alors :

le cm	→	longueur
la tonne	→	masse
le déca newton	→	force

En hydraulique aéronautique :

L'unité est le psi (Pound per Square Inch). 1000 psi = 68,944 bar

Pour fixer les idées :

200 bars sont équivalents à 20 000 volts

1A6. Relations importantes

- Travaux ou énergies

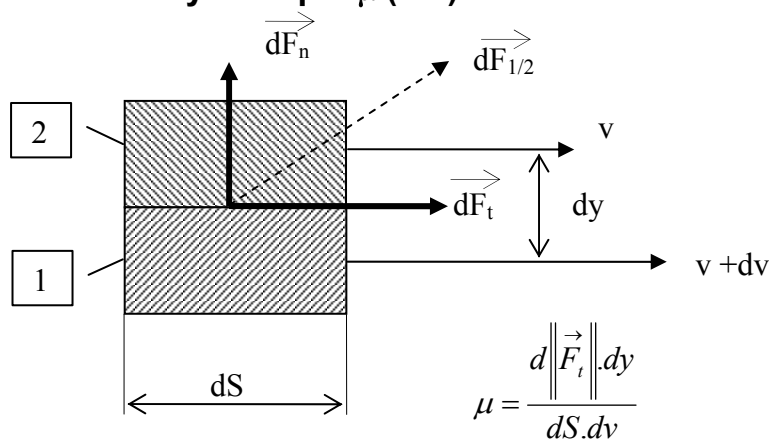
$W = F \cdot \ell$	système en translation
$W = C \cdot \theta$	système en rotation
$W = p \cdot V$	système hydraulique
$W = U \cdot I \cdot t$	système électrique

F : force	ℓ : longueur
C : couple	θ : angle
p : pression	V : volume
U : tension	I : intensité
t : temps	

- Puissances

$P = F \cdot c$	système en translation
$P = C \cdot \omega$	système en rotation
$P = p \cdot q$	système hydraulique
$P = U \cdot I$	système électrique

c : vitesse linéaire	ω : vitesse angulaire
ω : vitesse angulaire	q : débit volumique

1B. Viscosité**1B1. Viscosité dynamique μ (Mu)**

L'unité est le Pa.s ou le Poiseuille.

fluide	Température (°C)	Viscosité dynamique μ (Pa.s)	Masse volumique ρ (kg/m ³)
Eau	20	10 ⁻³	998
Eau	50	0,55.10 ⁻³	
Pétrole	15	1,85.10 ⁻³	800
Huile	20	10 ⁻² à 4.10 ⁻²	880 à 950
Glycérine	20	1,49	1260

1B2. Viscosité cinématique ν (Nu)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

ρ est la masse volumique du fluide considéré.

L'unité est le m^2/s ou le St (Stoke). Le plus souvent on utilise le centi-Stoke.

$$1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$$

1B3. Autres viscosités

Il existe d'autres viscosités utilisées mais non conformes au système international.

En Europe	→	le degré Engler	→	°E
En Angleterre	→	la seconde de Redwood	→	" R
Au USA	→	la seconde de Saybolt	→	" S

Il existe une numérotation SAE mais elle n'est utilisée que pour le graissage des moteurs thermiques.

1C. Régimes d'écoulements

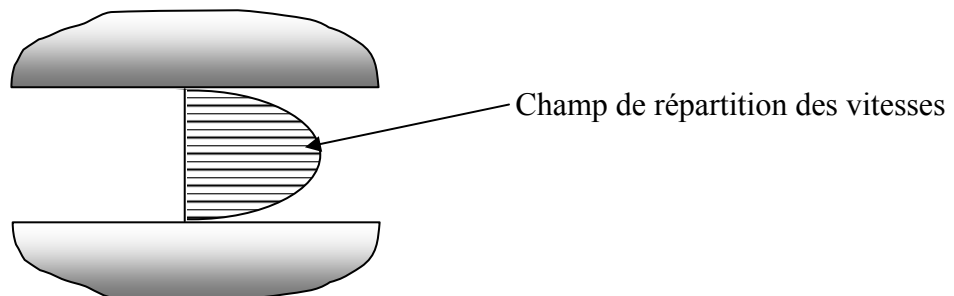
1C1. Nombre de Reynolds R_e

$$R_e = \frac{c \cdot d}{\nu}$$

R_e est sans unité.

ν : viscosité cinématique (m^2/s) ou (St)
 d : diamètre intérieur de la conduite (m)
 c : vitesse d'écoulement (m/s)

1C2. Régime laminaire



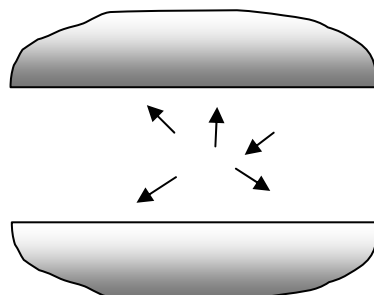
Les filets fluides restent // entre eux. Dans les conduites hydrauliques de sections circulaires et lisses, on obtient un régime laminaire tant que :

$$R_e < 2000$$

A retenir :

Un système en régime laminaire peut devenir turbulent sous l'action des vibrations induites par un moteur ou pompe.

1C3. Régime turbulent



Les filets fluides s'orientent de façon aléatoire. Dans les conduites hydrauliques de sections circulaires et lisses, on obtient un régime turbulent si :

$$R_e > 3000$$

Remarque :

Si $Re > 10^5$, on qualifie l'écoulement de turbulent rugueux et entre 3000 et 10^5 de turbulent lisse.

1C4. Régime transitoire

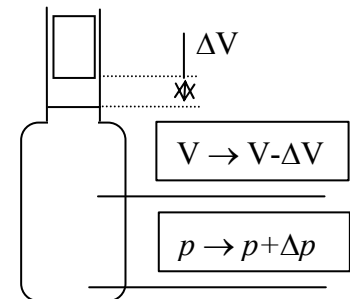
Entre 2000 et 3000 il existe une plage d'écoulement dont le régime est dit incertain.

1D. Compressibilité et dilatation**1D1. Coefficient de compressibilité**

Pour les calculs de puissance et de travail dans le domaine hydrostatique le fluide utilisé est considéré comme incompressible mais cette notion reste essentielle pour le calcul des servomécanismes.

Soit un fluide, sous une pression p dans un récipient de volume V et obturé par un piston mobile.

On fait varier le volume V d'une quantité ΔV négative, alors la pression augmente d'une quantité Δp positive.



Le coefficient de compressibilité est noté β et est défini par :

$$\beta = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dp}$$

On parle également de module de compressibilité du fluide E_F il est défini par :

$$E_F = \frac{1}{\beta}$$

A retenir : Pour les huiles minérales on a $\beta \in [60.10^{-11} ; 80.10^{-11}]$ exprimé en Pa^{-1} .

$E_F \in [1250 ; 1700]$ exprimé en MPa.

1D2. Coefficient volumique de dilatation thermique

Ce coefficient est défini, à pression constante, par :

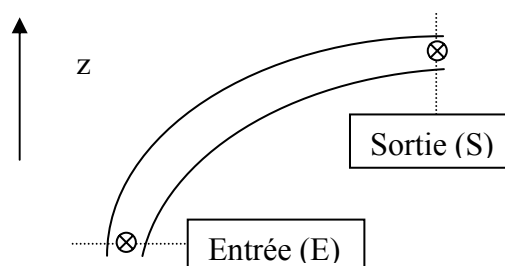
$$\alpha = \frac{\Delta V/V}{\Delta T}$$

<p>V : volume initial ΔV : variation de volume ΔT : variation de température ($^{\circ}\text{C}$)</p>

A retenir : Pour les huiles minérales on a $\alpha = 0,7.10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

1E. Pertes de charge**1E1. Introduction**

Dès qu'il y a une chute de pression Δp entre la sortie et l'entrée d'un système, on dit qu'il y a une perte de charge.



L'équation de Bernoulli s'écrit donc pour une canalisation correspondant au schéma précédent :

$$\frac{(p_S - p_E)}{\rho} + \frac{(c_S^2 - c_E^2)}{2} + g \cdot (z_S - z_E) = J_{SE} \quad \text{avec}$$

p : pression (Pa)
 c : vitesse d'écoulement (m/s)
 ρ : masse volumique (kg/m³)
 z : cote (m)
 g : accélération de la pesanteur (m/s²)

J_{SE} est l'énergie correspondant aux pertes de charge (≤ 0) en J/kg.

Dans le cas d'une conduite hydraulique, la variation de cote (z) est négligeable ainsi que la variation d'énergie cinétique ($c_S^2 - c_E^2$). On obtient alors :

$$\Delta p = (p_E - p_S) = -\rho \cdot J_{SE}$$

Il existe 2 types de pertes de charges :

- Les systématiques ;
 - En régime laminaire ;
 - En régime turbulent lisse ;
 - En régime turbulent rugueux.
- Les singulières.

On retrouve les pertes de charges systématiques dans les canalisations simples et les pertes de charges singulières pour toutes les anomalies dans les circuits (étranglements, coude,...).

1E2. Pertes de charge systématiques en régime laminaire

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{\rho \cdot \ell \cdot c^2}{2d}$$

avec $\lambda = \frac{64}{R_e}$ et $R_e = \frac{c \cdot d}{\nu}$

ℓ : longueur de la conduite (m)
 c : vitesse d'écoulement (m/s)
 ρ : masse volumique (kg/m³)
 d : diamètre intérieur de l'écoulement (m)
 ν : viscosité cinématique (m²/s)

A noter : La température influence la viscosité, elle influence donc aussi les pertes de charges.

1E3. Pertes de charge systématiques en régime turbulent lisse

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{\rho \cdot \ell \cdot c^2}{2d}$$

avec $\lambda = 0,316 \cdot R_e^{-0,25}$ et $R_e = \frac{c \cdot d}{\nu}$

1E4. Pertes de charge systématiques en régime turbulent rugueux

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{\rho \cdot \ell \cdot c^2}{2d}$$

avec $\lambda = 0,79 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{d}}$

ε : hauteur moyenne des aspérités (mm)

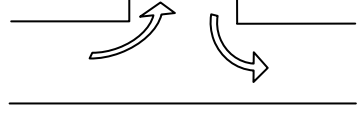
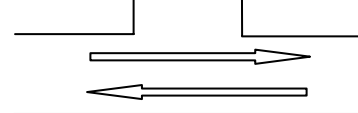



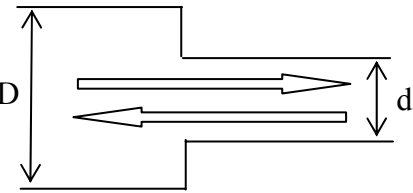
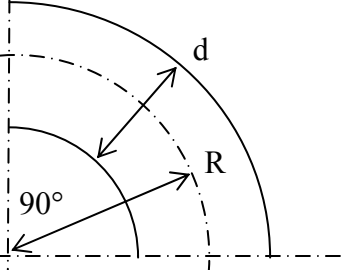
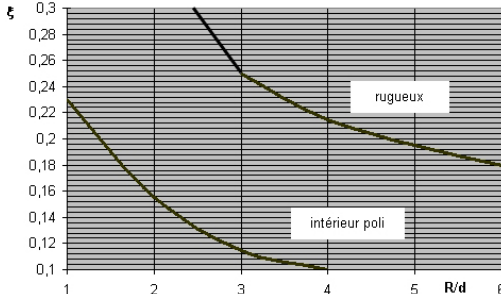
En pratique pour les tubes en acier soudés $\varepsilon \in [0,15 ; 0,25]$

A noter : Pour atteindre le régime turbulent rugueux, il faut des vitesses d'écoulement très rapides donc inutilisées en transmission de puissance hydrostatique.

1E5. Pertes de charge singulières

$$\Delta p = \xi \frac{\rho \cdot c^2}{2}$$

avec ξ (X_i) une constante fonction de la singularité.

	Configuration	Valeur de la constante ξ		
Forme en "T"		1,2		
		0,1		
Forme en "Y"		0,5		
		2,5 à 3		
		0,06 ←	0,15 →	
Rétrécissement : sens de l'écoulement → Elargissement : sens de l'écoulement ←		d/D	$\xi \rightarrow$	$\xi \leftarrow$
		0,1	0,4	0,81
		0,2	0,38	0,64
		0,4	0,3	0,36
		0,6	0,18	0,16
		0,8	0,05	0,04
		0,9	0,015	0,01
Coude				
Rétrécissement	