Mesure de débit

Cours #7 – Été 2011

Capteurs de débit

- Le choix d'un capteur de débit repose sur 3 critères:
  - Nature du fluide transporté (liquide ou gaz);
  - Type de signal de mesure;
    - Analogique, numérique ou logique.
  - La grandeur directement mesurée:
    - Vitesse, masse ou volume.

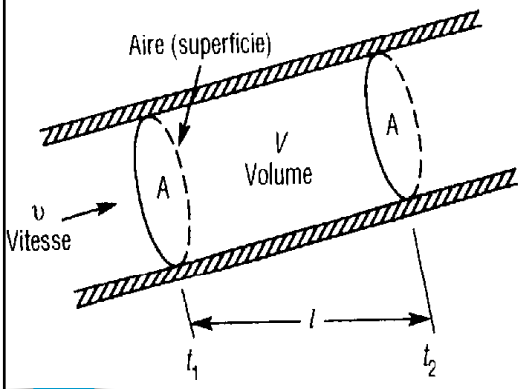
Capteurs de débit (2)

- Mécanique:
  - Sortie analogique:
    - Flotteur rotatif (Rotamètre)
  - Sortie numérique:
    - Compteur volumétrique
    - Compteur de vitesse à turbine
  - Sortie logique:
    - Contrôleur de circulation

Capteurs de débit (3)

- Statique (sortie analogique seulement)
  - Organe déprimogène
  - Sonde (tube de Pitot)
  - Électromagnétique (Magflow)
  - Ultrasonique
  - Effet vortex
  - Fil chaud
  - Massique thermique

Mesure des débits



- Débit volumique:
  - $Q = v \cdot A$
  - Unités: m^3/s, m^3/d, GPM.
- Débit massique:
  - $Qm = \rho \cdot v \cdot A$
  - Unités: kg/s, lb/s,...

Dynamique des fluides

- Il existe deux classes de fluide:
  - Le fluide parfait:
    - Fluide n'offrant pas de résistance à l'écoulement, i.e., ayant une viscosité nulle.
    - Hypothèse de Bernouilli.
  - Le fluide réel:
    - Fluide visqueux présentant une résistance à l'écoulement.

La viscosité

- S'exprime en poises ou en Pa·s.
  - 1 Poise = 0.1 Pa·s.

- Exemples de viscosité (à 20 °C):

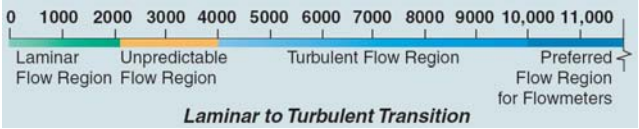
  Eau: 1.005 cPo; Huile de ricin: 6.27 cPo;
  Acétone: 0.323 cPo; Acide sulfurique: 27 cPo;
  Mercure: 1.550 cPo; Benzène: 0.651 cPo.

Caractéristiques (à 70°F)

	Specific Gravity, SG	Absolute Viscosity Centipoise	Kinematic Viscosity, Centistokes
Water	1.0	0.98	0.97
Gasoline	0.71	0.48	0.67
Ethylene Glycol	1.1	20	18
SAE 30 Motor Oil	0.91	96 (100°F)	106 (100°F)
No. 6 Fuel Oil	0.88	850 (68°F) 335 (122°F)	966 (68°F) 379 (122°F)
95% Sulfuric Acid	1.84	26.6	14.5
25% Sodium Chloride	1.2	2.9	2.4
Acetic Acid	1.05	1.2	1.15
Glycerin	1.3	1000	770
Acetone	0.79	0.33	0.42
n-Propyl Alcohol	0.80	2.2	2.75
Corn Oil	0.93	26.5 (130°F)	28.7 (130°F)
Molasses	1.43	430 to 7000 (100°F)	300 to 5000 (100°F)
Freon	1.33	0.20	0.15

Nombre de Reynolds

- Permet de connaître le comportement de l'écoulement d'un liquide.



- Sans dimension et se calcule comme suit:

$$R_e = \frac{v \rho D}{\mu}$$

Nombre de Reynolds (métrique)

$$R_e = \frac{v \rho D}{\mu}$$

- v = Vitesse du liquide du liquide (m/s)
- ρ = Masse volumique (kg/m^3)
- D = Diamètre interne du conduit (m)
- μ = viscosité du liquide (en Pa.s)

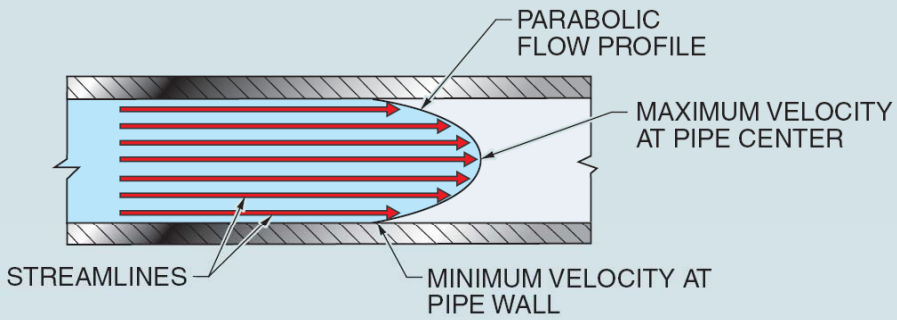
Nombre de Reynolds (impérial)

$$R_e = \frac{3160 \cdot QG_t}{D\mu}$$

- Q = Débit du liquide (en GPM - U.S.)
- G_t = Poids spécifique du liquide (Densité)
- D = Diamètre interne du conduit (pouces)
- μ = viscosité du liquide (en centipoises)

ÉCOULEMENT LAMINAIRE

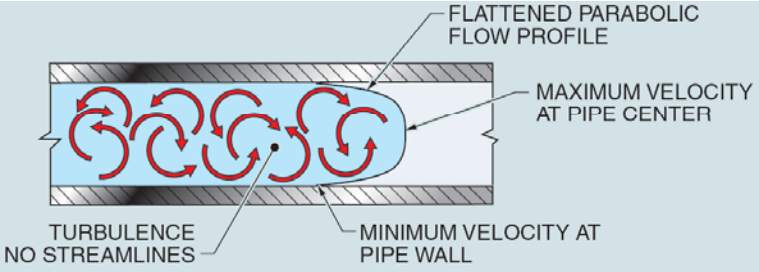
- Si R_e < 2100.
- Les filets de liquides sont rectilignes.



Laminar Flow
Reynolds Number Less than 2100

ÉCOULEMENT TURBULENT

- Si R_e > 4000.
- Déplacement du liquide en tourbillonnant
- + R_e est grand, + le fluide est parfait.



Turbulent Flow
Reynolds Number Greater than 4000

13

EXEMPLES de calculs

- EAU (ρ = 1000 kg/m^3, μ = 10^{-3} Pa·s)
  - Vitesse de 0.01 m/s et conduite de 0.1 m:

$$R_e = \frac{v\rho D}{\mu} = \frac{0.01 \times 10^3 \times 0.1}{10^{-3}} = 1000$$

  - Vitesse de 0.1 m/s et conduite de 0.1 m:

$$R_e = \frac{v\rho D}{\mu} = \frac{0.1 \times 10^3 \times 0.1}{10^{-3}} = 10000$$

Les pertes de charge

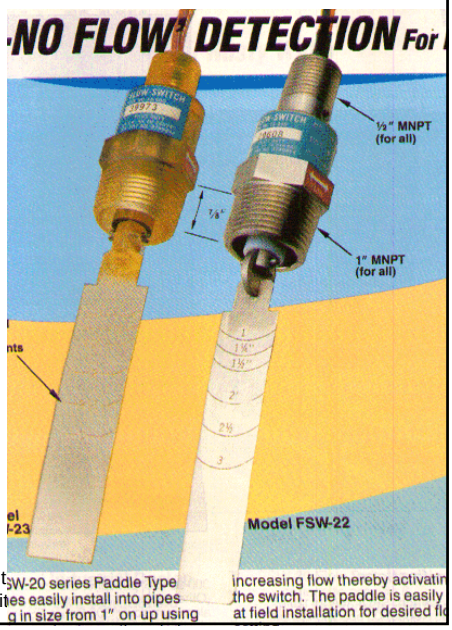
- Les frottements du fluide sur les parois entraîne une perte de charge.
  - Exemple: un tuyau de 100 pieds provoque une perte de charge de 28.8 psi pour un débit d'eau (à 60 °F) de 200 GPM (U.S.)
- Ce frottement dépend de la viscosité du liquide.

Les pertes de charge (2)

- La perte de charge se traduit par une différence de pression entre deux points de la conduite.
  - Perte d'énergie
- La mesure du débit peut affecter le débit du liquide en créant une perte de charge. Il faut éviter cela...

Contrôleur de circulation

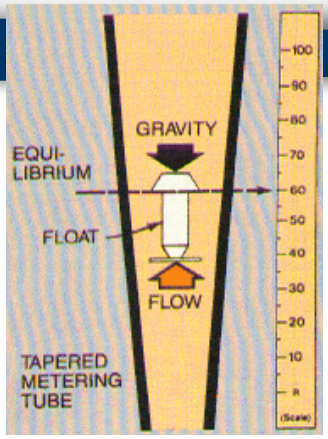
- Système binaire vérifiant si l'écoulement de liquide à lieu.

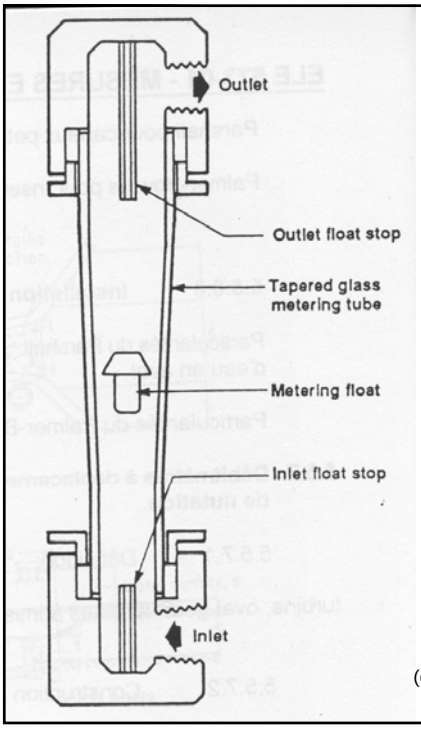


Caractéristiques

- Commutation off-on, si débit au dessus du seuil haut (ex. 10 pi/sec).
- Commutation on-off , si débit sous le seuil bas (ex. 5 pi/sec).
- Perte de pression très faible (1 psi)

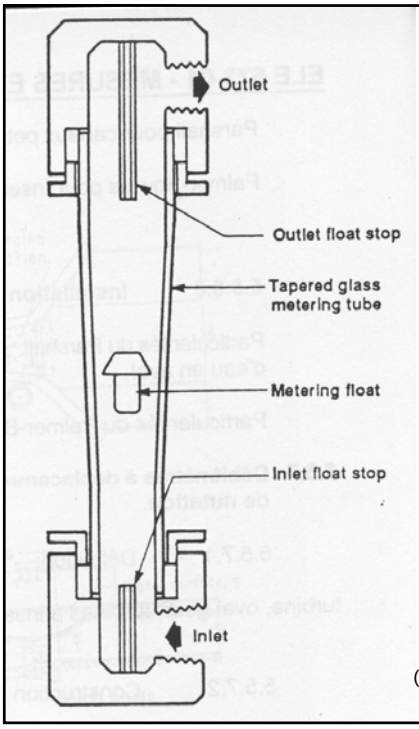
Débitmètre à flotteur rotatif (Rotamètre)





Principe

- Le rotamètre est équipé d'un flotteur qui reste au fond du tube si le débit est nul.



Principe

- En présence d'un débit, le flotteur subit une force le soulevant, jusqu'à ce que l'espace entre le flotteur et le tube permette à suffisamment de liquide de contourner le flotteur.

Principe

- Donc il y a équilibre entre le poids apparent du flotteur et la force hydraulique subie par le flotteur;
- Le débit est obtenu par:

$$Q = K_1 A \sqrt{2g \frac{V_f}{A_f} \left(\frac{\rho_f}{\rho} - 1 \right)}$$

Définition des variables

- A_f : Aire - section maximale du flotteur;
- V_f : Volume du flotteur;
- ρ_f : Densité du flotteur;
- ρ : Densité du fluide;
- g : 9.81 m/s^2
- A : Aire de passage du liquide autour du flotteur;
- K_1 : Constante.

Bilan

- Mesure des débits de liquides et de gaz;
- É.M. de 0.3 à 300 000 L/h (gaz);
- É.M. de 0.1 à 25 000 L/h (liquide);
- Mesure de fluides pâteux et corrosifs;

Bilan

- Sensible aux variations de masse;
- Impossible de mesurer des débits pulsés;
- Échelle de mesure fonction du fluide;
- Rangeabilité de 10:1;

Bilan

- Longueur de conduite rectiligne en amont: 5D.

Model MT3809

Compteurs volumétriques

Source de l'image: Usine Nouvelle

Compteurs volumétriques

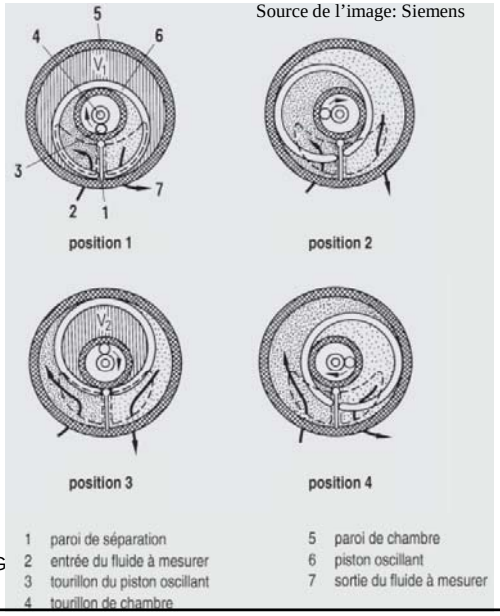
- Plusieurs techniques possibles:
  - Compteurs à piston rotatif;
  - Compteurs à disque oscillant;
  - Compteurs à double roue ovale;
  - Compteurs à double roue en huit;
  - Compteurs à palettes;
  - Compteurs à piston alternatif.

Compteurs à piston rotatif

- Débit max.:
  - 40 m^3/h

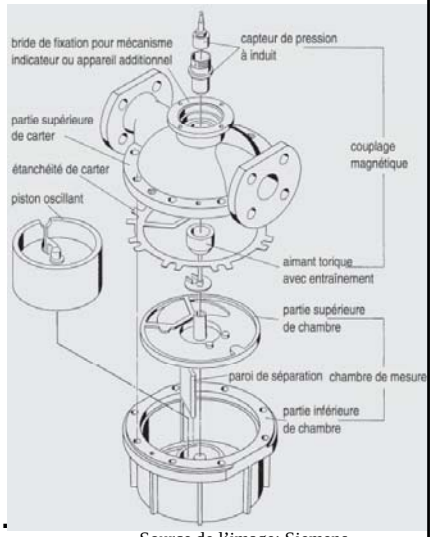
Source de l'image: Lokistagnepas

Source de l'image: Siemens



Compteurs à piston rotatif

- Bilan:
  - Rangeabilité de 20:1;
  - Fidélité de ±0.001 %;
  - Précision de ±0.1 %;
  - Non recommandé si matières en suspension, ni si matières abrasives.

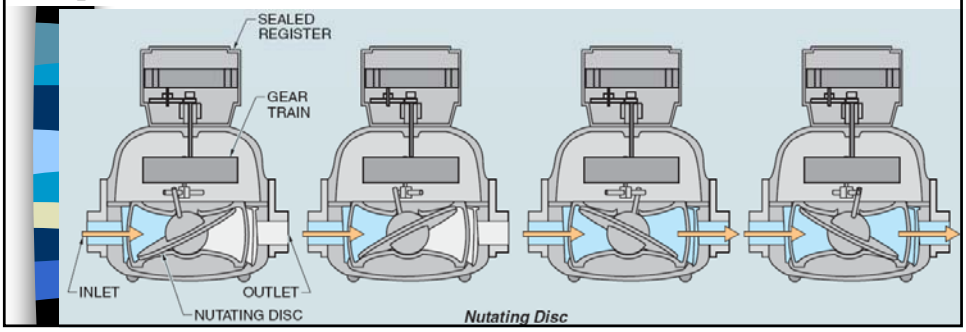


Source de l'image: Siemens

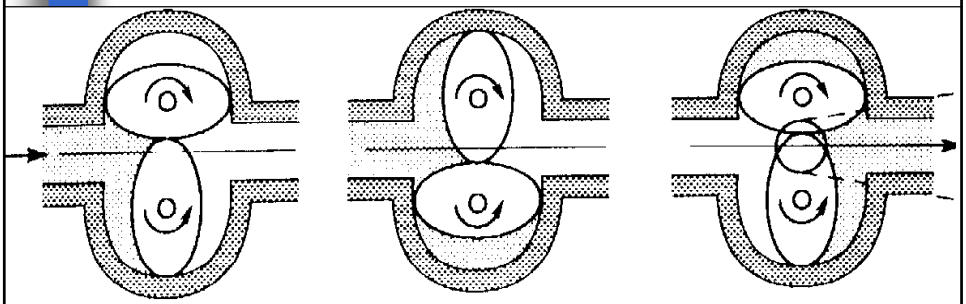
Compteurs à disque oscillant

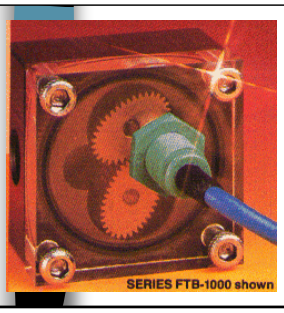
- Débit max.: 40 m^3/h;
- Précision: +/- 0.5 %;
- Rangeabitité de 10:1

Utilisé comme compteur d'eau



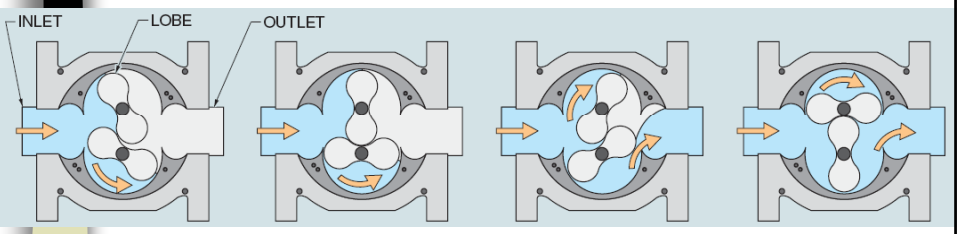
Compteurs à double roue ovale





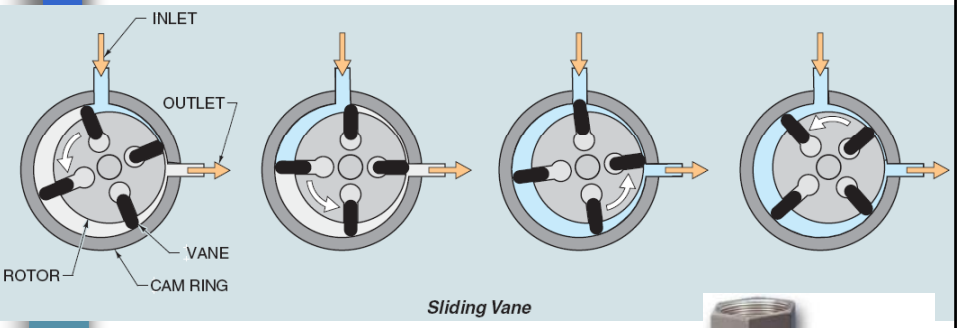
- Débit max.: 1600 m^3/h;
- Précision: +/- 0.2 à 0.5 %;
- Grande perte de charge;
- Rangeabilité de 10:1 à 25:1;

Compteurs à double roue en huit



- Débit max.:
  - 1500 m^3/h;
- Rangeabilité
  - 10:1.

Compteurs à palettes



Sliding Vane

- Précision: +/- 0.3 %

Compteurs volumétriques

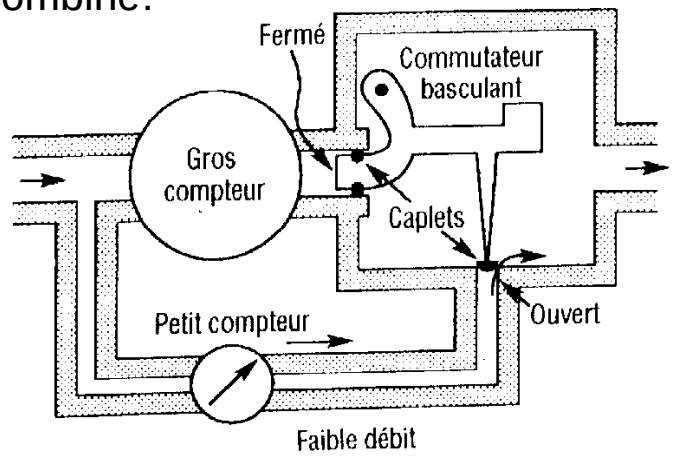
- Bilan:
  - Généralement montés sur des conduites horizontales;
  - Aucunes contraintes de conduites rectilignes;
  - Éviter les particules solides > 100 microns;

Compteurs volumétriques

- Bilan:
  - Le signal de sortie est une oscillation dont la fréquence est proportionnelle au débit;
  - Rangeabilité de 10:1 à 25:1 selon modèle.

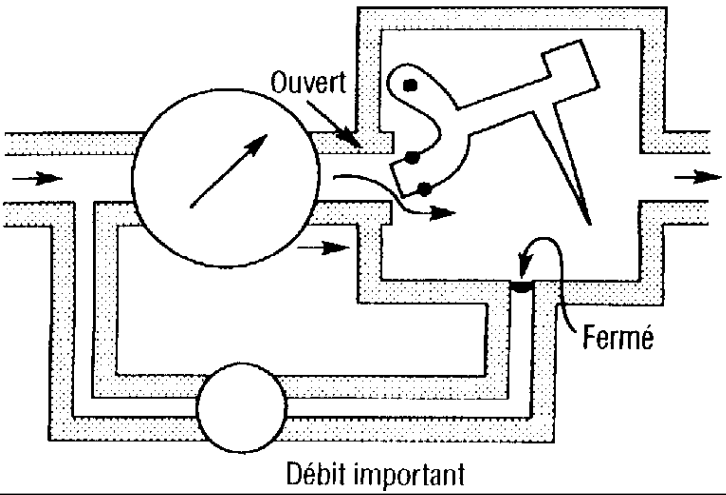
Compteurs volumétriques

- Si l'étendue de mesure dépasse la rangeabilité, utiliser un compteur combiné:

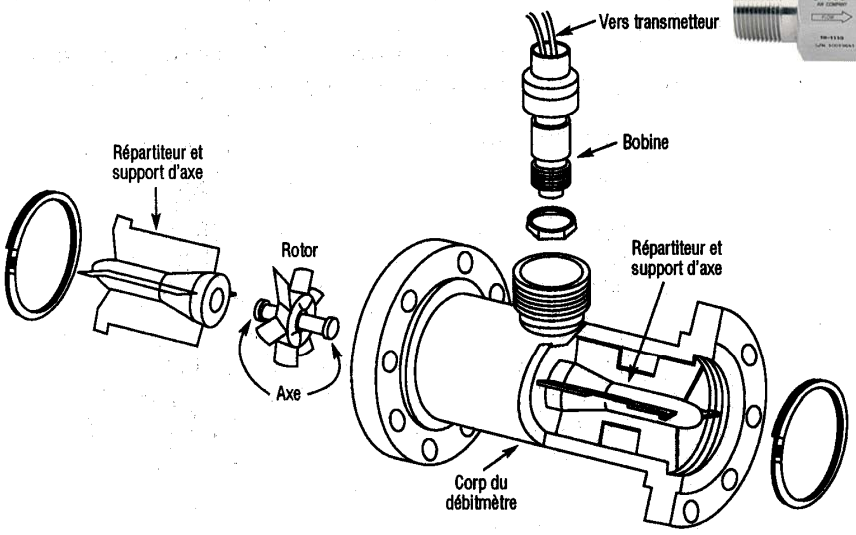


Compteurs volumétriques

- Somme des lectures = débit total:

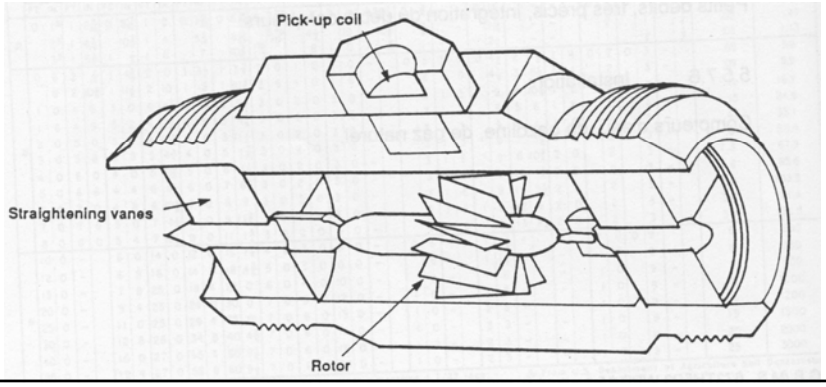


Les débitmètres à turbine



Principe

- Le passage du liquide entraîne une rotation de la turbine, et la vitesse de rotation dépend de la vitesse d'écoulement.



Bilan

- É.M. de 25 L/h à 10 000 m^3/h;
- Mesure dans conduits de 5 à 600 mm;
- Précision de ± 0.1 %;
- Perte de charge non-nulle (≈ 15 kPa);

Bilan

- Problèmes si les liquides sont corrosifs ou chargés de matières en suspension;
- Rangeabilité de 10:1 à 100:1;
- Conduite rectiligne:
  - amont 10D, aval 5D.

Mesure de débit par organe déprimogène

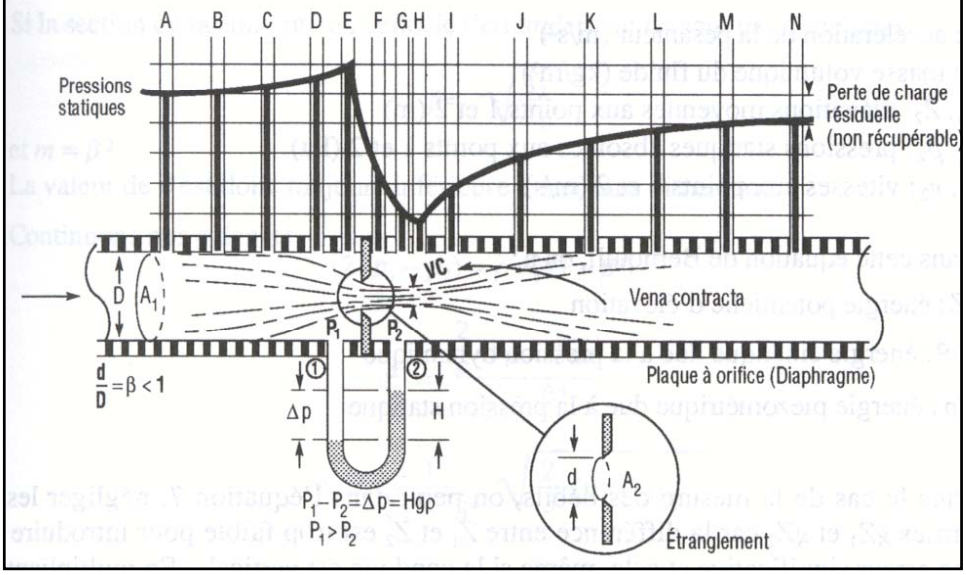
- L'une des technique les plus utilisées.
- Repose sur le théorème de Bernouilli:
  - Le long d'un écoulement de fluide parfait (viscosité nulle), la pression ou charge totale est constante.

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

Définition des variables

- ρ : densité du fluide
- v : vitesse moyenne d'écoulement
- g : 9.81 m/s^2
- z : élévation moyenne
- p : pression statique

Organes déprimogènes (fig 5.10)



Organes déprimogènes

- 1) Principe de conservation de masse :

$$Q_m = \rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2$$

- 2) Théorème de Bernouilli :

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

Définition des variables

- ρ : densité du fluide
- v_1, v_2 : vitesses moyennes d'écoulement
- g : 9.81 m/s^2
- z_1, z_2 : élévations moyennes
- p_1, p_2 : pressions statiques
- A_1, A_2 : sections des conduites

Organes déprimogènes

- Les termes d'élévation sont négligeables.
- Il se produit un changement de pression statique:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}\left(v_2^2 - v_1^2\right)$$

$$= \frac{\rho}{2}\left(v_2^2 - v_2^2\left[\frac{A_2}{A_1}\right]^2\right) = \boxed{\frac{\rho}{2} v_2^2\left(1 - \beta^4\right)}$$

Organes déprimogènes

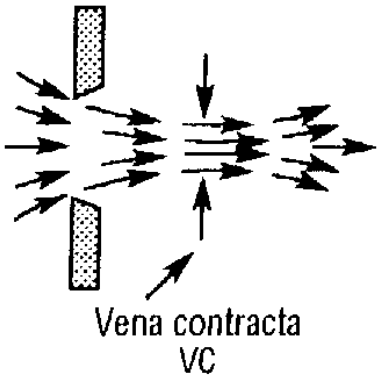
- Donc la vitesse du liquide (débit) est:

$$Q = v_2 A_2 = A_2 E \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

$$E = \left(1 - \beta^4\right)^{-0.5}$$

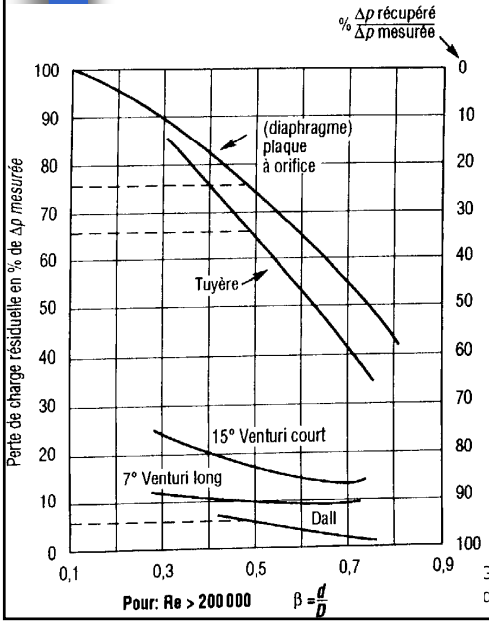
- La mesure est non-linéaire…

Coefficient de contraction - C_c



- $C_c < 1$
- Dépend:
  - du nombre de Reynolds
  - de β
  - du type et de l'emplacement des prises de pression
  - du capteur de pression

Coefficient de vitesse - C_v



- Cv < 1 (perte de charge)
- Dépend:
  - du nombre de Reynolds
  - de β
  - de la rugosité de la conduite
  - du capteur de pression

Coefficient de décharge C

- Égal au produit C_c x C_v
- Varie de 0.6 (plaque à orifice) à 0.99 (Venturi)
- Nouvelle formule pour le débit:

$$Q = CA_2E\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p} = \alpha A_2\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}$$

Coefficient de débit

Équation utilisée en pratique

$$Q = \alpha \beta^2 A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

Table des facteurs de calibrage

Table

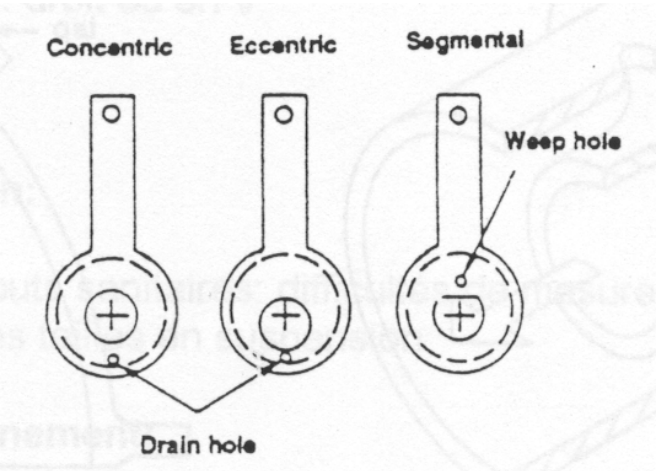
Tableau 6.3 Facteurs de calibrage $\alpha \beta^2$ pour la détermination de β

β d/D	PLAQUES À ORIFICE 1	PLAQUES À ORIFICE 2	TUYÈRES ET VENTURIS	TUBES FAIBLE PERTE	DALL	PLAQUES À ORIFICE 3
0,100	0,005990	0,006100				
0,125	0,009364	0,009591				
0,150	0,01349	0,01389				
0,175	0,01839	0,01902				
0,200	0,02402	0,02499				0,0305
0,225	0,03044	0,03183				0,0390
0,250	0,03760	0,03957				0,0484
0,275	0,04558	0,04826				0,0587
0,300	0,05432	0,05796	0,08858			0,0700
0,325	0,06390	0,06874	0,1041			0,0824
0,350	0,07429	0,08068	0,1210	0,1048		0,0959
0,375	0,08559	0,09390	0,1392	0,1198		0,1106
0,400	0,09776	0,1085	0,1588	0,1356	0,1170	0,1267
0,425	0,1109	0,1247	0,1800	0,1527	0,1335	0,1443
0,450	0,1251	0,1426	0,2026	0,1705	0,1500	0,1635
0,475	0,1404	0,1625	0,2270	0,1900	0,1665	0,1844
0,500	0,1568	0,1845	0,2530	0,2098	0,1830	0,207
0,525	0,1745	0,2090	0,2810	0,2312	0,2044	0,232
0.550	0,1937	0,2362	0,3110	0,2539	0,2258	0,260
0,575	0,2144	0,2664	0,3433	0,2783	0,2472	0,292
0,600	0,2369	0,3002	0,3781	0,3041	0,2685	0,326
0,625	0,2614	0,3377	0,4159	0,3318	0,2956	0,364
0,650	0,2879	0,3796	0,4568	0,3617	0,3228	
0,675	0,3171	0,4262	0,5016	0,3939	0,3499	
0,700	0,3488	0,4782	0,5509	0,4289	0,3770	
0,725	0,3838		0,6054	0,4846	0,4100	
0,750	0,4222		0,6667	0,5111	0,4430	
0,775	0,4646			0,5598	0,4840	
0,800	0,5113			0,6153	0,5250	
0,820				0,6666	0,5635	

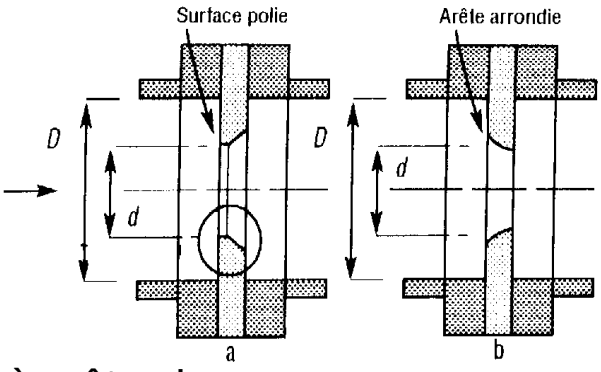
1. À arête vive; prises dans les coins des brides.
2. Prises 2,5/8 D.
3. Autres

Plaques à orifices

- Plaque comportant un trou dans lequel le liquide est forcé de passer.

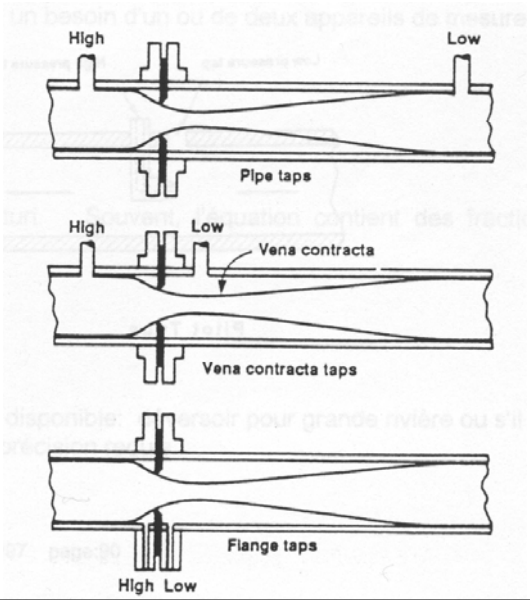


Types de plaques



- à arête vive;
- à arête arrondie.
  - Moins sensible aux variations de viscosité.

Types de prises



Types de prises

- dans les brides
  - 1 po - 1 po;
  - 0 po - 0 po;
  - anneau piézométrique.

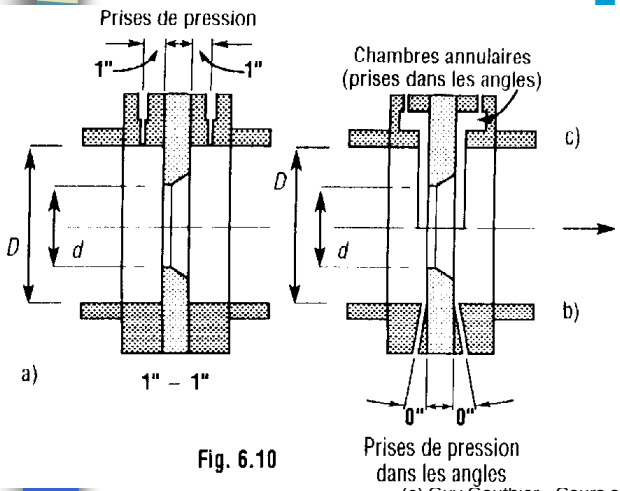
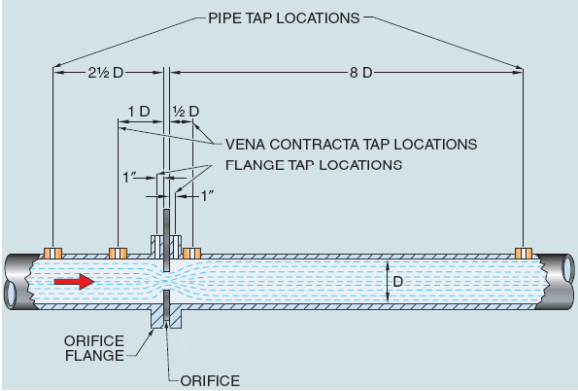


Fig. 6.10

Types de prises

- Piquées sur la conduite.
  - D-0.5D
  - 2.5D-8D.



Bilan

- Perte de charge de 40 à 70 %;
- Pas de limite de diamètre;
- Fluides sans matières en suspension;
- Précision jusqu'à ± 0.2 %;

Bilan

- Très reproductibles et fidèles;
- Assemblage fort simple;
- Valeurs recommandées pour β:
  - de 0.2 à 0.7.

Bilan

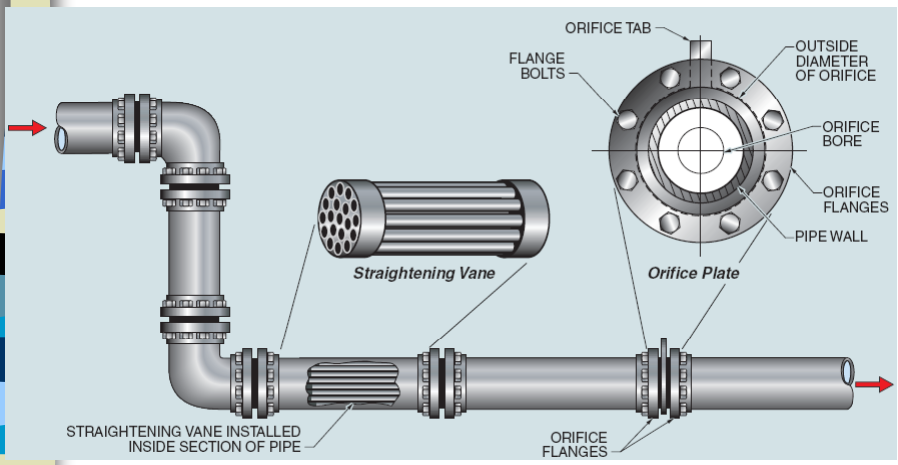
- Exigent R_e > 10 000

	R_e minimal	R_e maximal
$D < 100$ mm		
- $\beta < 0{,}5$	10 000 à 15 000	10^6
- $\beta > 0{,}5$	20 000 à 45 000	10^6
$D > 100$ mm	> 45 000	10^7

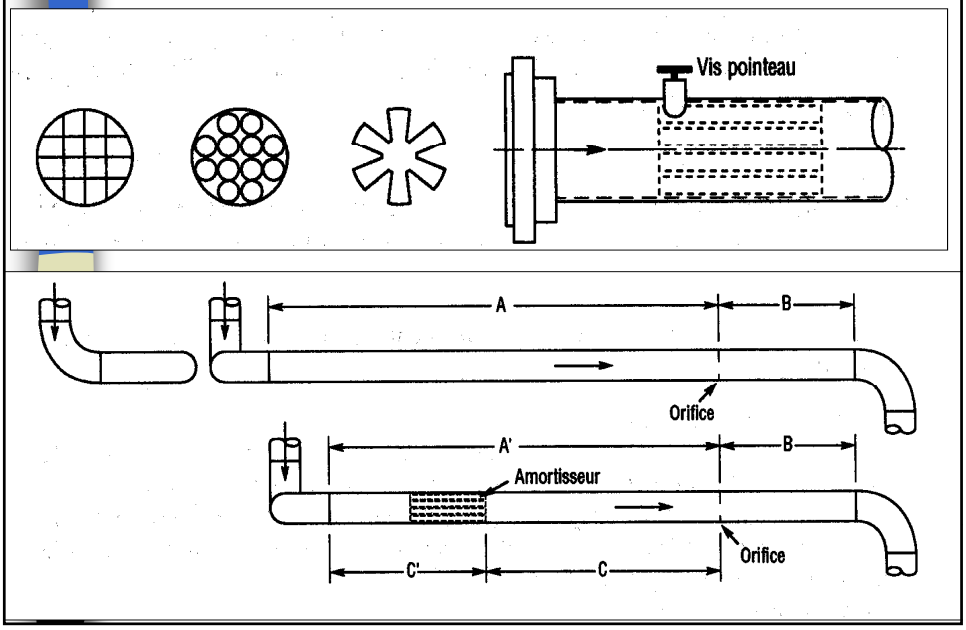
Bilan

- Conduites rectilignes amont-aval très longues.
  - De 20D à 50D en amont
  - 10 D en aval.
  - L'utilisation d'un amortisseur de turbulences peut permettre de réduire la distance.

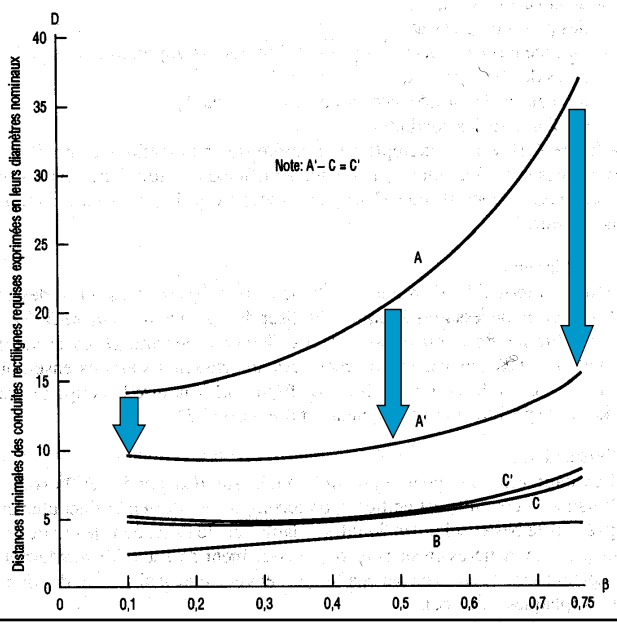
Amortisseurs de turbulence



Amortisseurs de turbulence



Amortisseurs de turbulence



Exemple: organes déprimogènes

- Conduite de 0.3 m de diamètre.
- Plaque orifice à arrêtes vives
  - β de 0.4 (donc un $\alpha\beta^2$ de 0.09776)
  - Débit d'eau à une vitesse provoquant une pression différentielle de 2.5 m d'eau.
- Trouvez la vitesse de l'eau dans le conduit.

Exemple: organes déprimogènes

$$Q = \alpha\beta^2 A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p} = \alpha\beta^2 A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}\rho_1 g h}$$

$$Q = 0.09776 \times \frac{\pi \times (0.3m)^2}{4} \sqrt{\frac{2}{1000\,{}^{kg}/_{m^3}}} 1000\,{}^{kg}/_{m^3} \times 9.81\,{}^{m}/_{s^2} \times 2.5m$$

Exemple: organes déprimogènes

- Calcul de la vitesse d'écoulement :

$$Q = 0.0484\ {}^{m^3}\!/_{s}$$

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{0.0484\ {}^{m^3}\!/_{s}}{\left(\frac{\pi (0.3m)^2}{4}\right)} = 0.685\ {}^{m}\!/_{s}$$

Exemple: organes déprimogènes

- Calcul du nombre de Reynolds:

$$R_e = \frac{v_1 \rho D}{\mu} = \frac{0.685\ {}^{m}\!/_{s} \times 1000\ {}^{kg}\!/_{m^3} \times 0.3m}{10^{-3}\ Pa \cdot s}$$

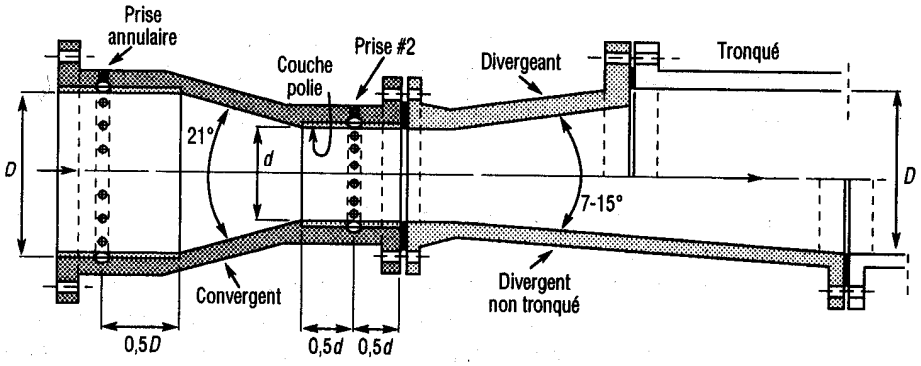
$$= 204900$$

Fin de l ’exemple:

- La longueur de conduite rectiligne en amont devrait être entre 20D à 50D:
  - Longueur rectiligne de 6 à 15 mètres;
- La longueur de conduite rectiligne en aval devrait être d ’environ 10D:
  - Longueur rectiligne de 3 mètres;

Les Venturis

- Obstacle dont le diamètre diminue progressivement jusqu'à un minimum, avant de réaugmenter progressivement.



Bilan

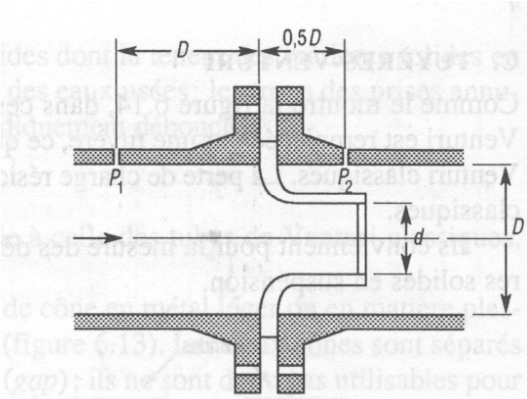
- Perte de charge de 10 à 14 %;
- Utilisées dans des conduites de 25 à 3000 mm;
- Fluides avec matières en suspension;
- Longueurs rectilignes moins élevées;

Bilan

- Précision jusqu'à ± 0.5 %;
- Encombrants et coûteux;
- Exigent R_e > 150 000.

Les tuyères

- Obstacle dont le diamètre diminue progressivement jusqu'à un minimum.
  - Prises de pression à D et 0.5 D.



Bilan

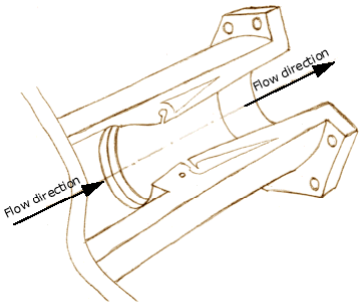
- Perte de charge de 5 %;
- Utilisées dans des conduites de 25 à 1500 mm;
- Fluides avec matières en suspension;
- Gaz et vapeurs;

Bilan

- Précision jusqu'à ± 0.7 %;
- Exigent R_e > 50 000.

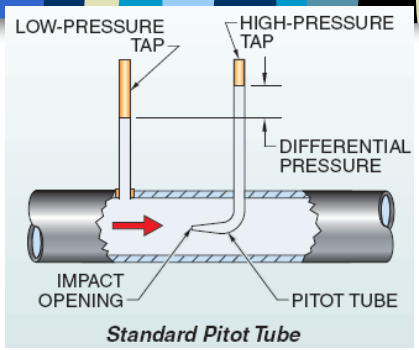
Tube de Dall

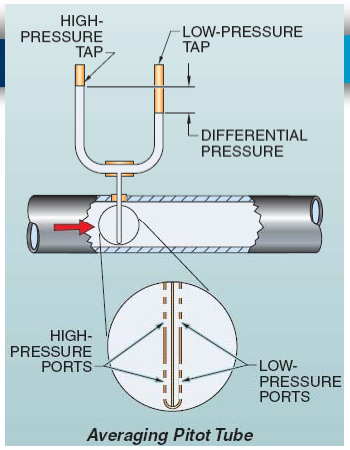
- Combine la plaque orifice et le venturi.
- Utilisé pour de grosses canalisations.



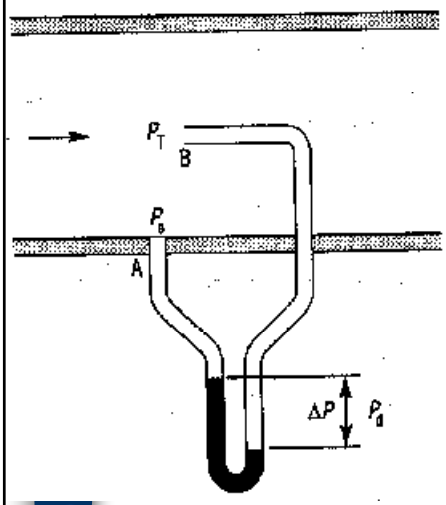
Le débitmètre à sonde (Tube de Pitot)

Source:
http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Pitot_tube_wings.jpg





Principe



- Repose sur l'équation de Bernouilli:
  - B subit la pression totale du liquide en mouvement.
  - A subit la pression statique.
  - Conçu en 1732 par Henri Pitot

Principe

$$p_t = p_d + p_s$$

$$\Delta p = p_t - p_s = p_d = \frac{\rho v^2}{2}$$

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}$$

Bilan

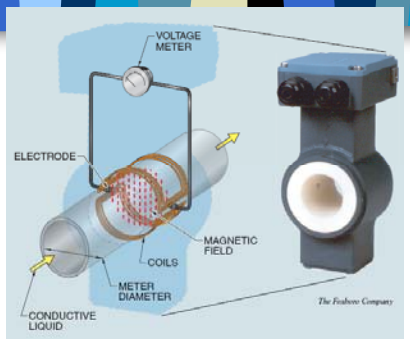
- Mesure de débits liquides et de gaz;
- Précision jusqu'à ± 0.5 %;
- Coût peu élevé (surtout pour les gros conduits)
- Ne convient pas aux fluides visqueux;

Bilan

- Ne convient pas aux liquides ayant des particules en suspension;
- Conduite linéaire sur 10D en amont et 5D en aval.

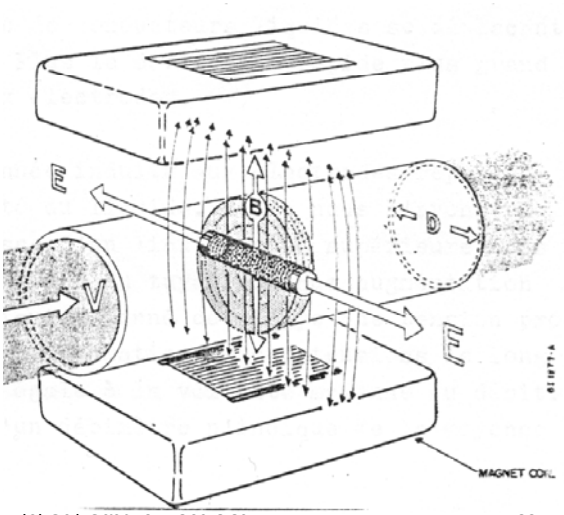
http://www.youtube.com/watch?v=f949gpKdCI4

Le débitmètre électromagnétique



Principe

- Basé sur la loi de Faraday:
  - FEM = k B D v
  - v = m/s
  - D = mètres
  - B = teslas
  - k = 1 (métrique)
  - FEM = Volts



Le débitmètre électromagnétique

- Tension générée:
  - 12 mV à 3 l/s (25 mm);
  - 7 mV à 0.5 m^3/s (300 mm).
- Installation:
  - position horizontale, verticale ou oblique;
  - si verticale, débit du bas vers le haut;
  - si horizontale, électrodes dans plan horizontal;
  - pas de longeur de conduite rectiligne exigé.

Bilan

- Mesure en régime laminaire ou en régime turbulent;
- Échelle très linéaire;
- Diamètre de conduit de 3 à 3000 mm;
- Perte de charge nulle;

Bilan

- Précision de l'ordre de ± 1 %;
- Rangeabilité de 20:1;
- Exige un liquide conducteur;
- Vitesse d'écoulement > 1 m/sec.

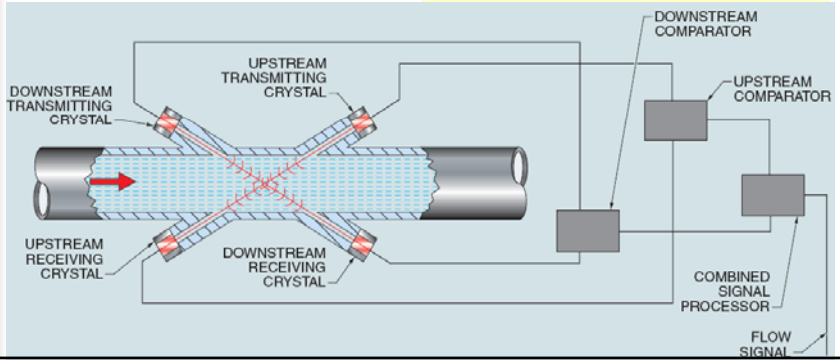
Les débitmètres à ultrasons

- Deux techniques:
  - à temps de parcourt:
    - Pour les liquides propres;
  - à effet Doppler:
    - Pour les liquides ayant des bulles ou des particules en suspension.

Principe du débitmètre à temps de parcours

- Vitesse d'écoulement:

$$v \cong \Delta t \frac{c^2}{2l\cos\theta}$$



Bilan
(débitmètre à temps de parcours)

- Échelle linéaire et réponse instantanée;
- Rangeabilité élevée 20:1 ou plus;
- Débits de 0.03 à 30 m/s;
- Précision de l'ordre de ± 1 %.
- Mesure dans des conduits de 3 à 5000 mm;

Bilan
(débitmètre à temps de parcours)

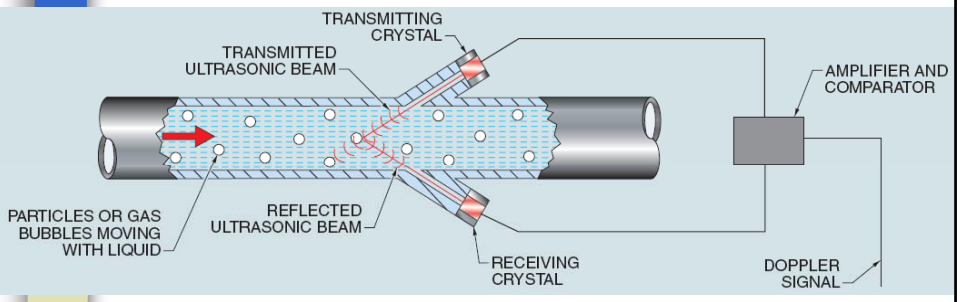
- Mesure dans les deux sens;
- Sensible à la température, la viscosité, la densité du liquide;
- Exige des conduites rectilignes sur 10D en amont et 5D en aval;
- Fréquence de la sonde de 7 Mhz;

Bilan
(débitmètre à temps de parcours)

- Impossible de mesurer le débit des gaz;
- Bulles d'air ou de gaz non tolérées;
- Pas de matières en suspension.

Principe du débitmètre à effet Doppler

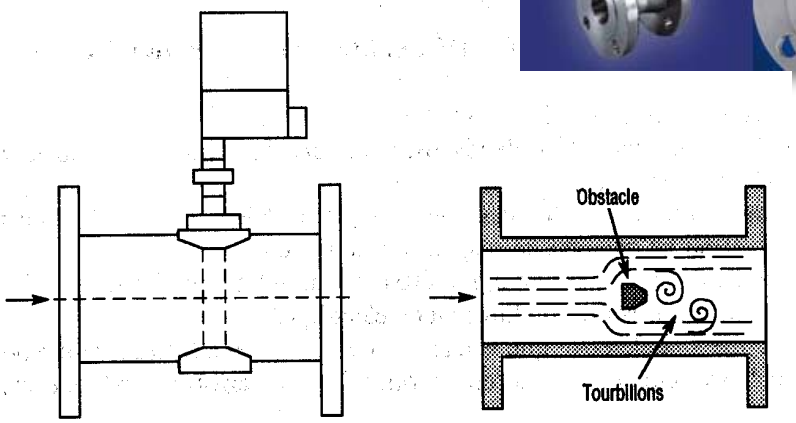
- Vitesse d'écoulement: $v = K\Delta f$



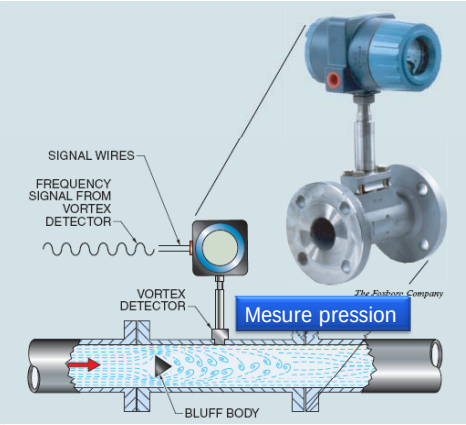
Bilan
(débitmètre à effet Doppler)

- Méthode destinée aux liquides contenant des bulles ou des matières en suspension (entre 2 et 60 % de matière solide).
- Imprécision de l'ordre de ± 3 %.

Débitmètres à vortex



Principe



- Un obstacle est placé dans un conduit, et il crée une turbulence.
- La série de vortex possède une vitesse de rotation rapide et provoque une dépression mesurable.

Principe

- La vitesse du liquide est proportionnelle à la fréquence d'apparition des vortex.

$$\text{Fréquence de détachement des tourbillons} = \frac{St \cdot v}{d}$$

St = Nombre de Strouhal
v = Vitesse d'écoulement
d = Largeur du corps perturbateur

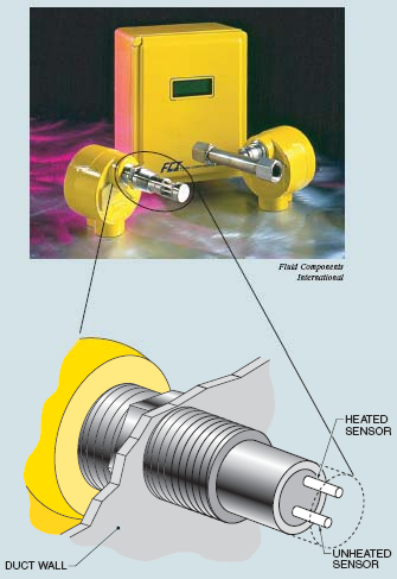
Bilan

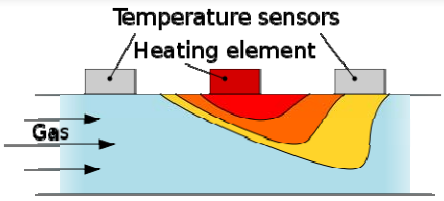
- Capteur simple et robuste;
- Précision de l'ordre de ± 0.5 %;
- Temps de réponse très rapide (millième de sec.)
- Utilisation dans des conduits de 5 à 60 cm;

Bilan

- Nombre de Reynold entre 10 000 à 300 000;
- Perte de charge élevée (30 kPa);
- Sensible à température, viscosité et pression;
- Doit avoir une conduite rectiligne de 10D en amont et 5D en aval;
- Rangeabilité de 30:1 ou plus.

Débitmètre-masse thermique

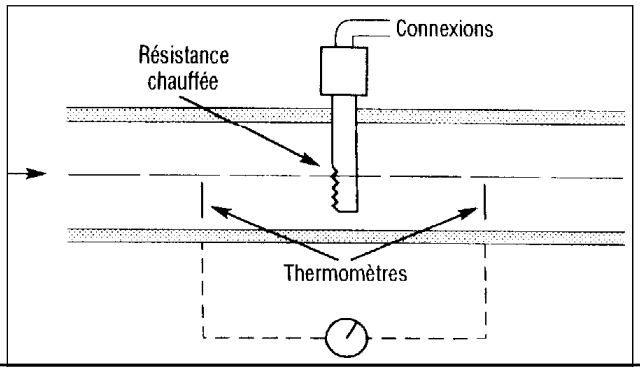




Source de l'image: Wikipédia

Principe

- Basé sur la définition de la chaleur thermique d'un liquide. (Quantité de chaleur pour élever de 1 °C l'unité de masse de ce fluide).

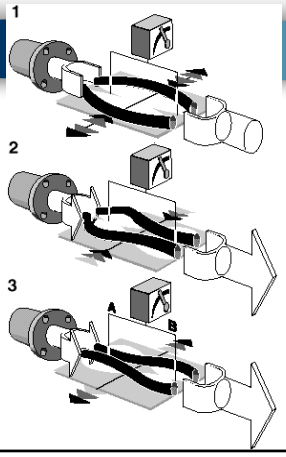


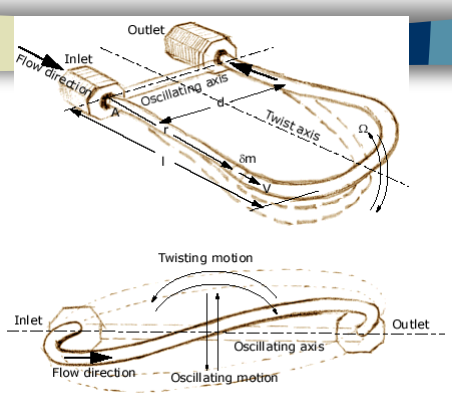
Bilan

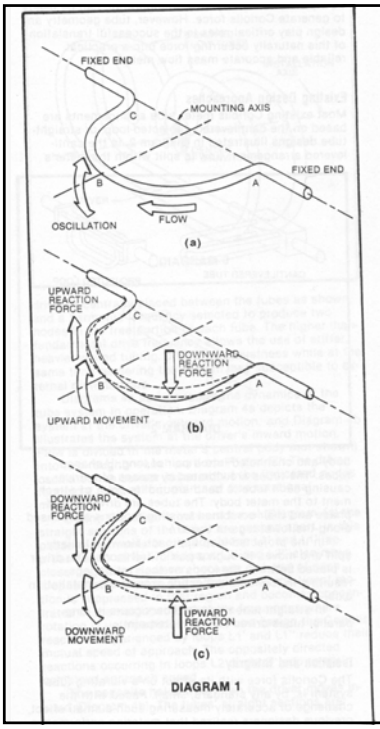
- Mesure de débit massique de liquides et de gaz;
- Précision de l'ordre de ± 1 % à ± 2 %;
- É.M. de 0.5 gr/m à 20 000 kg/h;
- Rangeabilité de 20:1.

http://www.youtube.com/watch?v=XIIViaNITIw&feature=related

Débitmètre-masse à effet Coriolis



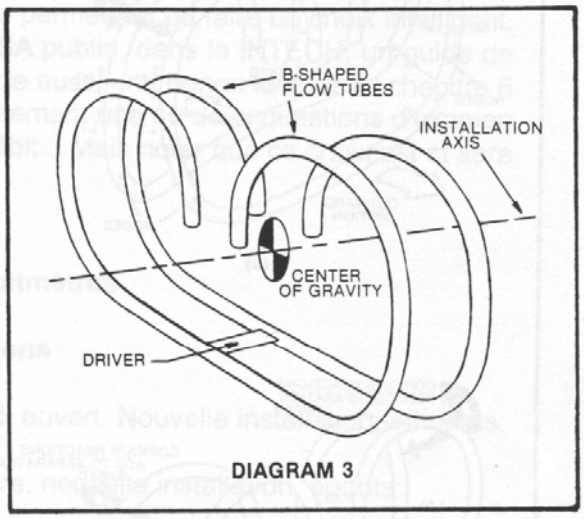




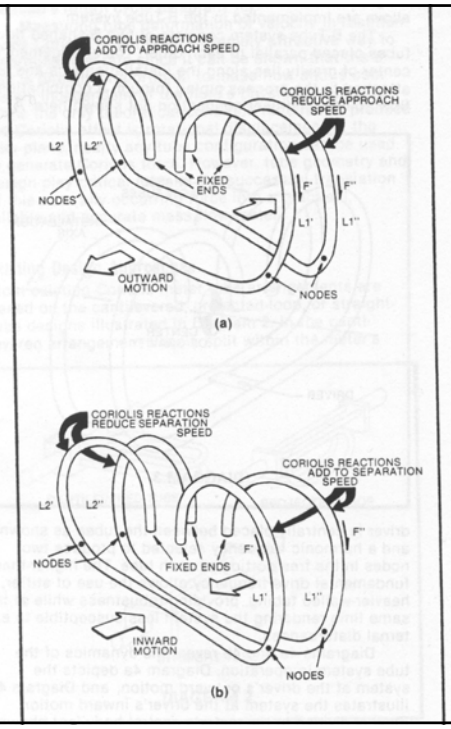
Principe

- Des forces de réaction apparaissent dans un tube vibrant traversé par un liquide en mouvement.
- La mesure de ces forces donne l'amplitude du débit massique,

Principe (tubes en B)



Principe (tubes en B)

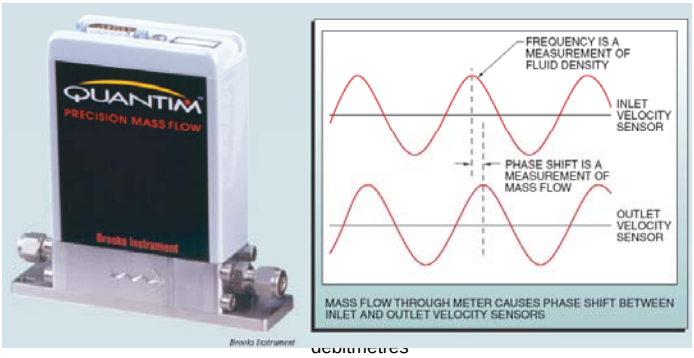


Principe

- Équation de la force de réaction:

$$F_C = 2 \cdot \Delta m \, (\omega \times v)$$

F_C = Coriolis force
Δm = mass of moving body
ω = angular velocity
v = radial velocity in a rotating or oscillating system

Bilan

- Rangeabilité 20:1
- Débit de 0.1 kg/m à 3000 kg/m