



R315 – Mesures de Débits

Licence Pro Rob&IA

Laurent ROY



Plan du cours

I. Notions Générales

II. Débitmètres volumiques

III. Débitmètres massiques

I-1 Débits massiques et volumiques

▫ Définitions : *ou débit volume*

Débit volumique *totalisé* : $Q = Q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ *instantané* : $Q = Q_v = \frac{dV}{dt}$

Unités possibles :

En m^3/s (USI) ou m^3/h

Pour les *liquides* également en L/h ou L/s → *N* : normaux ou normo (ok les deux) ; sera revu en fin de chapitre, avec débits des gaz

Pour les *gaz* : en Nm^3/s ou Nm^3/h sous $P_N = 1,013$ bar absolu (0 bar relatif) et $T_N = 0^\circ C = 273 K$ (CNPT) ; on note alors Q_N .

→ *ou débit masse*
 Débit massique *totalisé* : $Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}$ *instantané* : $Q_m = \frac{dm}{dt}$

Unités possibles : en kg/s (USI) ou kg/h ; par contre $Q_m = cste$ pour tout P et $T \Rightarrow$ pas de "normo" ici, car c'est pareil!

I-1 Débits massiques et volumiques

- Conservation ou non des débits en fonction de T et de P :

Rq b av : Q et Q_m sont les mêmes en différents points d'une canalisation, si T et P sont constants.

$Q_m = \text{constante}$ toujours

⇒ pour liquides et gaz (car la quantité de matière, donc m se conserve)

$Q = Q_v = \text{constante}$

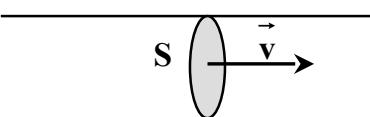
⇒ pour liquides (car **peu compressibles** sous l'action de P et **peu dilatables** sous l'action de T ⇒ $V = c$)

⇒ **Faux pour les gaz** (car $V = f(T, P)$), sauf dans le **cas particulier** d'une **faible vitesse** et à **température constante**.

- Relations :

- ▷ $Q_m = \rho Q_v$ S'aider des unités : $\text{kg/s} = \text{kg/m}^3 * \text{m}^3/\text{s}$

- ▷ $Q = Q_v = S v$ S'aider des unités : $\text{kg/m}^3 = \text{m}^2 * \text{m/s}$



I-2 Relation de Bernoulli

La **pression totale est constante** en tout point d'un **fluide non visqueux** (fluide dit parfait)

Note : Fluide visqueux \leftrightarrow existence de forces de frottement.

$$P_{\text{totale}} = P_{\text{stat}} + P_{\text{dyn}} + \rho g z = P_{\text{stat}} + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z = \text{constante}$$

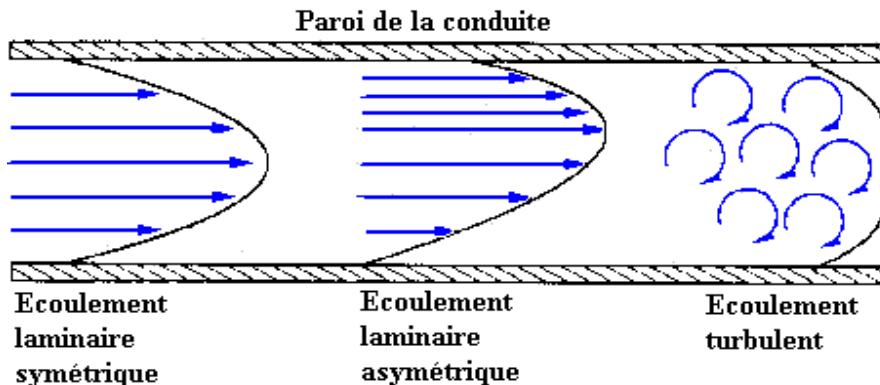
Pression due à la vitesse Pression due au poids du fluide
 Pression due au fluide au repos

I-3 Régimes d'écoulement

- **Ecoulement laminaire** : les particules de fluide ont une *trajectoire rectiligne et parallèle* aux parois ; les couches de fluide glissent les unes sur les autres sans se mélanger. Ecoulement obtenu à faible vitesse ou à forte viscosité.
- **Écoulement turbulent** : les trajectoires ne sont plus parallèles aux parois, elles sont *tourbillonnaires* : cas le *plus fréquent* dans l'industrie.

Profil (courbe des vitesses) v

Vecteurs vitesses \vec{V}



I-3 Régimes d'écoulement

- **Nombre de REYNOLDS \mathfrak{R}** : c'est un nombre *sans unité* qui permet de déterminer *le type d'écoulement (lamininaire ou turbulent) du fluide*. Il est défini à pression et température constantes.

$$\mathfrak{R} = \frac{V \cdot D}{v} = \rho \frac{V \cdot D}{\eta}$$

V : vitesse moyenne en **m/s**.

D : diamètre de la canalisation en **mètre**.

v : viscosité cinématique du fluide en **m²/s** (eau douce $v = 1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

η (ou μ) : viscosité dynamique du fluide en **poiseuille PI (ou Pa.s)** ; 1 PI = 1 kg m⁻¹ s⁻¹

Ancienne unité : le Poise **Po** (ancien système CGS) 1 PI = 10 Po

Sous 1bar et 20 °C, v diminue
quand T et P ↗

$$\text{On a } v = \frac{\eta}{\rho}$$

Dans une conduite de section circulaire :

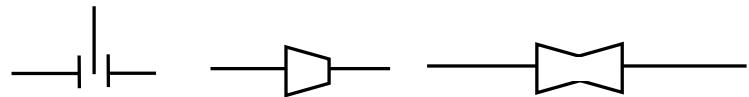
si $\mathfrak{R} < 2000$, l'écoulement est **lamininaire**.

si $\mathfrak{R} > 4000$, l'écoulement est **turbulent**.

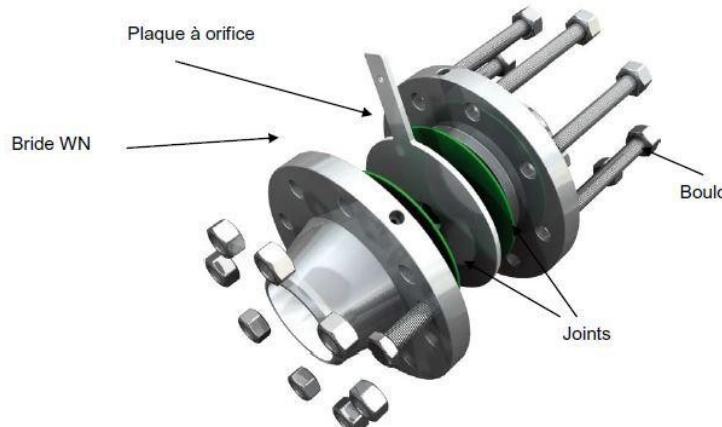
si $2000 < \mathfrak{R} < 4000$, l'écoulement est **indéterminé** (instable entre lamininaire et turbulent)

II-1 – Mesure par organe déprimogène

- 3 types d'OD : diaphragme, tuyère et le venturi

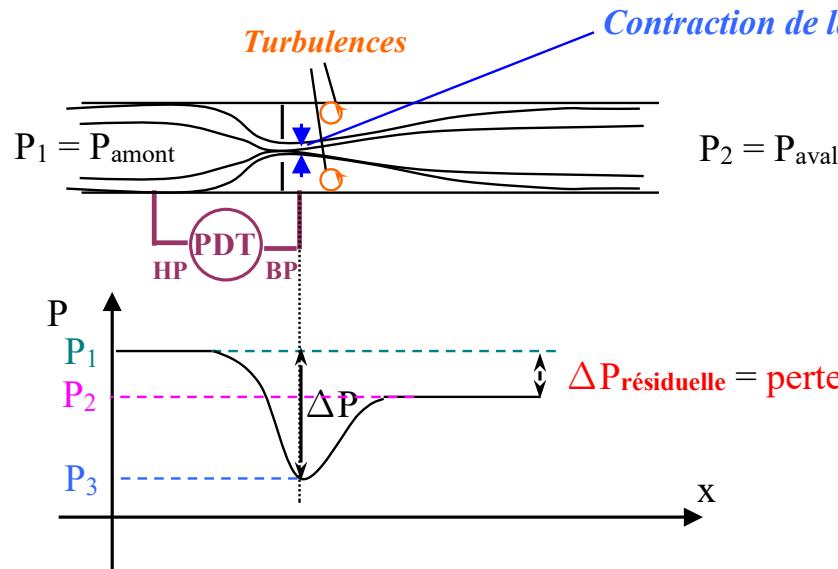


Schémas TI



II-1 – Mesure par organe déprimogène

- Allure de la pression statique $P = f(x)$:



P est mini au niveau de la vena contracta

*Contraction de la veine fluide d'un écoulement par l'OD :
vena contracta VC*

PDT mesure ΔP

Rq : prises BP et HP ok.

$\Delta P_{\text{résiduelle}} = \text{perte de charge} = P_1 - P_2 \Rightarrow \text{Inconvénient des OD}$

Ne pas confondre ΔP (mesurée par OD et donnant Q) et ΔP_r (perte de charge).

La pression différentielle mesurée par le PDT connecté aux bornes due l'OD est $\Delta P = P_1 - P_3$

II-1 – Mesure par organe déprimogène

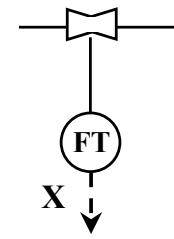
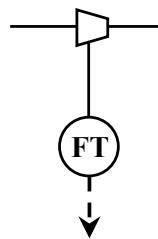
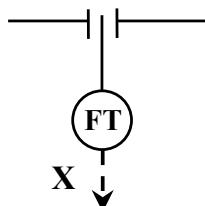
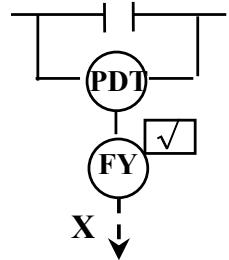
On démontre que $Q = K \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$

car $V = \text{cste}$

Ici (paragraphe B.) le fluide est liquide, alors ρ est constant par rapport à T et P $\Rightarrow Q = K \sqrt{\Delta P}$.

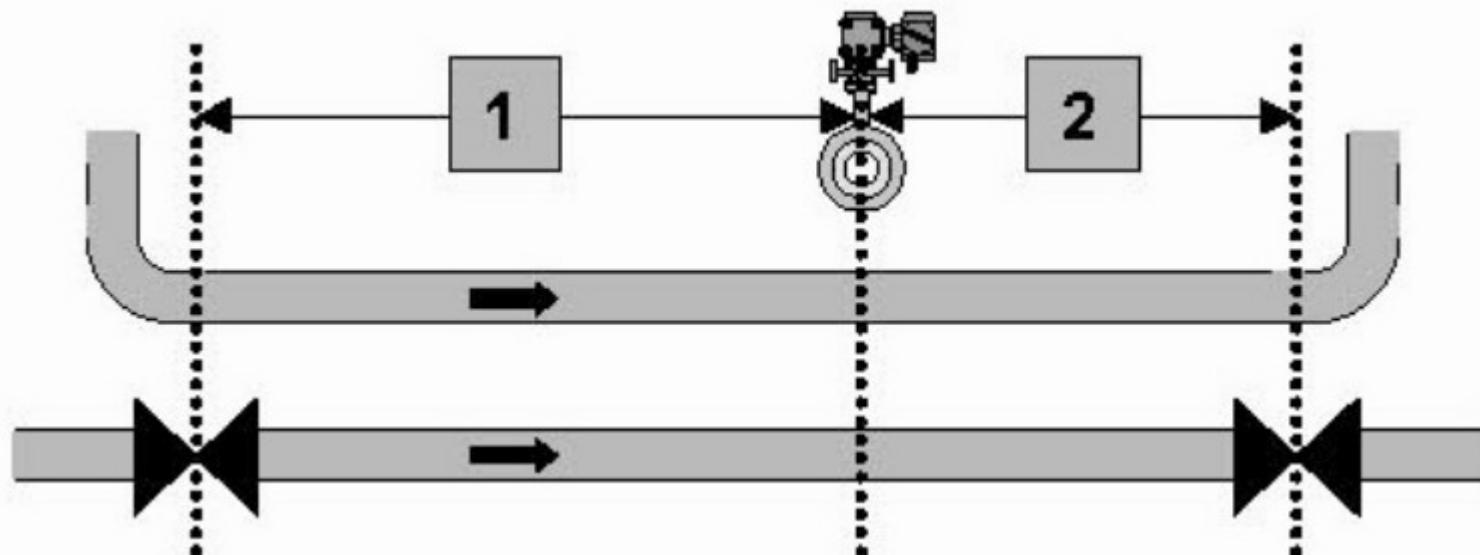
La mesure de ΔP donne Q^2 \Rightarrow nécessité d'un extracteur de racine carrée.

\Rightarrow Schéma TI de la mesure de débit par OD :



II-1 – Mesure par organe déprimogène

- Longueur droite amont et aval



II-1 – Mesure par organe déprimogène

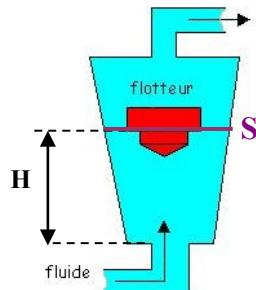
- Longueur droite amont et aval

Type of obstacle	$\beta \leq 0,2$		$\beta = 0,5$		$\beta = 0,75$	
	A ¹⁾	B ²⁾	A ¹	B ²	A ¹	B ²
Upstream length						
90° bend	6 x D	3 x D	22 x D	9 x D	44 x D	20 x D
2x90° bend ³⁾ in the same plane	10 x D	-	22 x D	10 x D	44 x D	22 x D
2x90° bend in perpendicular planes	19 x D	18 x D	44 x D	18 x D	44 x D	20 x D
concentric reducer	5 x D	-	8 x D	5 x D	13 x D	8 x D
concentric expander	6 x D	-	20 x D	9 x D	36 x D	18 x D
ball/gate valve, fully open	12 x D	6 x D	12 x D	6 x D	24 x D	12 x D
Downstream length						
any obstacle	4 x D	2 x D	6 x D	3 x D	8 x D	4 x D

II-2 Mesure par débitmètre à section variable

Petit flotteur (ludion) pouvant se déplacer dans un **tube** vertical conique, de section $S = a H$.

$$Rq (b) : \text{rayon } R \text{ à la hauteur } H \text{ tel que } \pi R^2 = a H \Rightarrow R = \frac{a}{\pi} \sqrt{H}$$



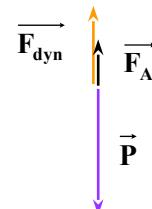
Quand le débit augmente, le ludion se soulève ; il est en **équilibre** sous l'action de 3 forces :

- son poids \vec{P}
 - la poussée d'Archimède \vec{F}_A ($F_A = \rho_{\text{fluide}} V_{\text{ludion}} g$)
 - la poussée du liquide $\vec{F}_{\text{dyn}} = k v^2$ (force due à l'écoulement, appelée "trainée", due à P_{dyn}).
- Forces **constants***

* \Rightarrow La position du ludion dépend donc de v^2 , donc de Qv

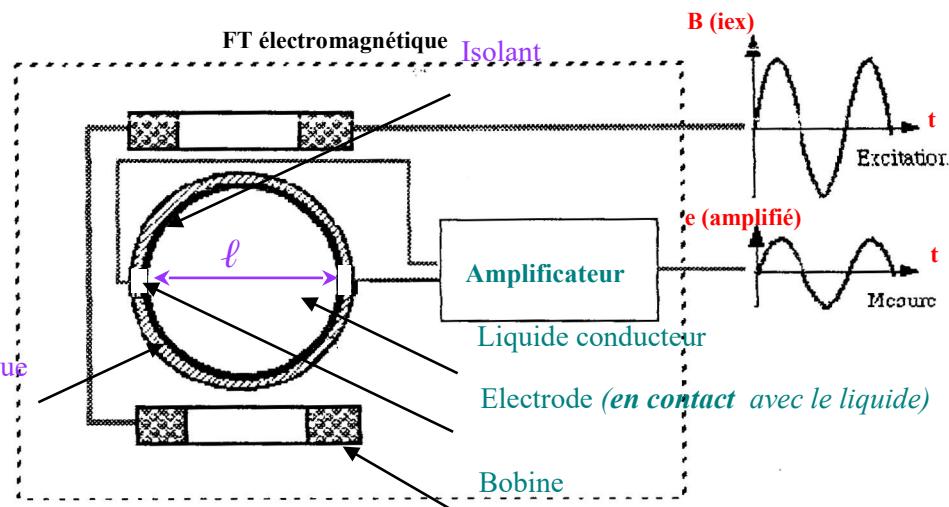
A l'équilibre des 3 forces, on montre que $Q_v = K H$

K dépend de la *forme du flotteur*, de la *viscosité* du fluide et de ρ_{fluide} .



II-3 Débitmètre électromagnétique

- Il utilise le phénomène **d'induction électromagnétique → loi de Faraday** :
Apparition d'une **f.é.m induite** e au sein d'un **liquide conducteur** en **mouvement**, soumis à un **champ magnétique** \vec{B} .



- \vec{B} est créé par 2 bobines de part et d'autre du tuyau, alimentées par $i(t) \sim$ alternatif
- La f.é.m e est captée par 2 électrodes **en contact** avec le liquide

$$e = B \ell v$$

ℓ = largeur de fluide soumis à $B \simeq D$
 v : vitesse du fluide (m/s)
 B : champ magnétique (Tesla)

$$e = B \ell v = \frac{B \ell Q}{S}$$

$$\Rightarrow Q = \frac{S e}{B \ell} = K e$$

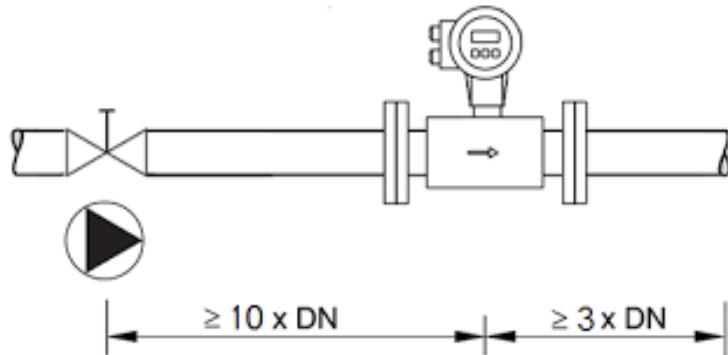
II-4 Débitmètre électromagnétique

Rq1 : FTem pour les **liquides conducteurs** (donc ioniques) en mouvement ; non utilisé pour les gaz, ionisés).

Rq2 : e est *alternatif* utilisé pour éviter *l'effet* d'une **tension de polarisation** entre les électrodes ;

Rq3 : ce système est *intrusif*, car non à l'extérieur, nécessite des brides... (Non Intrusif : ultrasons, radar, nucléaire)

Rq4 : Il faut respecter des longueurs droites amont et aval



II-5 Débitmètre électromagnétique

Avantages

- Pas de perte de charge
- Utilisable pour liquides *pollués, corrosifs, chargés* de particules, *visqueux (mais conducteurs)*
- Précis (0,5 %)

Inconvénients

- Cher
- Cellule remplie ; pas de bulles de gaz ou vapeur (sinon, pas de signal!) ;
- Liquide conducteur
- Sensibilité aux parasites extérieurs (e est très faible 1 mV à 10 mV)
- Zéro à faire *tube plein et circulation arrêtée* (normal : tube plein pour signal et $v = 0$ pour $e = 0$)
- Ne s'utilise pas pour des gaz (il faudrait ioniser le gaz, pour le rendre conducteur...*JGU ok*)

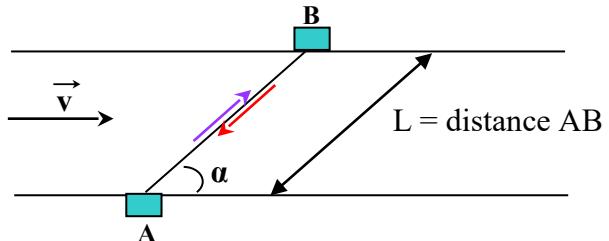
II-6 Débitmètre à ultrasons

sondes : éléments piezoélectriques

- Deux sondes (ou transducteurs / *transducers en anglais*) A et B émettent et reçoivent alternativement des ondes ultrasons de fréquence 0,5 MHz = 500 kHz à 4 MHz pour les liquides (30 kHz à 500 kHz pour les gaz), de célérité C.

Rq : ultrasons : 20 kHz - 3 GHz.

La réception d'un train d'onde de l'une (A par exemple) provoque l'émission d'un train d'onde de l'autre (B).



Rq : *C dépend de la nature du fluide, de ρ et de T (en gnl C ↗ : si ρ ↗ ; si T (gaz) ↗ ; si T (liq) ↘)

C = 331 m/s air sec 0°C ; C = 344 m/s dans l'air à 20°C (C = 331 + 0,6 T°C).

La mesure des temps de transit AB (A émet et B reçoit) et BA (B émet et A reçoit) permettra de déterminer Q, indépendamment de la valeur de C (non constante*).

II-6 Débitmètre à ultrasons

- Soit les **durées** mises par les ondes ultrasons pour aller de A vers B : t_{AB}
de B vers A : t_{BA}

Les ondes **ne se propagent pas à la vitesse C^*** de A vers B (ni de B vers A), car le fluide, **permettant la propagation des ultrasons** (*rappel : pas de propagation dans le vide*), est **en mouvement**. $C = 344$ m/s dans l'air à 20°C .

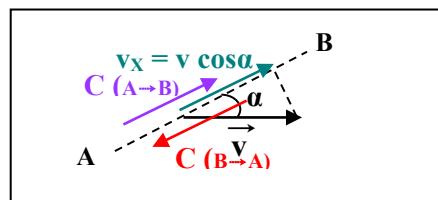
- Soit la \mathbf{C}_1 la vitesse des ondes de A vers B, on a $\mathbf{C}_1 = \mathbf{C} + \mathbf{v}_X$

avec \mathbf{v}_X : composante "utile" de $\vec{\mathbf{v}}$ sur le trajet A → B.

On appelle la droite AB, l'axe X.

Or $\mathbf{v}_X = \mathbf{v} \cos \alpha$ (*voir ci-contre*) d'où $\mathbf{C}_1 = \mathbf{C} + \mathbf{v} \cos \alpha$.

$$\Rightarrow t_{AB} = \frac{L}{C_1} = \frac{L}{C + v \cos \alpha} \quad \textcircled{1}$$



Rq : vitesses résultantes \mathbf{C}_1 et \mathbf{C}_2 non représentées

II-6 Débitmètre à ultrasons

- De même, la vitesse des ondes de B vers A : $C_2 = C - v_x \Rightarrow C_2 = C - v \cos \alpha.$

$$\Rightarrow t_{BA} = \frac{L}{C_2} = \frac{L}{C - v \cos \alpha} \quad ②$$

- Eliminons C** entre ① et ②

$$L = (C + v \cos \alpha) \cdot t_{AB} \text{ et } L = (C - v \cos \alpha) \cdot t_{BA} \Rightarrow C = \underbrace{\frac{L}{t_{AB}} - v \cos \alpha}_{\text{et}} = \underbrace{\frac{L}{t_{BA}} + v \cos \alpha}_{\text{et}}$$

$$\Rightarrow 2 v \cos \alpha = L \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \Rightarrow v = \frac{L}{2 \cos \alpha} \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \Rightarrow Q = S v = \boxed{\frac{LS}{2 \cos \alpha} \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right)}$$

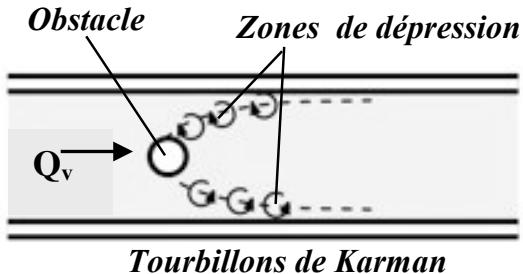
II-6 Débitmètre à ultrasons

▷ Conditions d'utilisation - avantages - inconvénients :

- Très peu (< 8-10 %) de particules et de bulles de vapeur possible (éviter la dispersion des ondes) (= *inconvénient*)
- Dispositif non intrusif ⇒ utilisable pour fluides agressifs ; pas de perte de charge
- Très utilisé pour les hydrocarbures (**non conducteurs** donc FTem impossible)
- Large gamme de débits de 0,1 à 10^5 m³/h.



II-7 Débitmètre à effet Vortex (effet Karman)



On place un *obstacle* dans un fluide en mouvement ; à partir d'une certaine vitesse, il se forme *des tourbillons* ou *vortex*, **en aval** de l'obstacle.

Le nombre de tourbillons par seconde (fréquence des tourbillons) est proportionnel à Q_v moyen.

Le capteur (*jauge de contrainte, éléments piézo ou condensateurs*) détectera *les variations de la pression (dépression au centre du tourbillon)* ou la *vibration de l'obstacle* (ou d'une lame en aval de l'obstacle *expo 2010*) ; la pression en un point de la zone "troublée" du fluide est de forme oscillatoire.

Bonnes linéarité et précision (1%).

Utilisable pour liquide propre, gaz ou vapeur.

A ne pas utiliser pour des vitesses et débits faibles. Pertes de charge limitées.

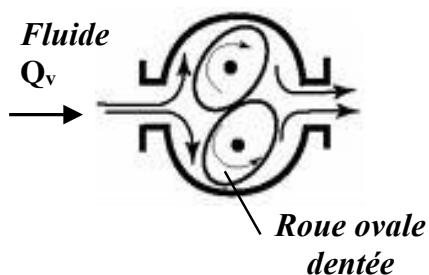
Risque de cavitation.

Obstacle : barre triangulaire —



II-8 Débitmètre par compteurs volumétriques

Le fluide passe dans le débitmètre en faisant **tourner** une ou plusieurs **pièces mobiles**, qui entraînent un dispositif de **comptage**.



Ci-contre, 2 roues ovales, ***solidaires entre elles*** par des dents à leur surface, sont entraînées par le fluide. Le **nombre de rotations** est une mesure précise du **volume de fluide transféré**. Ce qui permettra de connaître Q_v .

Les roues sont aimantées ; les impulsions relevées dans une bobine (placée sur le corps de l'appareil ; phénomène d'induction électromagnétique) permettent de **compter les rotations** et d'en déduire Q_v .

Précision 1%.

Utilisable pour des liquides non chargés (de particules), pour des liquides agressifs : solvants, carburants (essences, GPL), acides et pour des gaz.

Ne tolère pas de bulles de vapeur dans les liquides (dégazage éventuel en amont). Pertes de charge. Coûteux.

III-1 Débitmètre à effet Coriolis

▷ Effet Coriolis :

C'est l'apparition d'une force, **dite force de Coriolis** \vec{F}_C , lorsqu'une masse m est soumise à la fois à un **mouvement de translation** (à la vitesse \vec{v}) dans un **référentiel en rotation** (de vecteur vitesse angulaire $\vec{\Omega}$): $\vec{F}_C = -2m\vec{\Omega} \wedge \vec{v}$

III-1 Débitmètre à effet Coriolis

Le fluide circule dans un **tube en U** flexible (fig 1), mis en **vibration** (fig 2) par une bobine d'excitation (au creux du "U") à la **fréquence de résonnance** du tube (donnant l'amplitude max), soit ≈ 100 Hz (de 80 à 140 Hz)

(par un ensemble électroaimant - aimant permanent, non représenté ici)

⇒ Le tube a donc un **mouvement de rotation**, dont le **sens change périodiquement**.

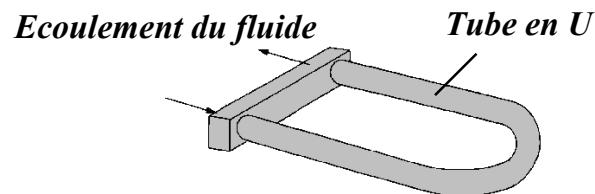


Fig 1 : capteur du FT Coriolis

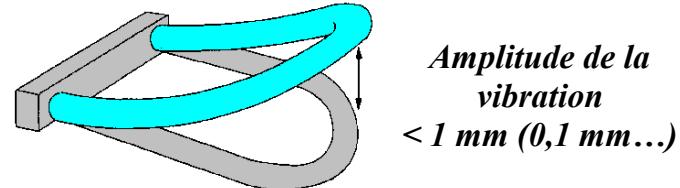
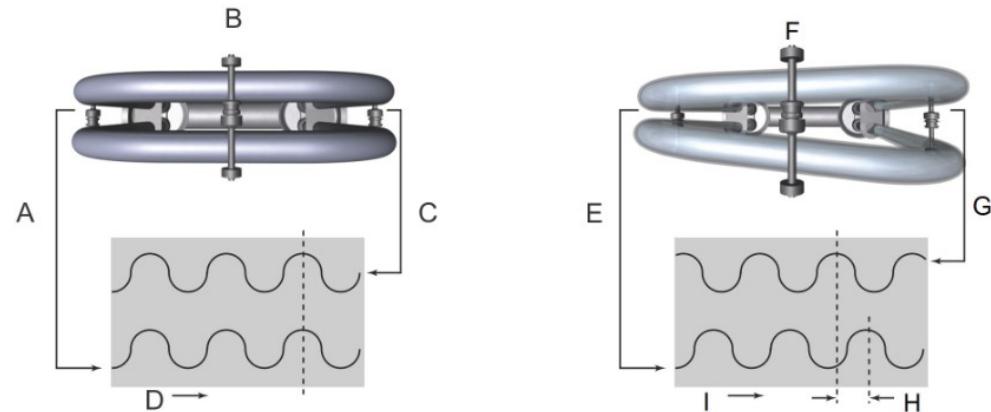


Fig 2 : tube en U en vibration

III-1 Débitmètre à effet Coriolis

Les tubes de mesure sont contraints d'osciller, ce qui produit deux signaux sinusoïdaux. Lorsque le débit est nul, les deux tubes vibrent en phase. En présence d'un écoulement, les forces de Coriolis génèrent une torsion des tubes, ce qui entraîne un **déphasage**. Ce déphasage est directement proportionnel au débit massique.



III-1 Débitmètre à effet Coriolis

▷ Avantages

Pas de maintenance mécanique.

Grande précision (la meilleure) : Liquides : 0,1 % (mesure de Qm) et 0,3 % (Qv).
Gaz : 0,5 % (Qm).

Très large gamme de débits : du débit massique de **0, 2g / min** (tube de diamètre 1 mm) à **1800 tonnes / h** (diamètre 35 cm).

Utilisable pour **tout liquide** (propre ou visqueux, mais non chargé) et **gaz**.

Fournit d'autres mesures (T, Qv, p)

▷ Inconvénients

Ne tolère **pas de bulles de vapeur dans les liquides** (dégazage éventuel en amont).

Il faut ρ_{gaz} pas trop faible.

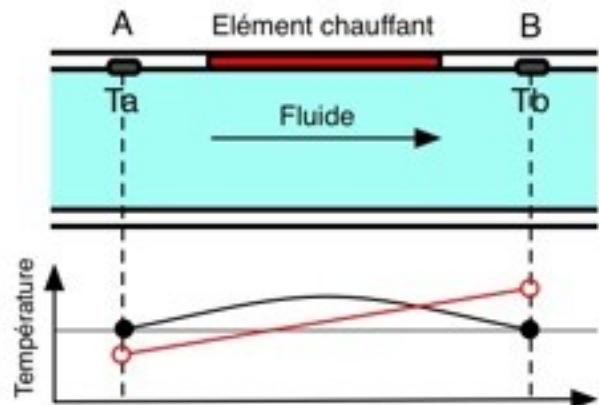
Sensible aux **vibrations**.

Coût élevé.



III-2 Débitmètre à effet Thermique

Le fluide circule dans un **tube métallique à paroi mince** (en dérivation sur la canalisation), sur lequel est placée une **résistance chauffante** (voir figure ci-dessous).



En gris : $Q = 0$ et sans chauffage

- — ● Sans débit : fluide au repos $\Rightarrow T_B = T_A$
- — ○ Avec débit : fluide en mouvement $\Rightarrow T_B > T_A$

2 capteurs de température mesurent les températures en amont (T_A) et en aval (T_B) de la zone de chauffage.

III-2 Débitmètre à effet Thermique

En calorimétrie :

Energies : \mathcal{E} reçue par le gaz = $m C_p (T_B - T_A) = \mathcal{E}$ fournie par l'élément chauffant

avec C_p : *chaleur spécifique du gaz* ou *capacité thermique massique*, à $P = \text{cste.}$

⇒ Puissances : \wp reçue par le gaz = $Q_m C_p (T_B - T_A)$ = \wp fournie par l'élément chauffant = \wp_0
 maintenue constante

$$\text{car } P = \frac{dE}{dt} ; Q_m = \frac{dm}{dt}$$

à connaître

⇒ $\Delta T = T_B - T_A = f(Q_m)$ ($= k/Q_m$ (b))) la mesure de ΔT donne donc Q_m .

III-2 Débitmètre à effet Thermique

Avantages - inconvénients

- ▶ Utilisé pour débits **faibles** (pour que le fluide puisse recevoir suffisamment d'énergie calorifique (av)). Il faut **p_{gaz} pas trop faible**
- ▶ **Très utilisé pour les gaz** (85% des cas) (à Qm faibles) ; *exemple : dopage des semi conducteurs : débits de 2 à 3 mL normal/ min à mesurer.*

Liquides **propres** (non chargés de particules solides) et secs (pas d'humidité).

Précision : 1 %.

Peu d'entretien et peu de pertes de charge.





Fin