



# R315 – Mesures de Débits

Licence Pro Rob&IA

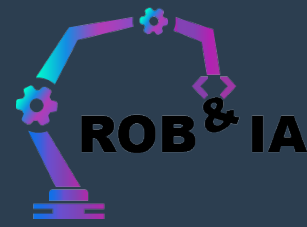
*Laurent ROY*

**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  $Q_N$ .

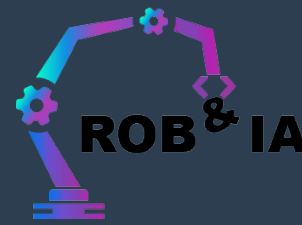
→ ou débit masse

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.*

**$Q_m$  = constante** toujours

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

**$Q = Q_v$  = constante**

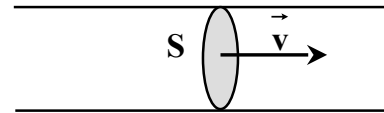
⇒ pour liquides (car **peu compressibles** sous l'action de  $P$  et **peu dilatables** sous l'action de  $T$  ⇒  $V = c$ .)

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

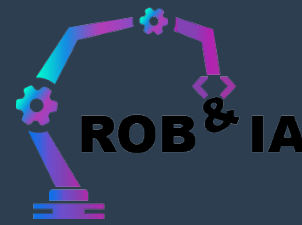
## ▫ Relations :

▸  $Q_m = \rho Q_v$       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 ↔ existence de forces de frottement.*

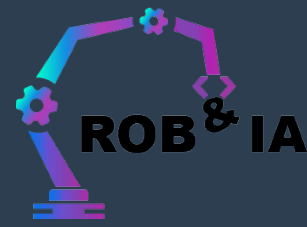
$$P_{\text{totale}} = P_{\text{stat}} + P_{\text{dyn}} + \rho g z = P_{\text{stat}} + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z = \text{constante}$$

Pression due à la vitesse

Pression due au poids du fluide  
(↔  $h \rho g$ )

Pression due au fluide au repos

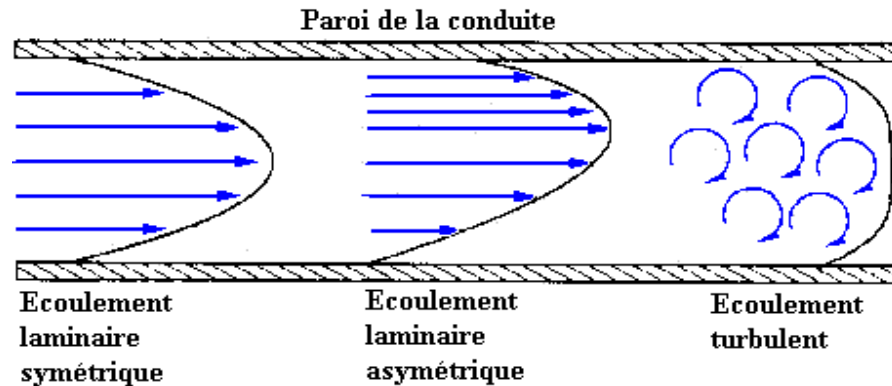
# I-3 Régimes d'écoulement



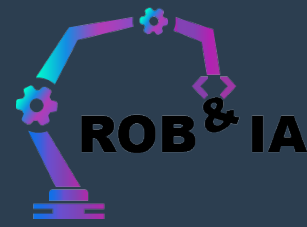
- **Écoulement laminaire** : les particules de fluide ont une *trajectoire rectiligne* et *parallèle* aux parois ; les couches de fluide glissent les unes sur les autres sans se mélanger. Ecoulement obtenu à *faible vitesse* ou à *forte viscosité*.
- **Écoulement turbulent** : les trajectoires ne sont 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 (laminaire ou turbulent) du fluide*. Il est défini à pression et température constantes.

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

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

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

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

**$\eta$  (ou  $\mu$ )** : *viscosité dynamique du fluide* en *poiseuille PI (ou Pa.s)* ;  $1 \text{ PI} = 1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Ancienne unité : le Poise **Po** (ancien système CGS)  $1 \text{ PI} = 10 \text{ Po}$

Sous 1bar et 20 °C,  $\nu$  diminue  
quand T et P  $\nearrow$

On a  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

Dans une conduite de section circulaire :

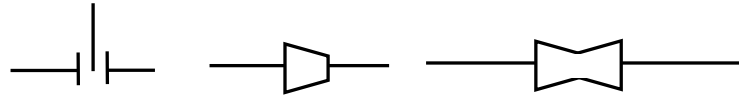
si  $\mathfrak{R} < 2000$ , l'écoulement est *laminaire*.

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

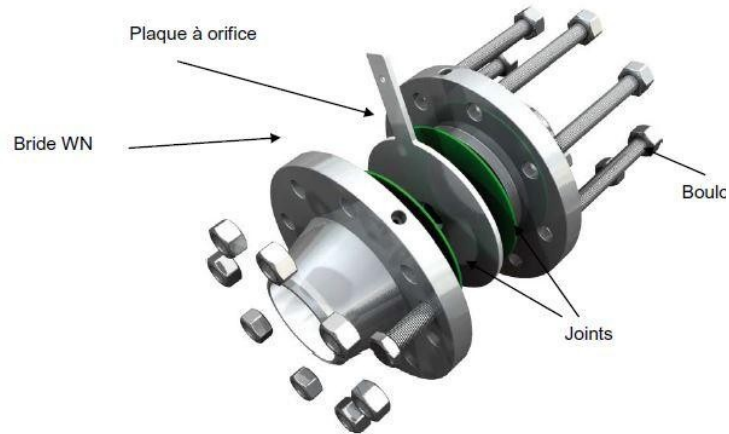
si  $2000 < \mathfrak{R} < 4000$ , l'écoulement est *indéterminé* (instable entre laminaire et turbulent)

# II-1 – Mesure par organe déprimogène

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

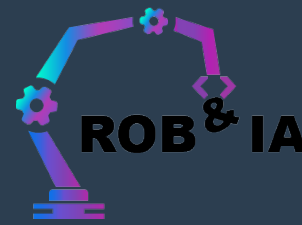


*Schémas TI*

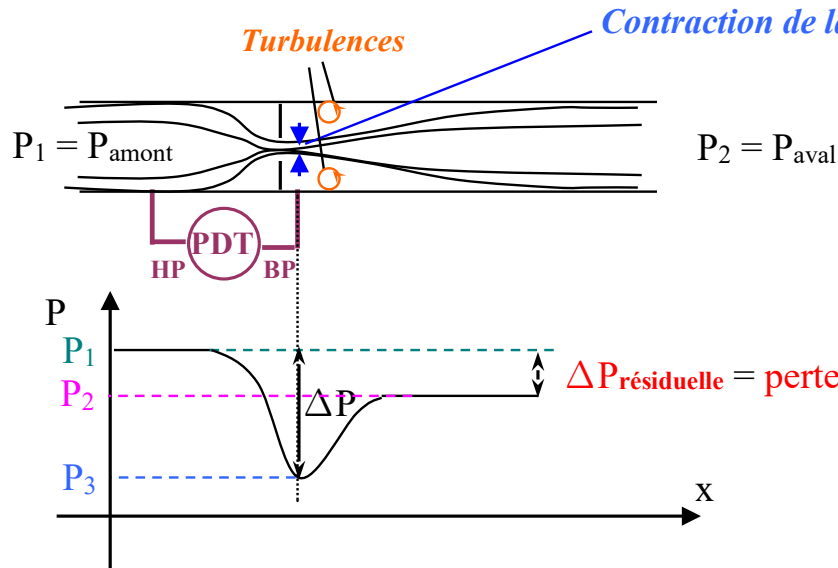




# II-1 – Mesure par organe déprimogène



▫ 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  $\Delta P$**

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  $\Delta P$  (mesurée par OD et donnant  $Q$ ) et  $\Delta P_r$  (perte de charge).*

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

## II-1 – Mesure par organe déprimogène



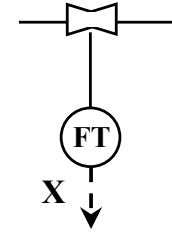
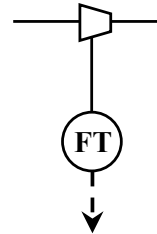
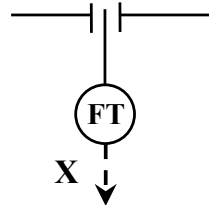
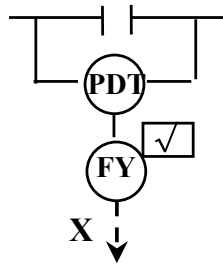
On démontre que  $Q = K \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$

*car  $V = cste$*

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

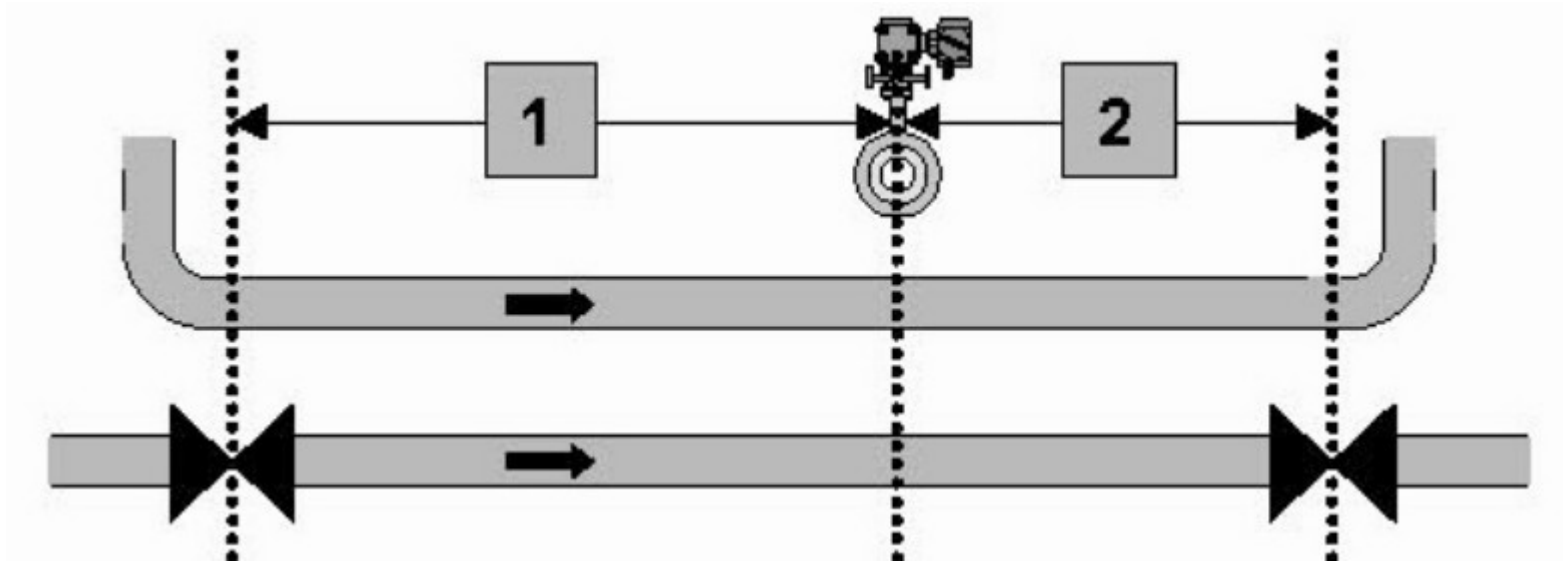
La mesure de  $\Delta P$  donne  $Q^2 \Rightarrow$  nécessité d'un **extracteur de racine carrée**.

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



## II-1 – Mesure par organe déprimogène

- Longueur droite amont et aval



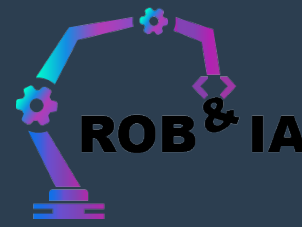
# II-1 – Mesure par organe déprimogène



- Longueur droite amont et aval

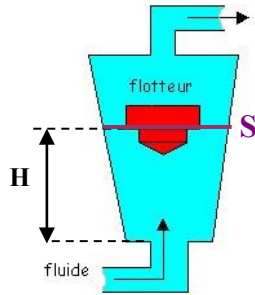
Type of obstacle	$\beta \leq 0,2$		$\beta = 0,5$		$\beta = 0,75$	
	A <sup>1)</sup>	B <sup>2)</sup>	A <sup>1</sup>	B <sup>2</sup>	A <sup>1</sup>	B <sup>2</sup>
Upstream length						
90° bend	6 x D	3 x D	22 x D	9 x D	44 x D	20 x D
2x90° bend <sup>3)</sup> in the same plane	10 x D	-	22 x D	10 x D	44 x D	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) : rayon  $R$  à la hauteur  $H$  tel que  $\pi R^2 = a H \Rightarrow R = \frac{a}{\pi} \sqrt{H}$



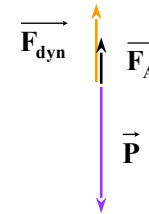
Quand le débit augmente, le ludion se soulève ; il est en **équilibre** sous l'action de 3 forces :

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

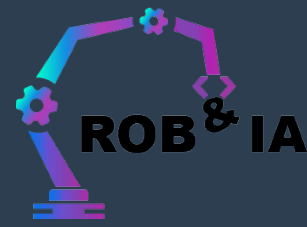
\*  $\Rightarrow$  La position du ludion dépend donc de  $v^2$ , donc de  $Qv$

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

**$K$**  dépend de la **forme du flotteur**, de la **viscosité** du fluide et de  $\rho_{\text{fluide}}$ .

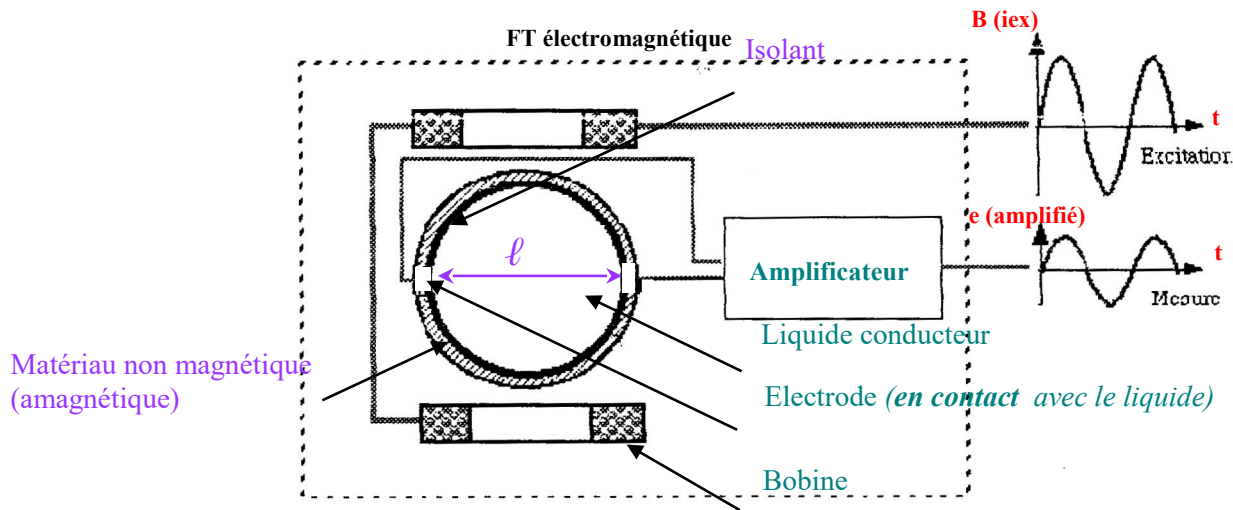


## II-3 Débitmètre électromagnétique



▸ 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

$$e = B \ell v$$

$\ell$  = largeur de fluide soumis à  $B \simeq D$

$v$  : vitesse du fluide (m/s)

$B$  : champ magnétique (Tesla)

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

$\Rightarrow$

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

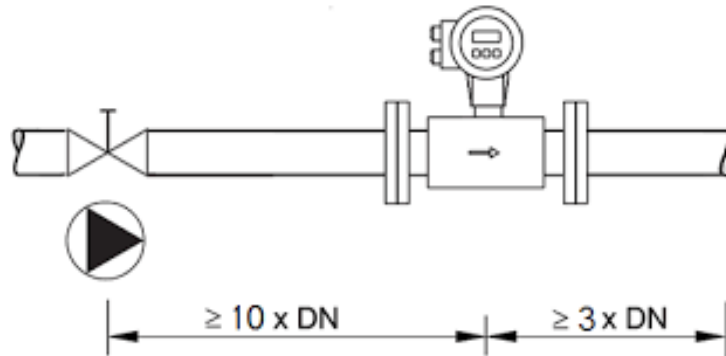
# II-4 Débitmètre électromagnétique

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

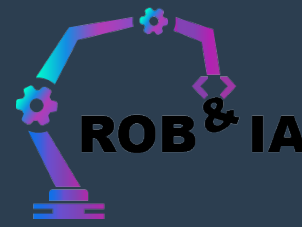
Rq2 : e est **alternatif** utilisé pour éviter *l'effet* d'une **tension de polarisation** entre les électrodes ;

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

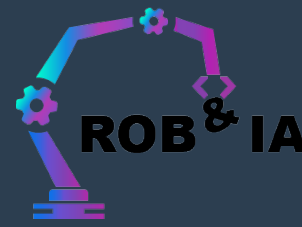
- Pas de perte de charge
- Utilisable pour liquides *pollués, corrosifs, chargés* de particules, *visqueux (mais conducteurs)*
- Précis (0,5 %)

## 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

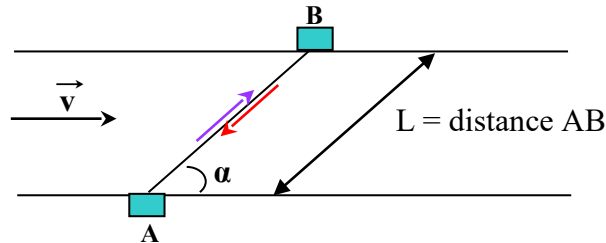


sondes : éléments piézoélectriques

▸ 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 k Hz - 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).

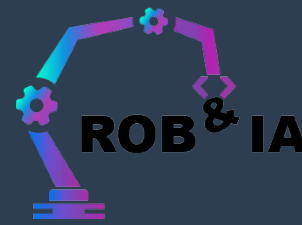


Rq : \*C dépend de la nature du fluide, de  **$\rho$**  et de **T** (en gnl C  $\nearrow$  : si  $\rho \nearrow$  ; si T (gaz)  $\nearrow$  ; si T (liq)  $\searrow$ )

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.

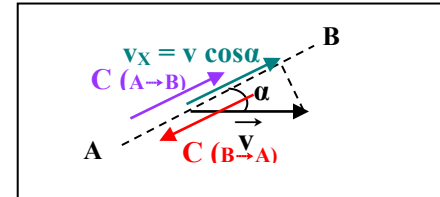
▪ Soit la  $C_1$  la vitesse des ondes de A vers B, on a  $C_1 = C + v_x$

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

On appelle la droite AB, l'axe X.

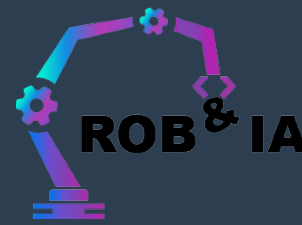
Or  $v_x = v \cos \alpha$  (voir ci-contre) d'où  **$C_1 = C + v \cos \alpha$** .

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



Rq : vitesses résultantes  $C_1$  et  $C_2$  non représentées

## II-6 Débitmètre à ultrasons



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

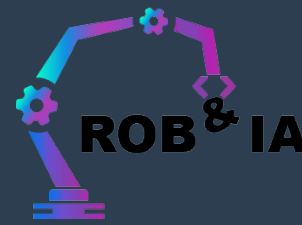
$$\Rightarrow t_{BA} = \frac{L}{C_2} = \frac{L}{C - v \cos \alpha} \quad (2)$$

- Éliminons  $C$  entre (1) et (2)

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

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

# II-6 Débitmètre à ultrasons

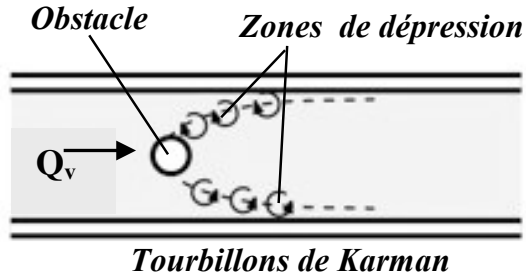
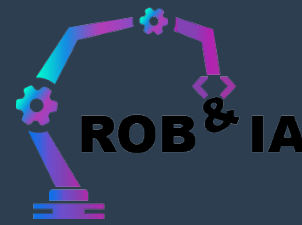


## ► Conditions d'utilisation - avantages - inconvénients :

- Très peu (< 8-10 %) de particules et de bulles de vapeur possible (éviter la dispersion des ondes) (= *inconvénient*)
- Dispositif non intrusif  $\Rightarrow$  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  $10^5$  m<sup>3</sup>/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.**

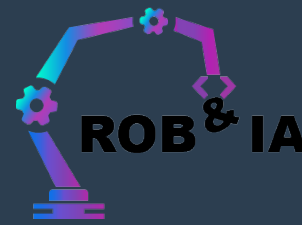
**A ne pas utiliser pour des vitesses et débits faibles. Pertes de charge limitées.**

**Risque de cavitation.**

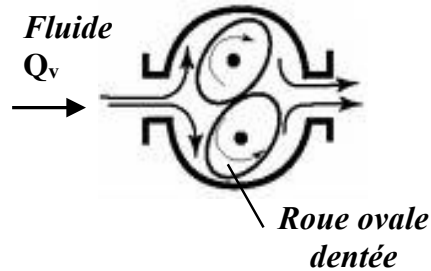
**Obstacle : barre triangulaire**



## 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  $Q_v$ .

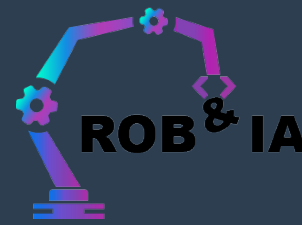
Les roues sont aimantées ; les impulsions relevées dans une bobine (placée sur le corps de l'appareil ; phénomène d'induction électromagnétique) permettent de **compter les rotations** et d'en déduire  $Q_v$ .

**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.**

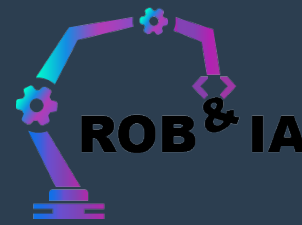
# III-1 Débitmètre à effet Coriolis



## ► 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  $\vec{\Omega}$ ) :  $\vec{F}_C = -2 m \vec{\Omega} \wedge \vec{v}$

# 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 résonance** du tube (donnant l'amplitude max), soit  $\approx 100$  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**.

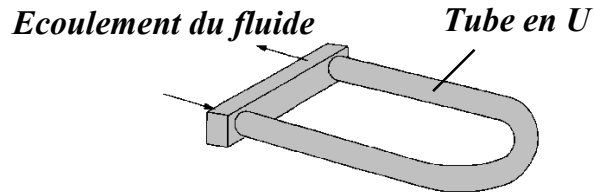


Fig 1 : capteur du FT Coriolis

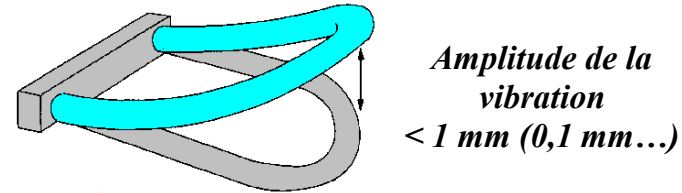
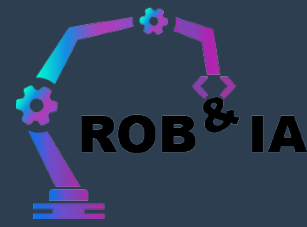


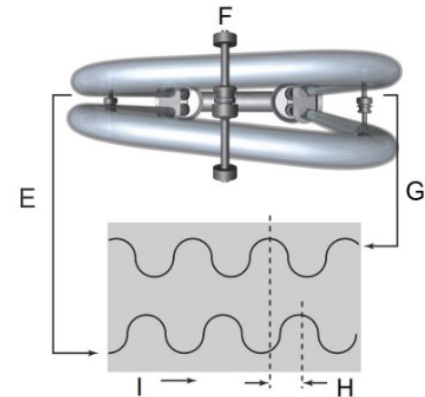
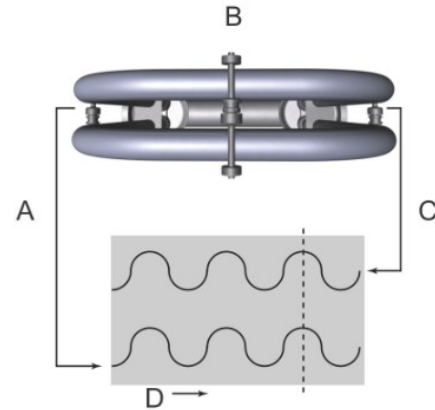
Fig 2 : tube en U en vibration



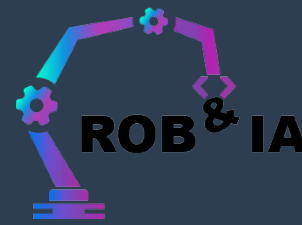
# III-1 Débitmètre à effet Coriolis



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  $Q_m$ ) et 0,3 % ( $Q_v$ ).  
Gaz : 0,5 % ( $Q_m$ ).

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 ( $T$ ,  $Q_v$ ,  $\rho$ )**

## ► Inconvénients

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

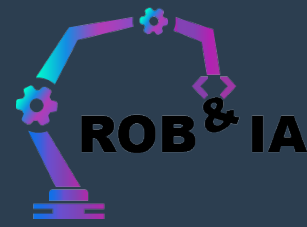
Il faut  $\rho_{\text{gaz}}$  pas trop faible.

Sensible aux **vibrations**.

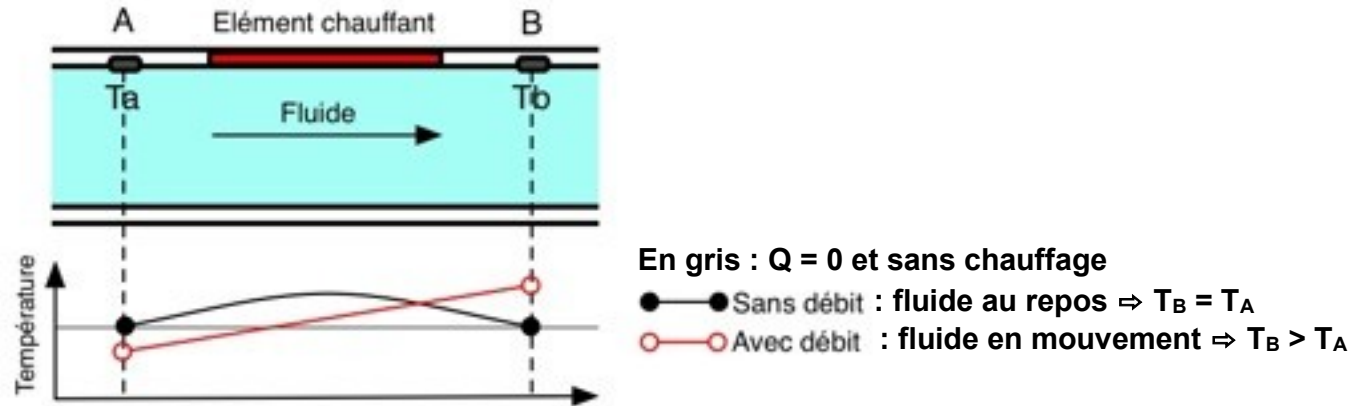
**Coût** élevé.



## III-2 Débitmètre à effet Thermique

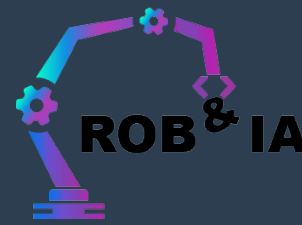


Le fluide circule dans un **tube métallique à paroi mince** (en dérivation sur la canalisation), sur lequel est placée une **résistance chauffante** (voir figure ci-dessous).



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  $P = \text{cste}$ .

$\Rightarrow$  Puissances :  $\mathcal{P}$  reçue par le gaz =  $Q_m C_p (T_B - T_A)$  =  $\mathcal{P}$  fournie par l'élément chauffant =  $\mathcal{P}_0$   
maintenue constante

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

*à connaître*

$\Rightarrow \Delta T = T_B - T_A = f(Q_m)$  ( $= k/Q_m$  (b)) la mesure de  $\Delta T$  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  **$\rho_{\text{gaz}}$  pas trop faible**

► **Très utilisé pour les gaz** (85% des cas) (à  $Q_m$  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**