

## Chapitre 5 : Mesure de niveaux et de débit

### 5- Capteurs de niveaux et de débit

#### 5-1 Capteurs de niveaux

##### 5-1-1 Introduction

Une mesure fréquemment faite en milieu industriel est la mesure de niveau de matériaux solides et liquides. Les capteurs de niveau peuvent être classifiés selon la méthode de mesure.

Cette mesure peut être soit visuelle, à l'aide de tubes en verre soit hydrostatique, basée sur les principes d'Archimède ou sur la pression hydrostatique.

D'autres capteurs de niveau utilisent des principes électriques basés sur des variations d'impédance.

##### 5-1-2 Capteurs hydrostatiques

###### 5-1-2-1 Principe

Pour un liquide homogène, la pression relative en fond d'un réservoir est proportionnelle au niveau de celui-ci mais elle dépend de la masse volumique du liquide :

$$P[Pa] = \rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] * L[m]$$

###### 5-1-2-2 Flotteur

Le flotteur se maintient à la surface du liquide. Il est solidaire d'un capteur de position qui délivre un signal électrique correspondant au niveau. Sa position est peu dépendante de la masse volumique du liquide.

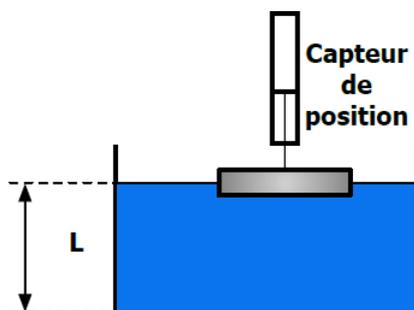


Figure.1 : Mesure de niveau par flotteur



Figure.2 : Flotteur industriel

###### 5-1-2-3 Plongeur

Le plongeur est un cylindre immergé dont la hauteur est au moins égale à la hauteur maximale du liquide dans le réservoir. Il est suspendu à un capteur dynamométrique qui se trouve soumis à une force F, fonction de la hauteur L du liquide :

$$F[N] = P[Pa] - \rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] * L[m] * S[m^2]$$

Avec :

P : le poids du plongeur.

S : La section

$g*L*S$  : La poussée d'Archimède s'exerçant sur le volume immergé du plongeur

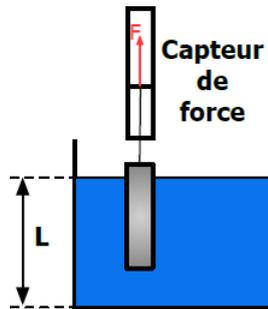


Figure.3 : Mesure de niveau par plongeur



Figure.4 : Photo d'un plongeur

#### 5-1-2-4 Mesure de niveau par capteur de pression

Le capteur de pression mesure la pression relative au fond du réservoir :

$$L[m] = \frac{P[Pa]}{\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right]}$$

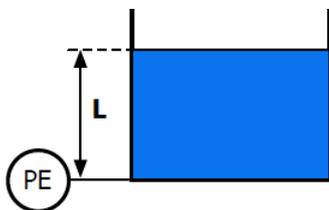


Figure.5 : Mesure de niveau par capteur de pression



Figure.6 : Capteur de pression

### 5-1-2-2-5 Mesure de niveau par bullage

Pour mesurer la pression, on peut utiliser un système à bulle (Figure.7).

Ce système permet de mesurer la pression au bout de la canne, en régulant le débit qui doit être très faible.

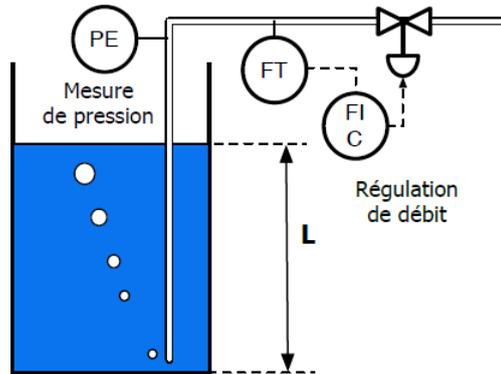


Figure.7 : Mesure de niveau par bullage

- Caractéristiques
  - Sensible aux variations de densité et de température ;
  - Le capteur de pression ne touche pas au liquide ;
  - Très bonne précision ( $\pm 2$  mm) ;
  - Très simple et économique ;
  - Consommation d'air d'environ 0.015 m<sup>3</sup>/h ;
  - Plage de 60 m.

### 5-1-2-6 Capteur de pression différentielle

Si le réservoir est fermé, on utilise un capteur de pression différentielle. Il existe alors deux montages différents (Figures : 8-9), (avec condensation  $\Delta P < 0$ , ou sans condensation

$\Delta P > 0$ ).

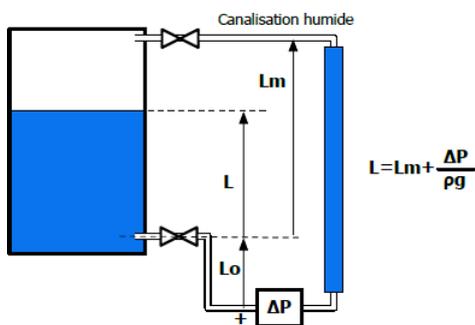


Figure .8 : Réservoir avec condensation

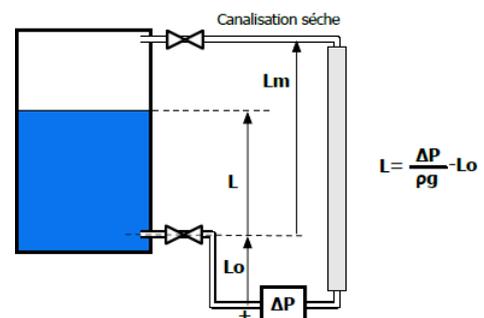


Figure .9 : Réservoir sans condensation

### 5-1-2-7 Par mesure de masse volumique

La mesure de la différence de pression ( $P_1 - P_2$ ) permet de déterminer la masse volumique du liquide à l'intérieur du réservoir (Figure.10).

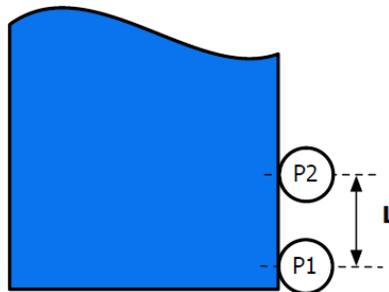


Figure.10 : Mesure de masse volumique

### 5-1-3 Capteurs électriques

#### 5-1-4 Capteurs conductimétriques

La sonde est formée de deux électrodes cylindriques (l'une d'elles peut être assurée par le réservoir s'il est métallique). La sonde est alimentée par une faible tension (10 V) alternative afin d'éviter la polarisation des électrodes. En continu, la sonde est placée verticalement et sa longueur s'étend sur toute la plage de variation de niveau.

Le courant électrique qui circule est d'amplitude proportionnelle à la longueur d'électrode immergée (donc proportionnelle au niveau), mais sa valeur dépend de la conductivité du liquide.

Ce type de capteur, est utilisable uniquement avec des liquides conducteurs, non corrosifs et n'ayant pas en suspension une phase isolante.

La pression est comprise entre le vide et 160 bar et la température comprise entre  $-200^{\circ}\text{C}$  et  $250^{\circ}\text{C}$ .

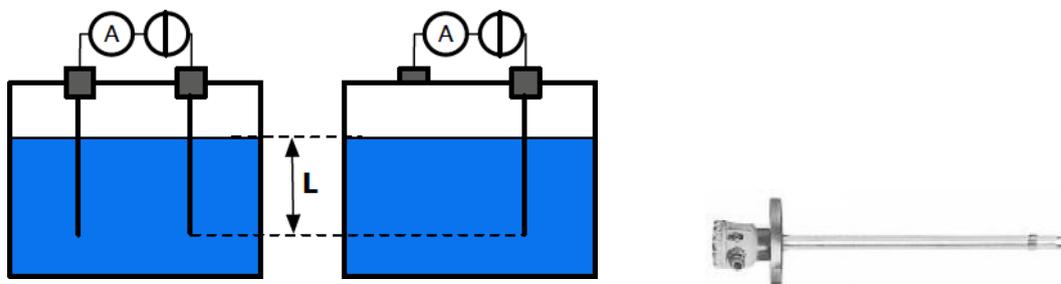


Figure 11 : Capteurs conductimétriques

### 5-1-5 Capteurs capacitifs

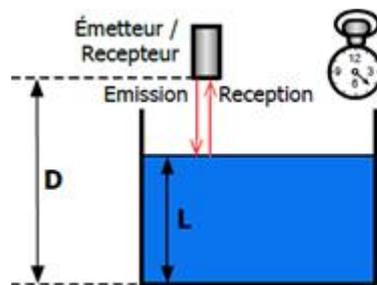
Lorsque le liquide est isolant, un condensateur est réalisé soit par deux électrodes cylindriques, soit par une électrode et la paroi du réservoir s'il est métallique. Le diélectrique est le liquide dans la partie immergée, l'air en dehors. La mesure de niveau se ramène à la mise en variation de capacité qui est d'autant plus importante que la constante diélectrique  $\epsilon_r$  du liquide est supérieure à celle de l'air.

La variation de capacitance est linéaire avec le niveau de liquide.

- Caractéristiques :
  - Emploi assez répandu.
  - Applicable à presque tous les types de produits.
  - Insensible aux dépôts.
  - Sensible à la densité et à la température.
  - Sensible aux produits abrasifs.

### 5-1-6 Capteurs acoustiques

Ce transducteur, placé au sommet du réservoir émet des trains d'onde acoustiques qui après réflexion sur la surface du liquide retournent vers le transducteur qui les convertit en signal électrique. L'intervalle de temps  $\Delta t$  séparant l'émission de la réception du train d'ondes réfléchi est proportionnel à la distance du transducteur à la surface du liquide : il est donc fonction du niveau.



- Bonne étendue de mesure (de 0.1 - 60 m).;
  - Précis, robuste et fiable.
- Pour tous produits liquides ou solides.
- Sensible à la température (vitesse du son).
- Sensible à l'agitation de surface.
- Prix élevé.

### 5-1-7 Radar

Le principe de fonctionnement est le même que celui des ondes acoustiques, celle-ci sont remplacées par des ondes électromagnétiques, dont la vitesse est indépendante de la composition du gaz, de la température, de la pression, de la densité et des turbulences.

### 5-1-8 Capteurs de niveau par Gammamétrie (Par absorption de rayonnement gamma)

La source et le détecteur sont placés à l'extérieur, de part et d'autre du réservoir. Ces capteurs sont particulièrement adaptés au cas de liquides très corrosifs ou sous haute pression ou à haute température. La source est un émetteur gamma. Le détecteur est soit une chambre d'ionisation soit un ou plusieurs tubes Geiger-Muller. La mesure est fiable et sans contact.

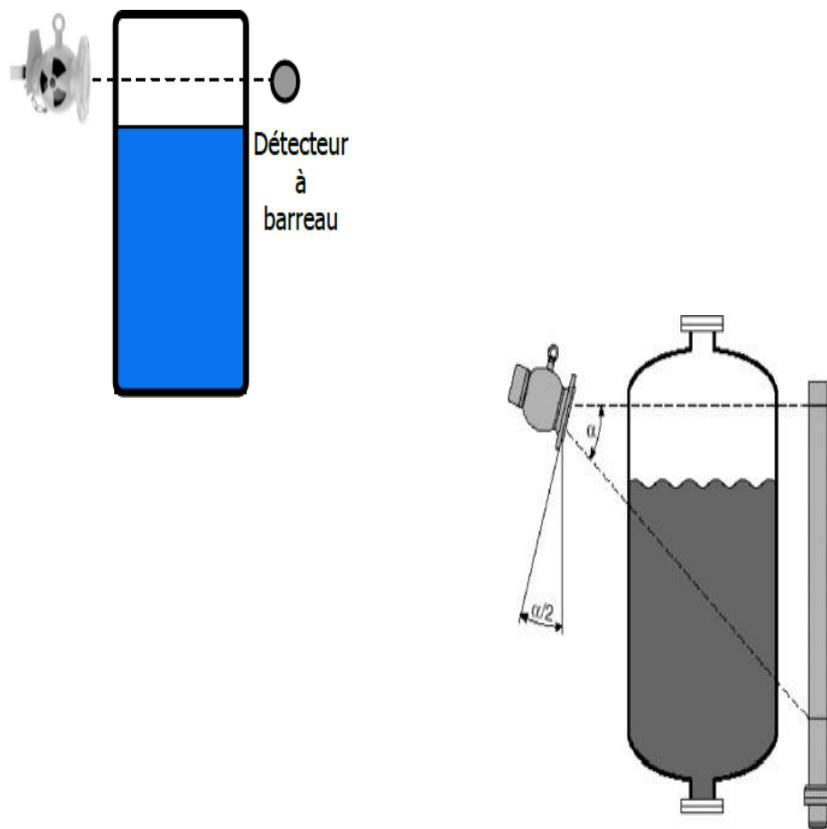


Figure 12 : Principes de mesure de niveau par Gammamétrie

### 5-1-9 Comparaison des différentes méthodes de mesure de niveau

	Flotteur	Plongeur	Capteur de pression	Capteur conductimétrique	Capteur capacitif	Capteur acoustique	Radar	Gammamétrie
Standard	++	++	++	++	++	-	-	-
Utilisable sur cuve synthétique	++	++	++	-	+	+	-	+
Insensible à la mousse	+	+	++	-	-	-	-	-
Indépendant du diélectrique	++	++	++	+	-	+	+	+
Indépendant de la densité	-	-	-	+	+	+	+	-
Economique	+	+	+	+	+	-	-	-
Facilité d'étalonnage	+	+	+	-	-	+	+	-
Pas de risque d'encrassement	-	-	-	-	-	+	+	+
Sans maintenance	-	-	-	+-	-	+	+	+
Montage économique	-	+	-	+	+	++	++	++
Pression maximale	4	4	350	50	50	3	64	1000
Température maximale	100	100	250	500	500	95	250	600

## 5-2 Capteurs de débit

### 5-2-1 Définitions

#### 5-2-1-1 Débit

Le débit est défini par la quantité de fluide qui s'écoule par unité de temps. On distingue deux types de débits : Le débit massique et le débit volumique qui sont liés par la relation :

$$Q_m [kg/s] = \rho [kg/m^3] * Q_v [m^3/s]$$

#### 5-2-1-2 Régimes d'écoulement des fluides

En dynamique des fluides, il existe deux sortes de fluides :

- Le fluide parfait qui ne présente pas de résistance à l'écoulement.
- Le fluide réel qui est visqueux et présente donc une résistance à l'écoulement.

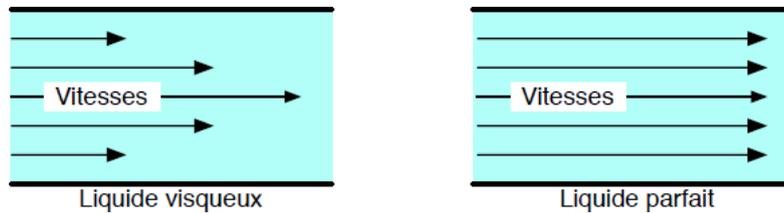


Figure13 : Différence entre fluide parfait et fluide réel

Il existe deux régimes d'écoulement pour un liquide :

- L'écoulement laminaire qui est un régime d'écoulement où le fluide se rapproche du fluide idéal.
- L'écoulement turbulent où l'effet de la viscosité se fait sentir.

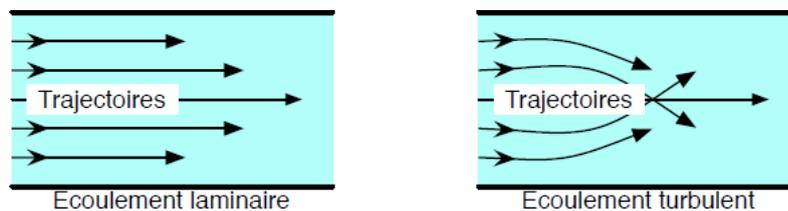


Figure.14 : Régime laminaire et régime turbulent

Pour déterminer le type d'écoulement, on utilise le nombre de Reynolds défini par :

$$Re = \frac{\rho [kg/m^3] \cdot V [m/s] D [m]}{\mu \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]} = \frac{V [m/s] D [m]}{\nu [m^2/s]}$$

Avec :

- $\rho$ : Masse volumique du fluide.
- $V$  : La vitesse du fluide.
- $D$  : Diamètre de la canalisation
- $\mu$ : Viscosité dynamique du fluide.
- $\nu$ : Viscosité cinématique  $\nu = \mu/\rho$ .

Un écoulement est turbulent pour  $Re > 2200$ . Dans le cas contraire, l'écoulement est laminaire.

Dans le cas d'un écoulement laminaire, on peut déterminer le débit d'un fluide à partir

de sa vitesse :  $Q_v [m^3/s] = V[m/s] \cdot S[m^2]$

## 5-2-2 Capteurs de débit volumique

### 5-2-2-1 Débitmètre à tube de Pitot

Dans un tube de Pitot, la mesure des pressions statique et totale permet de déterminer la vitesse et par conséquent le débit :

$$V[m/s] = \sqrt{\frac{2(P_{totale} - P_{statique})[Pa]}{\rho[kg/m^3]}}$$

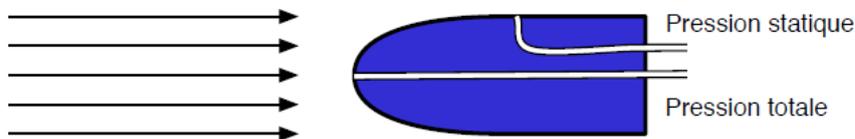


Figure.15 : Débitmètre à tube de pitot

### 5-2-2-2 Débitmètres à organe déprimogène

La mesure de la vitesse d'écoulement d'un organe déprimogène est une méthode très utilisée dans la mesure d'un débit. Elle est basée sur la loi de Bernoulli :

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

Un resserrement de la conduite ou un changement de direction créent entre amont et aval une différence de pression  $\Delta P$  liée au débit par la relation :

$$Q_v [m^3/s] = k[m^2] \cdot \sqrt{\frac{\Delta P [Pa]}{\rho [kg/m^3]}}$$

Avec k une constante fonction de l'organe.

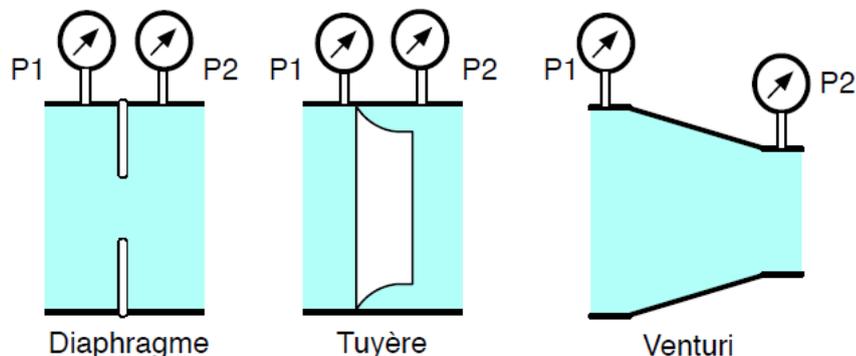


Figure.16: Les différents organes déprimogènes

### 5-2-2-3 Rotamètre

Un rotamètre est constitué d'un flotteur localisé dans une colonne en verre graduée. En l'absence de débit, le flotteur coule au fond de la colonne de verre. La force de gravité agissant sur le flotteur excède la force d'Archimède.

La relation entre le débit  $Q$  et la surface  $A$ , qui est la surface entre la paroi intérieure de la colonne et le flotteur, est exprimée par :

Avec :

$$Q = K \cdot S \sqrt{2g \frac{V_f}{S_f} \left( \frac{\rho_f}{\rho} - 1 \right)}$$

- $S_f$ : La surface du flotteur face au débit.
- $V_f$ : Volume du flotteur.
- $\rho_f$ : La masse volumique du flotteur



Figure 17: Rotamètre

Caractéristique :

- La gamme de mesure va :
  - De 0,5 litre/h à 200 000 litres/h pour les gaz.
  - De 0,2 litre/h à 20 000 litres/h pour les liquides.
- La précision est de 3 à 10% de l'étendue de la mesure.
- La température du fluide peut approcher 400°C
- Sous 25 bars. Le rotamètre introduit des pertes de charge.

### 5-2-2-4 Débitmètre à coupelle, à hélice ou à turbine

Ce type de capteur permet de mesurer le débit par mesure de vitesse de rotation du corps d'épreuve (coupelle, hélice ou turbine) et cela par un dispositif tachymétrique : Dynamotachymétrique, Capteur optique ou Capteur inductif.

Des précisions de l'ordre de 1% peuvent être atteintes. Cependant, la réponse peut être

faussée par les turbulences ou par les variations de vitesses. Leur domaine d'utilisation est de 0,1 à 30 m/s pour les gaz et de 0,05 à 10 m/s pour les liquides.

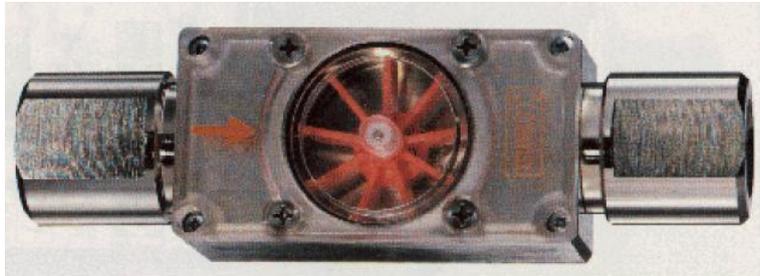


Figure 18: Débitmètre à turbine

#### 5-2-2-5 Débitmètre à palette

Le fonctionnement de ce capteur est basé sur l'utilisation d'une palette qui est soumise à la force aérodynamique ou hydrodynamique de l'écoulement et à son poids.

La position d'équilibre est mesurée par un montage potentiométrique.



Figure.19 : Débitmètre à palette

#### 5-2-2-6 Débitmètre ionique

Trois conducteurs électriques sont placés perpendiculairement au déplacement du fluide. Le fil central est soumis à un potentiel élevé, les deux autres sont reliés à la masse. Ce champ électrique crée une ionisation du fluide.

Les courants électriques  $I_1$  et  $I_2$  sont identiques si la vitesse du fluide est nulle. Dans le cas contraire (fluide en mouvement), le système devient asymétrique. La différence des courants  $I_2 - I_1$  est proportionnelle à la vitesse  $V$ .

Ce type de capteur est bien adapté aux faibles vitesses et permet la mesure du sens

d'écoulement.

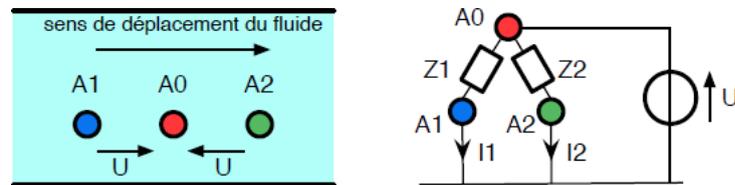


Figure20 : Débitmètre ionique

### 5-2-2-7 Débitmètres ultrasoniques

Un émetteur émet des ondes ultrasonores. La mesure du temps mis par les ondes pour parcourir la distance  $L$  entre l'émetteur et le récepteur permet de déterminer la vitesse du fluide :

$$t = \frac{L}{c + U \cos \alpha}$$

Avec :

$c$  : La vitesse du son dans le fluide

$U$  : La vitesse du fluide.

$\alpha$  : L'angle entre  $U$  et la direction définie par le couple émetteur/récepteur.

- Caractéristiques
  - Echelle linéaire et réponse instantanée ;
  - Insensible à l'agressivité du fluide.
  - Mesure des débits entre  $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$  et  $10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ .
  - Débits de  $0.03$  à  $30 \text{ m/s}$ .
  - Précision de l'ordre de  $1 \%$ .
  - Mesure dans des conduites de de quelque mm de diamètre à plusieurs mètres.
  - Mesure dans les deux sens.

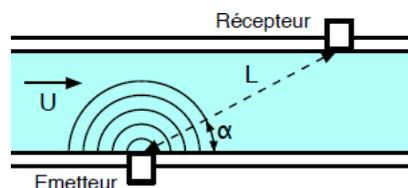


Figure21 : Débitmètre ultrasonique

### 5-2-3 Capteurs de débit massique

#### 5-2-3-1 Capteur électromagnétique

Le principe du débitmètre électromagnétique est basé sur la loi de Lenz : Un conducteur en mouvement dans un champ magnétique constant est soumis à une force électromotrice proportionnelle à la vitesse de déplacement du conducteur :

$$\vec{E} = \vec{V} \wedge \vec{B}$$

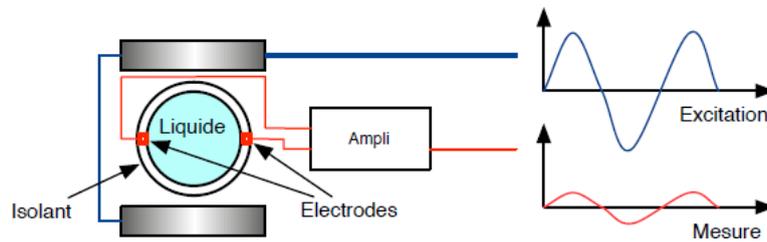


Figure22 : Capteur électromagnétique

L'induction magnétique, de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-2}$ T, est produite par deux bobines placées de part et d'autre de la conduite de mesure. La conduite est en matériaux amagnétiques et elle est revêtue sur sa surface intérieure d'une couche isolante. Deux électrodes de mesure sont placées aux extrémités du diamètre perpendiculaire au champ B. Les bobines sont alimentées par une tension alternative, afin d'éviter une polarisation des électrodes. Les liquides doivent avoir une conductivité minimale de l'ordre de quelques S/cm.

L'étendue de mesure est fonction du diamètre de la conduite, la vitesse d'écoulement peut varier de 1 à 10 m/s. La précision est de classe 1 et la constante de temps est de l'ordre de 1 s.

### 5-2-3-2 Capteur thermique

Deux capteurs de température sont placés aux points A et B, de part et d'autre d'un élément chauffant (Figure23). La différence de température,  $T_b - T_a$  est proportionnelle au débit massique.

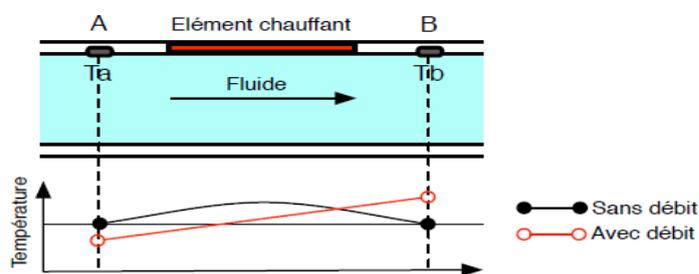


Figure.23 : Capteur thermique

- Caractéristiques
  - Précision : Classe 0,5 à 1,5 ;
  - Constante de temps : De l'ordre de 2,5 s à 150 s.
  - Perte de charge : De l'ordre de 2 Pa.

### 5-2-3-3 Débitmètre à effet Coriolis

Le capteur une portion de canalisation horizontale en forme de U (Figure.24). Un champ électromagnétique alternatif induit une rotation alternative selon l'axe de la conduite. Le fluide s'écoulant dans le tube est contraint de suivre cette rotation. Il se produit alors un phénomène alternatif de résistance ou d'aide à la rotation, entraînant deux vibrations en amont et en aval du coude. Ces vibrations sont en déphasage, dont l'amplitude est proportionnelle au débit massique du fluide.

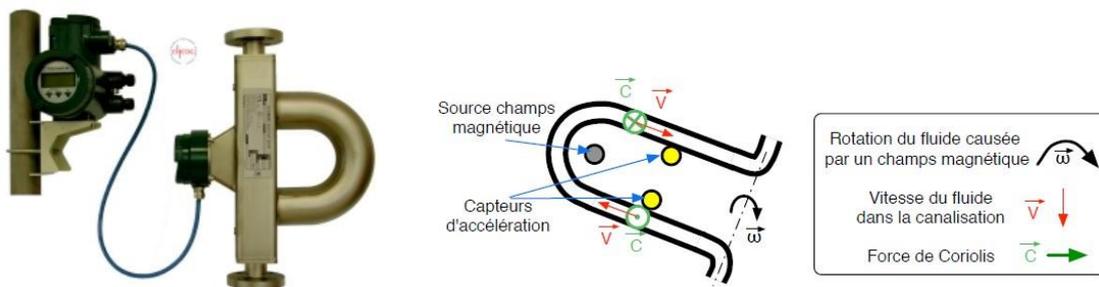


Figure.24: Capteur à effet Coriolis

- Caractéristiques
  - Précision de mesure pour liquide : Débit massique  $\pm 0,15\%$ , débit volumique :  $\pm 0,3\%$ .
  - Précision de mesure pour gaz : débit massique :  $\pm 0,5\%$ .
  - Dynamique de mesure 1000 :1.
  - Excellente reproductibilité.
  - Grande immunité aux parasites électromagnétiques.