

IV. Les mesures de débit

IV.1 Généralités

C'est la quantité de fluide qui s'écoule ou qui est fournie par unité de temps.

On distingue deux types de débit

- **Le débit massique (Q_m)** qui est la **masse** de fluide écoulée par unité de temps (en **kg/s**),
- **Le débit volumique (Q_v)** qui est le **volume** de fluide écoulé par unité de temps (en **m³/s**).

Ces deux grandeurs sont reliées par la relation :

$$Q_m = \rho Q_v$$

Avec :

- ρ : étant la masse volumique en (kg/m³)

IV.2 Mesure des débits volumiques

a. Tube de PITOT

La méthode consiste à utiliser deux tubes qui mesurent la pression en des endroits différents à l'intérieur de la canalisation. Ces tubes peuvent être montés séparément dans la conduite ou ensemble dans un seul boîtier.



Figure 4-9 Tube de Pitot

L'un des tubes mesure la pression d'arrêt (ou pression dynamique) en un point de l'écoulement. Le second tube mesure uniquement la pression statique, généralement sur la paroi de la conduite. La pression différentielle mesurée de part et d'autre du tube de **PITOT** est proportionnelle au carré de la vitesse.

• **domaine d'utilisation** : pour les liquides propres ou visqueux, la mesure de débit de gaz, la variation de la vitesse d'écoulement entre la moyenne et

le centre n'étant pas aussi importante qu'avec les autres fluides. Ils sont facilement bouchés par des corps étrangers présents dans le fluide

- **diamètre de canalisation** : à partir de 300 mm et jusqu'à 3,8 m en France (9,6 m en USA)
- **précision** : 1 à 2 % de la valeur réelle
- **dynamique** : 1-4

La mesure des pressions statique et totale permet de connaître la vitesse d'un fluide incompressible. La pression différentielle mesurée de part et d'autre du tube de Pitot est proportionnelle au carré de la vitesse.

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_t - P_s)}{\rho}}$$

Avec :

- V : vitesse en m/s
- P_t, P_s : pressions totale et statique en Pa
- ρ : masse volumique en kg/m³

Exercice résolu

Une conduite de **25 cm** de diamètre transporte du bromure (densité de **2.93 gr/cm³** et viscosité d'environ **10⁻³ Pa.s**) à un débit maximal de **1750 m³/heure**. La mesure de débit se fait grâce à un tube de **PITOT** qui exige que le nombre de Reynolds soit supérieur à **300000**.

1. J'ai à choisir entre les 4 capteurs de pression suivant :

- **A : 0 - 50 kPa,**
- **B : 0 - 100 kPa,**
- **C : 0 - 150 kPa**
- **D : 0 - 200 kPa**

Ayant tous une précision de **± 0.125 %** et un signal de sortie de **4 à 20 mA**. Quel capteur serait un choix optimal en termes de précision et d'étendue de mesure ?

2. Quel est le débit minimum (en **m³/h**) qui assure que le nombre de Reynolds soit supérieur à **300000** ? Quelle est la pression différentielle mesurée pour cette vitesse ? Quelle est la rangeabilité de ce capteur ?

3. Quel est le débit dans la conduite, si le courant mesuré est de **16.5 mA** ?

Correction

1. L'équation de vitesse d'écoulement pour un tube de Pitot est :

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_t - P_s)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}$$

La surface de la conduite est :

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 0.0491 m^2$$

AN :

$$A = \frac{3,14 \cdot (25 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 0.0491 m^2$$

La vitesse d'écoulement est :

$$V = \frac{Q}{A}$$

AN:

$$Q = 1750 m^3/h = \frac{1750}{3600} = 0.4861 m^3/s$$

$$V = \frac{0.4861}{0.0491} = 9.9040 m/s$$

Puisque $V = \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}$

Donc on peut solutionner : $\Delta P = \frac{\rho \cdot V^2}{2}$

AN: $\rho = 2,930 g/cm^3 = 2930 kg/m^3$

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot V^2}{2} = \frac{2930 \cdot 9,903^2}{2} = 143\,671,68 Pa$$

Le capteur de pression "C" est celui qui convient le mieux. Son étendue de mesure cadre presque avec la plage de pression à mesurer. Puisque tous les capteurs ont la même classe de précision, il sera le plus précis parmi les capteurs utilisables (C et D).

2. Pour trouver le débit minimum, il suffit de trouver la vitesse correspondant au nombre de **Reynolds** égal à 300000 :

$$Re = \frac{V \rho D}{\mu}$$

La vitesse est : $V = \frac{\mu Re}{\rho D}$

AN:

$$V = \frac{10^{-3} \cdot 300000}{2930 \times 0.25} = 0.410 m/s$$

Ce qui mène à une vitesse d'écoulement $V = 0.410 m/s$, ce qui correspond à un débit (minimal) de :

$$Q = V \cdot A = 0,41 \cdot 0,0491 = 0,020131 m^3/s = 72,47 m^3/h$$

Pour ce débit, la pression différentielle est obtenue en solutionnant :

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot V^2}{2} = \frac{2930 \cdot 0,410^2}{2} = 246,27 Pa$$

Ce qui donne une pression différentielle de **246.27 Pa**.

La rangeabilité est déduite des débits minimum et maximum :

$$R_{an} = \frac{Q_{max}}{Q_{min}} = \frac{1750}{72,47} = 24.14$$

3. La fonction de transfert du capteur est :

$$y = mx + b$$

Avec :

- **x** la différence de pression,
- **y** le courant,
- **m** la sensibilité et **b = 4 mA**,

la sortie du capteur quand la différence de pression est nulle.

La sensibilité est :

$$m = \frac{20 mA - 4 mA}{150000 Pa - 0 Pa} = 0.0001067 mA/Pa$$

On trouve la différence de pression en solutionnant :

$$y = 16,5 mA = 0.0001067 mA/Pa \times x + 4 mA$$

$$\Delta P = X = \frac{16.5 mA - 4 mA}{0,0001067} = 117\,150,89 Pa$$

b. Débitmètres à organe déprimogène

Un organe déprimogène est un appareil inséré dans une conduite et permet son rétrécissement pour créer entre amont et aval une différence de pression ΔP ou une perte de charge.

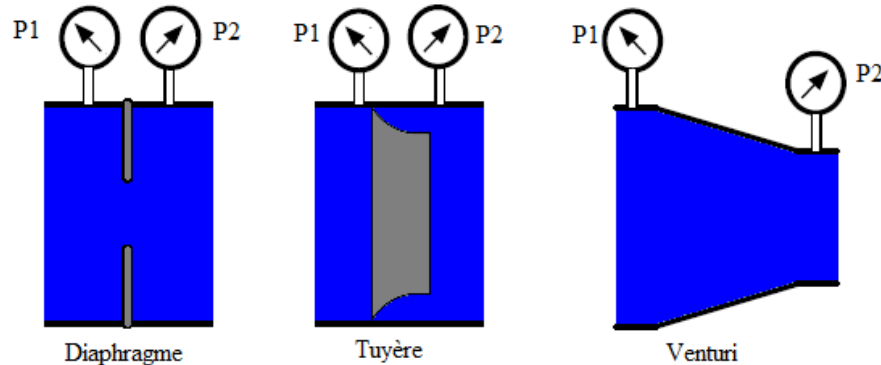


Figure 4-10 Les organes déprimogènes usuels

La pression différentielle créée ΔP est liée au débit par la relation :

$$Q_v = K \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

Avec :

- ρ : la masse volumique du fluide en kg/m^3 ;
- ΔP : la différence de pression en Pa
- K : une constante fonction de l'organe en m^2 .

Remarque : En fonction du resserrement de la conduite, une perte de charge proportionnelle à la différence de diamètre de l'organe déprimogène est provoquée.

Exercice résolu

On considère une chaîne de mesure de débit constituée d'un organe déprimogène et d'un transmetteur de pression différentielle ΔP .

Pour un débit variant de **0 à 60 m³/h**, la perte de charge ΔP varie de **0 à 250 mbars**.

Le transmetteur délivre lin signal **4-20 mA** qui varie linéairement en fonction de ΔP .

1. Compléter le tableau suivant :

Débit Q_v (m ³ /h)	0	15	30	45	60
ΔP (mbars)	0				250
I (mA)	4				20

2. On veut modifier l'échelle tout en gardant l'organe déprimogène. La nouvelle échelle est de **0 à 80 m³/h**.

a. que doit-on faire ?

b. Compléter le tableau suivant :

Débit Q_v (m ³ /h)	0	20	40	60	80
ΔP (mbars)					
I (mA)	4				20

Correction

Pour un débit variant de **0 à 60 m³/h**, la perte de charge Δp varie de **0 à 250 mbars**.

$$K = \frac{Q_v}{\sqrt{\Delta P}} = \frac{60}{\sqrt{250}}$$

1. Pour remplir le tableau on utilise :

$$\Delta P_1 = \left(\frac{Q_{v1}}{K} \right)^2 = \left(\frac{Q_{v1}}{60} \sqrt{250} \right)^2$$

$$I_1 = \frac{\Delta I}{\Delta P} \Delta P_1 + 4 = \frac{16}{250} \Delta P_1 + 4$$

Débit Q_v (m ³ /h)	0	15	30	45	60
ΔP (mbars)	0	15.625	62.5	140.625	250
I (mA)	4	5	8	13	20

2. On veut modifier l'échelle tout en gardant l'organe déprimogène. La nouvelle échelle est de **0 à 80 m³/h**.

a) On doit étalonner le transmetteur pour : **4mA → 0m³/h et 20mA → 80m³/h**

b) On garde l'organe déprimogène $\Rightarrow K$ ne change pas ; donc :

$$K = \frac{Q_V}{\sqrt{\Delta P}} = \frac{60}{\sqrt{250}}$$

Pour remplir le tableau on utilise :

$$\Delta P_1 = \left(\frac{Q_{V1}}{K} \right)^2 = \left(\frac{Q_{V1}}{60} \sqrt{250} \right)^2$$

Pour calculer le courant on utilise :

$$I_1 = \frac{\Delta I}{\Delta P} \Delta P_1 + 4 = \frac{16}{444,44} \Delta P_1 + 4$$

Débit Q_V (m^3/h)	0	20	40	60	80
ΔP (mbars)	0	27.78	111.11	250	444.44
I (mA)	4	5	8	13	20

c. Débitmètre électromagnétique

Rappel de physique ; Loi de Lenz-Faraday

On considère un conducteur ab de longueur L se déplaçant dans un champ magnétique uniforme B (figure. 4-11).

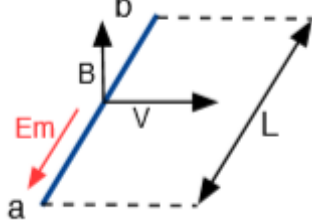


Figure 4-11 Induction électromagnétique

Ce conducteur est le siège d'une f.e.m dont l'expression est donnée par :

$$e = \vec{B} \cdot \vec{V} \wedge \vec{L}$$

- e : force électromotrice
- V : Vitesse de déplacement du conducteur
- L : Longueur du conducteur
- B : Champs magnétique uniforme et constant

Cette formule se généralise au cas d'un écoulement liquide (au lieu du déplacement d'un conducteur) à l'intérieur d'une conduite de diamètre D à une vitesse \vec{V} perpendiculaire à \vec{B} .

La f.e.m induite e selon un diamètre perpendiculaire à \vec{B} et \vec{V} a pour expression :

$$e = B \cdot D \cdot V$$

Remarque : la vitesse V ainsi mesurée est la vitesse moyenne de l'écoulement ainsi le signal e est proportionnel au débit.

Principe

Deux bobines alimentées par une tension alternative et placées de part et d'autre de la conduite de mesure produisent une induction magnétique de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-2} T (figure. 4-12). La conduite est en matériaux amagnétiques et est revêtue sur sa surface intérieure d'une couche isolante. Deux électrodes de mesure sont placées aux extrémités du diamètre perpendiculaire au champ B pour mesurer la f.e.m induite e .

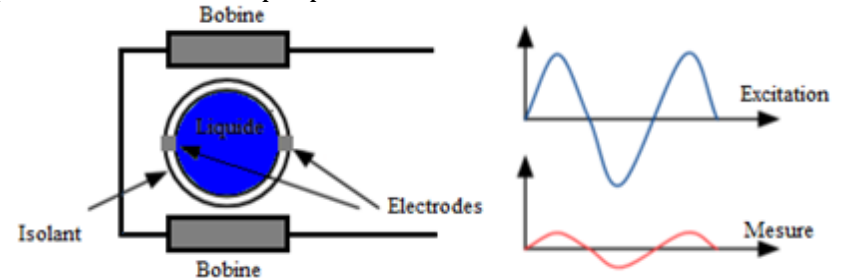


Figure 4-12 Débitmètre électromagnétique

Selon la loi de de Lenz-Faraday, le signal mesuré a pour expression :

$$e = U \cdot D \cdot B_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

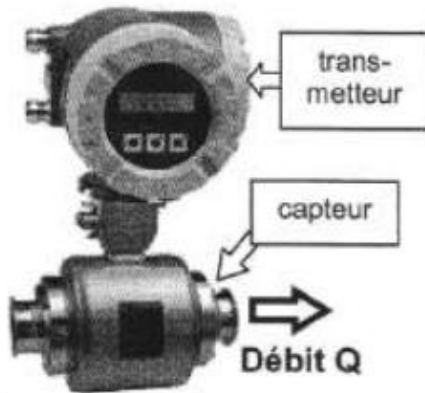
La tension induite mesurée est proportionnelle à la vitesse d'écoulement du fluide et ainsi au débit volumique.

Exercice résolu

La mesure du débit prévue (que l'on sait être comprise entre **4 et 10 m³/h**) est confiée à un débitmètre électromagnétique Promag **50H** Endress +Hauser (photo ci-dessous).

Le constructeur du débitmètre donne les caractéristiques suivantes :

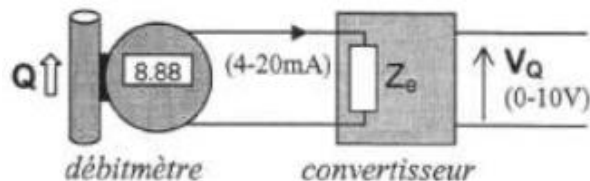
- **Grandeur de mesure** : vitesse d'écoulement v
- **Gamme de mesure** : $v = 0,01 \dots 10 \text{ m.s}^{-1}$
- **Sortie courant** : 4 -20 mA ; résistance de charge $< 700 \Omega$



Le capteur est inséré le long de la conduite PVC de refoulement, son orifice est de section égale à celle de la conduite, à savoir qu'il a un diamètre intérieur **D = 50 mm**.

Le débitmètre renvoie l'information "**débit Q**" sur une sortie **4 -20 mA**.

Cette information sera ensuite récupérée par une entrée analogique de l'automate après conversion en une tension **V_Q** comprise entre 0 et 10 V, conformément à la figure ci-dessous.



Le convertisseur **4 -20 mA / 0 -10 V** a une impédance d'entrée **Z_e = 500 Ω**

1. Déterminer la plage de débit mesurable par l'appareil et justifier son choix.
2. Calculer la tension maximale fournie par la sortie 4 -20 mA du débitmètre. Cette valeur est-elle compatible avec les spécifications du constructeur du débitmètre données ci-dessus ?
3. Calculer le facteur **K_D** tel que **V_Q = K_D · Q**, sachant que le débitmètre peut renvoyer une valeur de Q au maximum égale à **70 m³/h**. Préciser son unité.

Correction

1. Débit :

$$Q = S \cdot v = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \times v$$

$$\text{AN : } S = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = 3,14 \left(\frac{0,050}{2} \right)^2 = 19,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Pour :

- $v = 0,01 \text{ m/s} \rightarrow Q = 70 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$
- $v = 10 \text{ m/s} \rightarrow Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

La plage de mesure s'étend de **0,070 à 70 m³/h** donc on sera capable de mesurer des débits s'étalant de **4 à 10 m³/h**

2.

- A **4 mA** correspond un écoulement à $v = 0,01 \text{ m/s}$ soit un débit de **0,070 m³/h**
- A **10 mA** correspond un écoulement à $v = 10 \text{ m/s}$ soit un débit de **70 m³/h**

On a : $U = Z_e \cdot i$ et $Z_e = 500 \Omega$

Pour

- $i = 4 \text{ mA} \Rightarrow U_{\min} = 2 \text{ V}$
- $i = 20 \text{ mA} \Rightarrow U_{\min} = 10 \text{ V}$

3.

$$V_Q = K_D \cdot Q$$

Donc comme on sait que pour **70 m³/h** on aura une tension de 10 V

Alors :

$$K_D = \frac{V_Q}{Q} = \frac{10}{70} = 0,142 \text{ V/m}^3/\text{h}$$

d. Débitmètre à ultrasons

Un émetteur et un récepteur sont montés en opposition de manière à ce que les ondes acoustiques allant de l'un à l'autre soient à 45 ° par rapport au sens d'écoulement dans la conduite. La vitesse du son allant de l'émetteur au récepteur constitue la vitesse intrinsèque du son, plus un apport dû à la vitesse du fluide.

La mesure du temps t mis par le signal pour parcourir la distance L permet de connaître la vitesse du fluide et d'en déduire le débit.

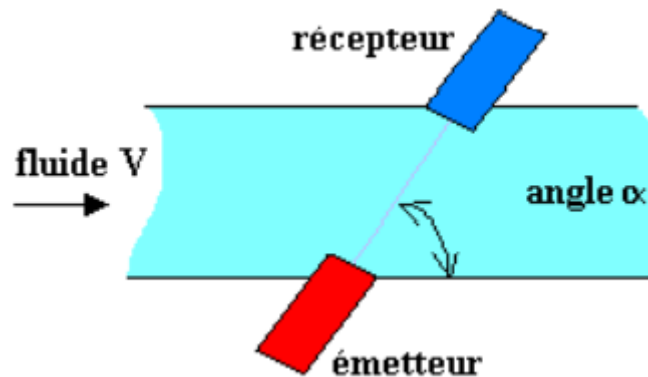


Figure 4-13 Débitmètre ultrasonique

Le temps mis par l'onde ultrasonore pour aller de l'émetteur vers le récepteur est :

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

Avec :

- t : temps en s;
- c : vitesse de propagation du son dans le fluide en m/s,
- V : vitesse du fluide en m/s,
- α : angle entre le sens d'écoulement et la direction définie par le couple émetteur / récepteur.

La vitesse V est facilement donnée par :

$$V = \left(\frac{L}{t} - c \right) \cdot \frac{1}{\cos \alpha}$$

Il est primordial que le fluide ne véhicule pas de gaz ou de solides, pour éviter la dispersion des ondes acoustiques entre les deux transducteurs. L'ensemble du dispositif, à l'extérieur de la conduite, est insensible à l'agressivité du fluide et n'entraîne aucune perte de charge.

- **domaine d'utilisation** : fréquemment utilisé pour les écoulements turbulents, pour les fluides non conducteurs (notamment hydrocarbures), là où les débitmètres électromagnétiques ne conviennent pas
- **diamètre de canalisations** : généralement important (6000 mm)
- **précision** : peut atteindre 0,5 %
- **temps de réponse** : très rapide, jusqu'à 1 ms

IV.3 Mesure des Capteur de débit massique

En tenant compte du principe de conservation de la masse, la masse de la matière est la même pour des volumes différents ce qui implique que le débit massique est indépendant de la température et de la pression, contrairement au débit volumique qui y dépendent.

a. Débitmètre à effet Coriolis

Rappel de physique : Effet Coriolis

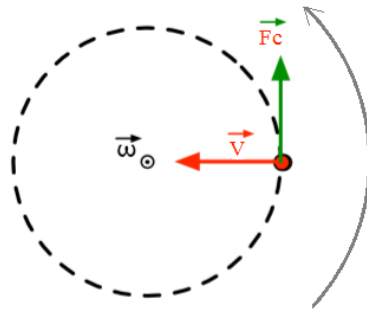


Figure 4-14 Effet Coriolis

Des forces de réaction dites de Coriolis (La force de CORIOLIS « Mathématicien français » explique notamment pourquoi les cyclones tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud et dans le sens inverse dans l'hémisphère Nord) apparaissent dans un tube vibrant traversé par un liquide en mouvement.

La force de Coriolis est calculée par le produit vectoriel de la vitesse de l'oscillation ω et de cette Vitesse V :

$$\vec{F}_C = 2m.(\vec{\omega} \wedge \vec{V})$$

F_C : est générée lorsqu'une masse est simultanément soumise à un mouvement de translation et de rotation (figure 4-15).

- Si le corps s'éloigne de l'axe de rotation, \vec{F}_C s'exerce dans le sens contraire de la rotation.
- Si le corps se rapproche de l'axe de rotation, \vec{F}_C s'exerce dans le même sens que la rotation.

Principe

Un tube de mesure en forme de U est porté à une fréquence de résonance ω par un excitateur électromagnétique. Lorsque le fluide s'écoule dans les tubes avec une vitesse V , il se crée alors des forces de Coriolis (F_{c1} et F_{c2}) qui génèrent une déformation des tubes de mesure.



Figure 4-15 Capteur de débit à effet Coriolis

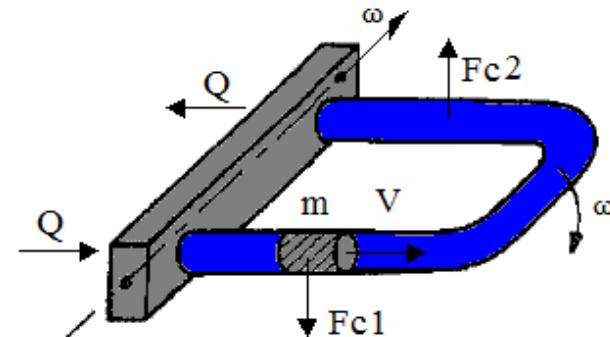
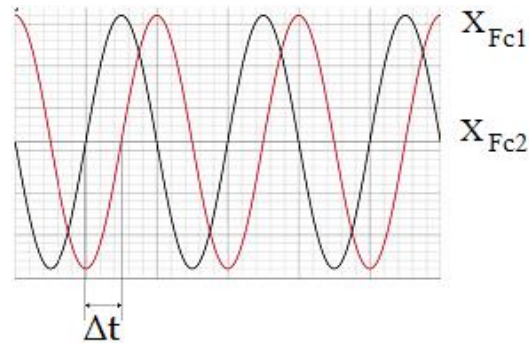


Figure 4-16 Fonctionnement d'un capteur de débit à effet Coriolis

La superposition du mouvement de Coriolis (vibrations) sur l'oscillation initiale montre des déformations de phases opposées, détectée par deux capteurs électromagnétiques.

Cette différence de phase donne une mesure directe du débit massique.

$$\Delta t = k \cdot Q_m$$



Différence de phase due aux forces de Coriolis

- **Domaine d'utilisation** : liquide propre et visqueux (pâtes, boues). Ce dispositif exige l'absence de toute bulle de vapeur formée momentanément dans le liquide et susceptible de perturber la mesure
- **Diamètre de canalisation** : < 13 mm
- **Précision** : 1 %

b. Débitmètres massiques thermiques

Ces débitmètres massiques thermiques exploitent la propriété de transfert calorifique par le fluide lui-même et de l'équilibre thermique entre une source de chaleur et un fluide en écoulement.

Un exemple d'application est donné par la figure suivante.

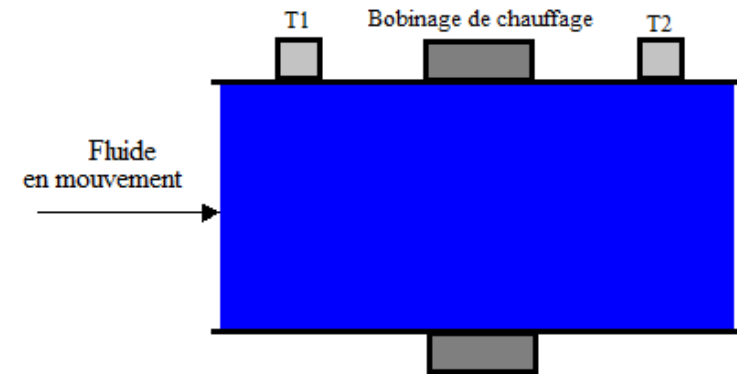


Figure 4-17 Fonctionnement d'un capteur de débit thermique

Deux capteurs de température ($T1$ en amont et $T2$ en aval) sont placés de part et d'autre d'un bobinage de chauffage. En absence d'écoulement, l'échauffement est symétrique et les températures $T1$ et $T2$ sont égales. Sinon, en présence d'un débit, $T1$ diminue et $T2$ augmente ce qui donne naissance à une différence de température ($T2 - T1$) proportionnelle au débit massique du fluide en mouvement.

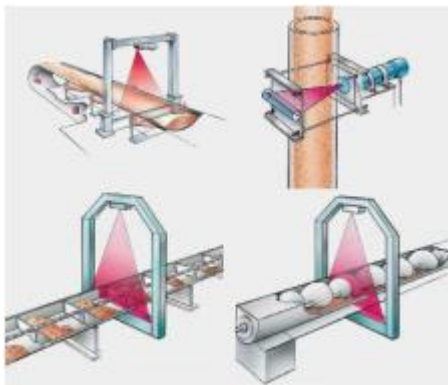
$$\Delta T = T2 - T1 = k \cdot C_p \cdot Q_m$$

Où

- k : une constante qui dépend de la construction et de la capacité calorifique du fluide.
 - C_p : la capacité calorifique du fluide $J.K^{-1}$.
 - Q_m : le débit massique Kg/s .
-
- **Domaine d'utilisation** : liquide propre, gaz, vapeur
 - **Diamètre de canalisation** : tous diamètres
 - **Précision** : de l'ordre de 1 %

c. Débitmètre massique radiométrique

Détermination sans contact du débit massique de matière solide sur des transporteurs en continu. Permet de mesurer le débit instantané et la masse totale cumulée sur une plage de mesure allant de 0 - 200 kg/h à 0 - 10 000 t/h. Utilisation sur transporteurs à bande, à vis, à chaîne, à tablier métallique ou à godets, goulottes et tuyauteries avec produits en chute.



Utilisé pour déterminer avec précision un débit massique de matières solides. La solution radiométrique est la seule méthode applicable pour des types de convoyeurs très différents.

Le système Berthold permet également une mesure de débit en chute sur tuyauterie ou goulotte. Le LB 442 délivre le débit instantané et la masse totale cumulée sur une plage de mesure allant de 0 - 200 kg/h à 0 - 10 000 t/h. L'appareil peut être implanté sur le convoyeur en sortie de trémie, en sortie de chute ou de système de transfert.

Ce principe permet la mesure de fines poudres jusqu'à des fortes granulométries telles que des morceaux de plus de 10 kg.

IV.4 Critères de choix des capteurs de débit

Les critères de choix sont très nombreux, le tableau ci-dessous donne une liste des principaux éléments à considérer.

Caractéristiques du fluide	Nature du fluide (liquide chargé, conducteur...) Viscosité Régime d'écoulement Température Pression Agressivité Compressibilité
Critères métrologiques	Nature du signal de sortie (0-10 V, 4-20 mA...) Dynamique Précision Etendue de mesure Bande passante
Caractéristiques de l'installation	Diamètre de canalisation Perte de charge engendrée Encombrement Etalonnage Usure