

Un fluide en mouvement constitue un écoulement. La description physique d'un écoulement nécessite la mesure des vitesses, des masses volumiques, des pressions, des températures, des viscosités, ...etc. mises en jeu. Ainsi pour la mesure du débit, le meilleur des débitmètres peut donner les résultats les plus invraisemblables s'il n'est pas utilisé dans des conditions "adéquates". L'endroit où il est positionné sur la conduite et les régimes d'écoulement ont en particulier une influence déterminante.

III-1 DEFINITIONS

Débit d'un fluide : C'est la quantité de matière qui traverse une section droite d'une canalisation pendant une unité de temps

Débit volumique ou débit-volume : la quantité de matière s'exprime par son volume et l'unité du Système International (SI) est donc le mètre cube par seconde (m^3/s). Le débit-volume peut être exprimé en fonction de l'aire S de la section de la conduite et de la vitesse moyenne V du fluide sur une section :

$$Q_v = V \cdot S$$

Débit massique ou débit-masse : la quantité de matière s'exprime par sa masse et l'unité SI est donc le kilogramme par seconde (kg/s). Les deux débits Q_v et Q_m sont liés par la relation :

$$Q_m = \rho Q_v$$

où ρ est la masse volumique du fluide (en kg/m^3).

Au cours de son écoulement dans une conduite (sans apport ou sans perte de fluide) le débit-masse Q_m reste constant tout au long de l'installation. Il n'en est pas de même pour le débit volume Q_v , car la masse volumique ρ peut être amenée à varier, avec la température ou la pression par exemple. Supposons que l'on travaille à température constante et que l'on ait une variation de pression, provoquée par exemple par un changement de la section de la canalisation dans laquelle s'écoule le fluide. Dans le cas d'un liquide, la masse volumique ρ est pratiquement indépendante de la pression et le débit-volume varie donc peu. Pour un gaz, il en va tout autrement. La célèbre loi de Mariotte indique en effet que le produit de la pression par le volume d'une masse m de gaz est constant (à une température donnée). Un changement de pression se traduit donc par un changement de volume, donc de la masse volumique du gaz. Conséquence, le débit-volume Q_v n'est pas constant tout au long de la canalisation.

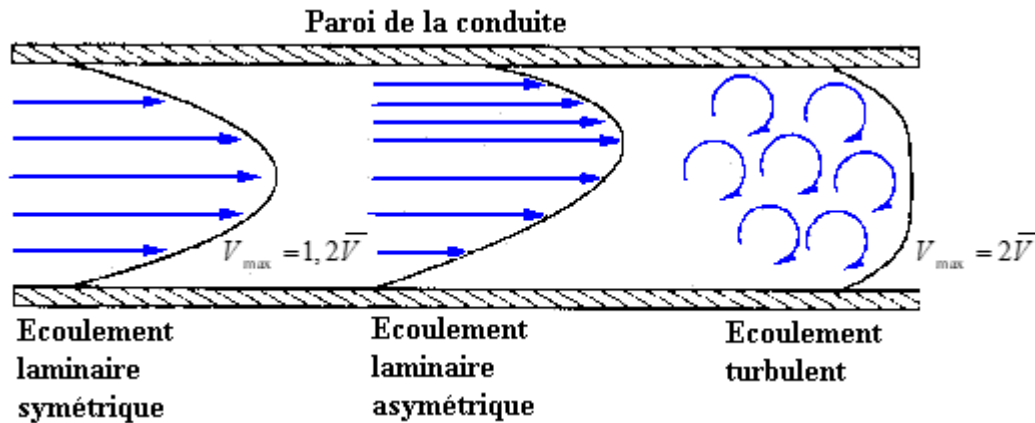
Fluide parfait et fluide visqueux : Dans le cas d'un fluide parfait (ou non visqueux), les forces de frottement d'une particule fluide contre ses proches voisines ou contre les parois sont considérées comme négligeables. L'étude de l'écoulement est alors simplifiée, mais l'écart avec la réalité n'est acceptable que dans trois cas :

- si les vitesses de déplacement sont faibles
- si la viscosité des fluides est faible : c'est le cas des gaz
- si la différence de vitesse entre deux points voisins du fluide est faible : les frottements entre les différentes particules fluides sont alors réduits. C'est le cas de l'écoulement dans une conduite rectiligne, en un point éloigné des parois ou d'un obstacle.

Les fluides réels (ou visqueux) rencontrés en pratique couvrent tous les autres cas. Cette distinction dans la nature du fluide est liée à son mouvement et n'apparaît qu'en dynamique. En statique, elle disparaît et tout fluide est considéré comme parfait.

Écoulement laminaire : les lignes de courant demeurent parallèles entre elles, les couches de fluide glissant les unes sur les autres sans se mélanger. En chaque point, le vecteur vitesse reste fixe tant en direction qu'en grandeur.

Écoulement turbulent : les lignes de courant ne gardent plus leur individualité, mais s'enchevêtrent. Le vecteur vitesse est la somme de deux composantes : la vitesse moyenne qui représente le mouvement global du fluide et une vitesse de fluctuations à caractère aléatoire tant en direction qu'en grandeur.



Nombre de REYNOLDS : Pour faciliter la comparaison entre deux écoulements, on utilise des nombres sans dimension. Ainsi, dans un écoulement incompressible (pression = constante) et isotherme (température = constante), un seul paramètre sans dimension est suffisant pour caractériser l'écoulement, c'est le nombre de REYNOLDS.

$$R = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

dans laquelle :

- ρ est la masse volumique du fluide (kg/m³)
 - V est la vitesse moyenne de l'écoulement (m/s)
 - D est le diamètre de la canalisation (m)
 - μ est la viscosité dynamique du fluide (Pa .s), liée à la viscosité cinématique ν par la relation : $\nu = \mu / \rho$.
- Pour un écoulement donné, la valeur du nombre de Reynolds conditionne le caractère laminaire ou turbulent de l'écoulement. La rupture du régime laminaire se produit à partir de $R = 2320$. Quant au régime turbulent, il intervient au dessus de $R = 3000$.

Loi de Bernoulli : En tout point de l'écoulement d'un fluide, on peut définir la charge H par l'expression

$$H = \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z$$

dans laquelle :

- V est la vitesse moyenne du fluide (m/s) au point considéré
- g est l'accélération de la pesanteur ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
- P est la pression au point considéré (Pa)
- ρ est la masse volumique (kg/m³)
- z est la cote du point considéré.

Cette formule est obtenue en supposant que la température du fluide est constante et qu'il n'y a pas d'échange thermique avec l'extérieur. La charge H représente l'énergie mécanique totale du fluide, mais ramenée à une unité de poids ; elle est donc homogène à une longueur.

Dans l'expression précédente, $V^2/2g$ est son énergie cinétique, $P/\rho g$ s'appelle la hauteur piézométrique du fluide, tandis que $(P/\rho g + z)$ est son énergie potentielle, toujours exprimée par unité de poids du fluide. Lorsque le fluide est incompressible (ρ constant) la charge est conservée entre deux points A et B, ce qui donne :

$$\frac{V_A^2}{2g} + \frac{P_A}{\rho g} + z_A = \frac{V_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\rho g} + z_B$$

La loi de Bernoulli est parfois présentée sous une formulation un petit peu différente. En multipliant par ρg les deux membres de l'équation précédente, on obtient :

$$P_A + \frac{1}{2}\rho V_A^2 + \rho g z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho V_B^2 + \rho g z_B$$

Dans ces expressions :

– P_A et P_B sont les pressions statiques P_S aux points A et B

– $1/2 \cdot \rho V_A^2$ et $1/2 \cdot \rho V_B^2$ sont les pressions dynamiques P_D aux points A et B

– $\rho g z_A$ et $\rho g z_B$ sont les pressions hydrostatiques (pressions dues à l'altitude).

Si la conduite est horizontale, $z_A = z_B$ et la pression hydrostatique n'intervient pas sur l'écoulement.

En chaque point de la conduite, la pression totale P_T est alors constante :

$$P_T = P_S + P_D$$

Autrement dit, l'augmentation de vitesse provoque celle de la pression dynamique au détriment de la pression statique. Et vice-versa.

Pertes de charge : Les pertes de charge sont la diminution de la pression totale entre deux sections d'un écoulement. Elles s'expriment en mètres de colonne d'eau (MCE) et sont fonction de la section du tuyau, du débit véhiculé et de la nature du liquide. Dans un fluide parfait (non visqueux), la loi de Bernoulli traduit la conservation de l'énergie mécanique totale dans un mouvement permanent. On a donc : $H_A = H_B$.

Les points A et B étant situés sur une même ligne d'écoulement à l'intérieur de la conduite.

Dans le cas d'un fluide réel (visqueux), on a : $H_A = H_B + \Delta H$

où ΔH est la perte de charge entre A et B. Elle représente la dissipation d'énergie due aux frottements.

Il existe deux types de pertes de charge : les pertes de charge réparties et les pertes de charge locales. Comme leur nom l'indique, les premières sont réparties le long de la conduite. Quant aux pertes de charge locales, elles sont dues à la présence d'un étranglement ou d'un coude sur la conduite, ou encore d'un obstacle à l'intérieur de celle-ci (vanne, plaque à orifice d'un débitmètre à organe déprimogène, etc.)

III-2 MESURE DE DEBIT

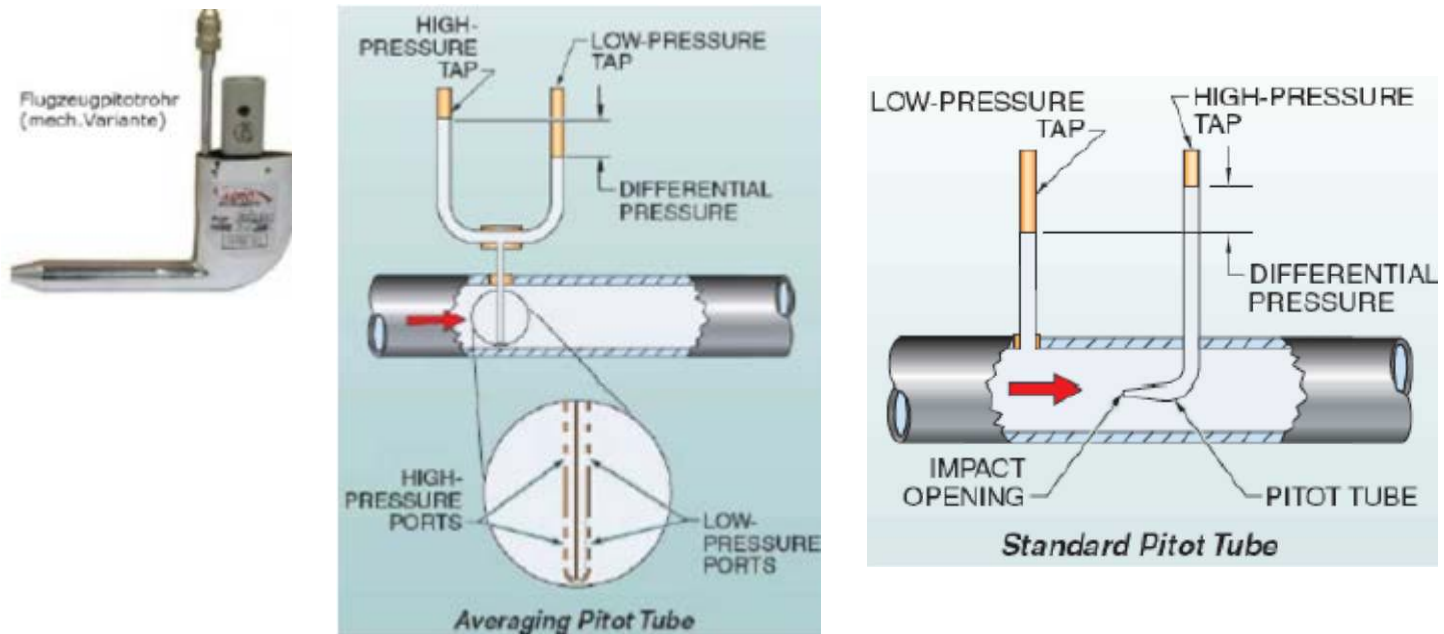
Le débit est habituellement mesuré par déduction. En reprenant l'équation : $Q_v = S \cdot V$ en remarque que pour mesurer le débit volumique, on peut soit mesurer la vitesse moyenne à travers une section connue, soit mesurer la section à vitesse constante. On peut aussi mesurer directement le volume écoulé par unité de temps.

Dans certaines applications nécessitant la connaissance de l'énergie thermique d'un combustible, il est nécessaire de connaître le débit massique. On a recours alors à des débitmètres massiques, dont la valeur mesurée est directement le débit massique. Cependant, bon nombre de débitmètres prétendent " massiques ", déduisent le débit massique à l'aide de l'équation : $Q_m = \rho \cdot Q_v$.

III-2-1 PAR MESURE DE VITESSE

a) Le Tube de Pitot

On a vu que la pression dynamique P_D d'un fluide s'exprimait par la relation : $P_D = \frac{1}{2} \rho V^2$ et d'autre part que la pression totale P_T était la somme de la pression dynamique P_D et de la pression statique P_s . Le tube de Pitot permet de mesurer simultanément la pression statique et la pression totale en un point de la canalisation. Connaissant ces deux grandeurs, on accède à la pression dynamique et donc à la vitesse du fluide. Cette méthode permet donc de trouver la vitesse en un point de la canalisation. Pour en déduire le débit, il faudrait connaître le profil des vitesses sur une section de la canalisation, ce qui n'est pas toujours facile.



Propriétés

- Domaine d'utilisation : liquides propres ainsi que pour la mesure de débit de gaz où la différence entre la vitesse moyenne d'écoulement et la vitesse au centre n'est pas aussi importante qu'avec les autres fluides.
- Ne convient pas aux fluides visqueux
- Ils sont facilement bouchés par des corps étrangers présents dans le fluide (ne convient pas aux liquides ayant des particules en suspension)
- Diamètre de canalisation : à partir de 300 mm et jusqu'à 3,8 m
- Conduite linéaire sur 10D en amont et 5D en aval
- Précision : 0,5 à 2 % de la valeur réelle
- dynamique : 1-4

b) Débitmètres à organes déprimogènes

Ces débitmètres de type manométrique sont les plus utilisés pour la mesure des débits de fluide. Ils exploitent la loi de BERNOULLI qui montre la relation entre le débit et la perte de charge résultant d'un changement de section de la conduite. En partant de la relation $Q_v = S \times V$ et en supposant une masse volumique constante (fluide incompressible), on peut écrire l'équation de continuité : $Q_v = S_1 \times V_1 = S_2 \times V_2$. Celle-ci montre qu'avec un écoulement régulier et uniforme, une réduction de diamètre de la canalisation entraîne une augmentation de la vitesse du fluide, donc une diminution de l'énergie potentielle ou de la

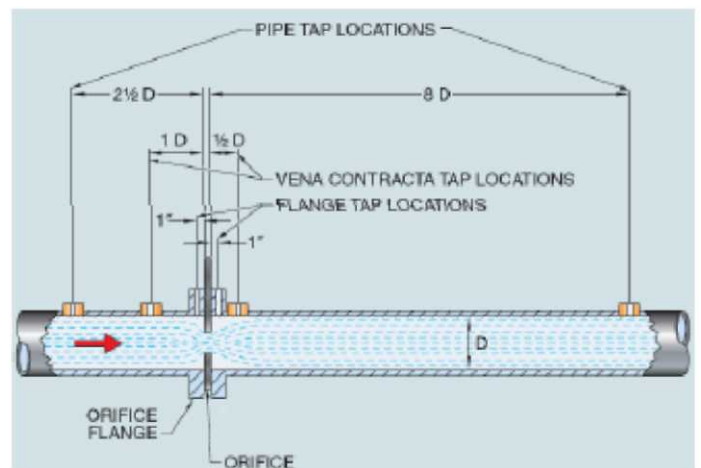
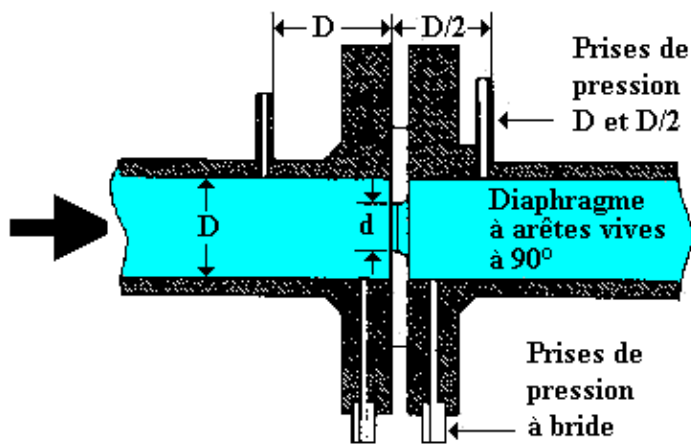
pression de la canalisation. Le débit-volume est alors obtenu à partir de $Q_v = K \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$

Où :

- P_1 est la pression en amont de l'organe déprimogène
- P_2 est la pression au niveau de la section contractée
- ρ est la masse volumique du fluide
- K est un coefficient. Dans le cas des liquides, ce coefficient ne dépend que du type d'organe déprimogène utilisé, et des caractéristiques géométriques de celui-ci. Dans le cas des gaz, les choses sont plus complexes car ce coefficient dépend en plus des caractéristiques physiques du gaz et même de l'écart de pression

La mesure du débit se réduit alors à la mesure de la différence de pression Δp du fluide qui apparaît entre deux points situés en amont et en aval de l'étranglement de la conduite. Les organes déprimogènes les plus connus sont le diaphragme, la tuyère et la venturi.

Diaphragme : Il s'agit d'un disque percé en son centre, réalisé dans un matériau compatible avec le liquide utilisé. Le diaphragme concentrique comprime l'écoulement du fluide, ce qui engendre une pression différentielle de part et d'autre de celui-ci. Il en résulte une haute pression en amont et une basse pression en aval, proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement. C'est le dispositif le plus simple, le moins encombrant et le moins coûteux.



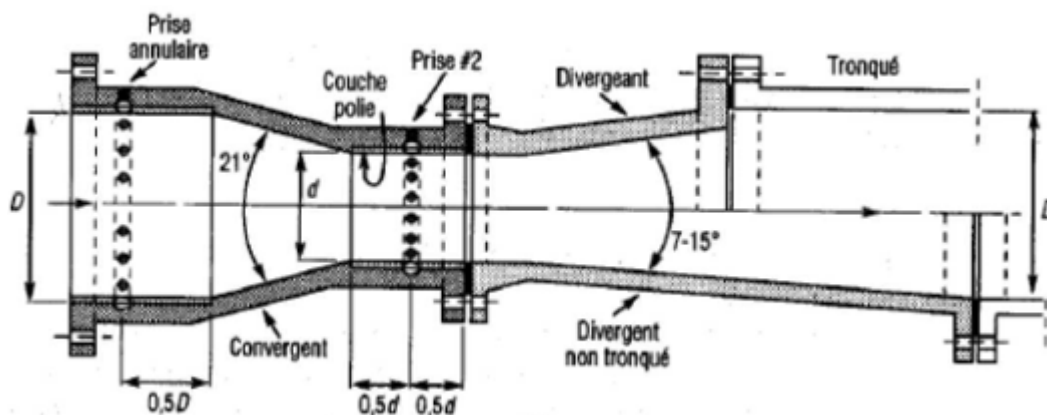
- Piquées sur la conduite : $D-0,5D$ ou $2,5D-8D$.
- Domaine d'utilisation : ne convient pas aux liquides contenant des impuretés solides car celles-ci peuvent s'accumuler à la base du diaphragme.
- Il introduit une perte de charge importante 40 à 70 %.
- Très reproductibles et fidèles.
- Pas de limite de diamètre.
- Assemblage fort simple.
- Précision : 0,2 à 5 %.
- Dynamique : 1-4.
- Exigent $Re > 10\,000$.

Valeurs recommandées pour le rapport des sections β : de 0,2 à 0,7

D	β	Re minimal	Re maximal
< 100 mm	< 0,5	10000 à 15 000	10^6
	> 0,5	20 000 à 45 000	10^6
> 100 mm		> 45 000	10^7

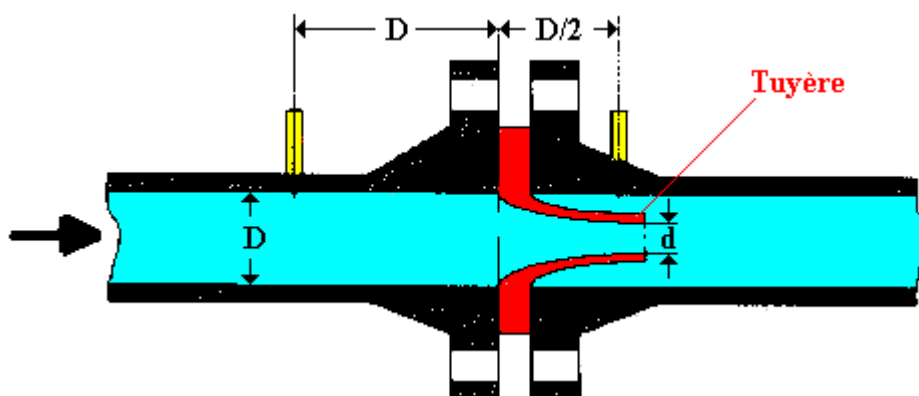
Venturi : Il est constitué d'un tronc de cône convergent, d'un col cylindrique et d'un tronc de cône divergent. Le dispositif offre une bonne précision, mais reste coûteux et encombrant. Il dispose d'un bon comportement

du point de vue perte de charge, usure et encrassement. Comme avec le diaphragme, les mesures de pression différentielle sont converties en débit volumique.



- Domaine d'emploi : liquide propre, gaz et vapeur avec matières en suspension.
- Utilisées dans des conduites de 25 à 3000 mm.
- Encombrants et coûteux.
- Exigent $Re > 150\,000$.
- Précision : 0,5 à 3 % selon les cas.
- Perte de charge de 10 à 14 %.

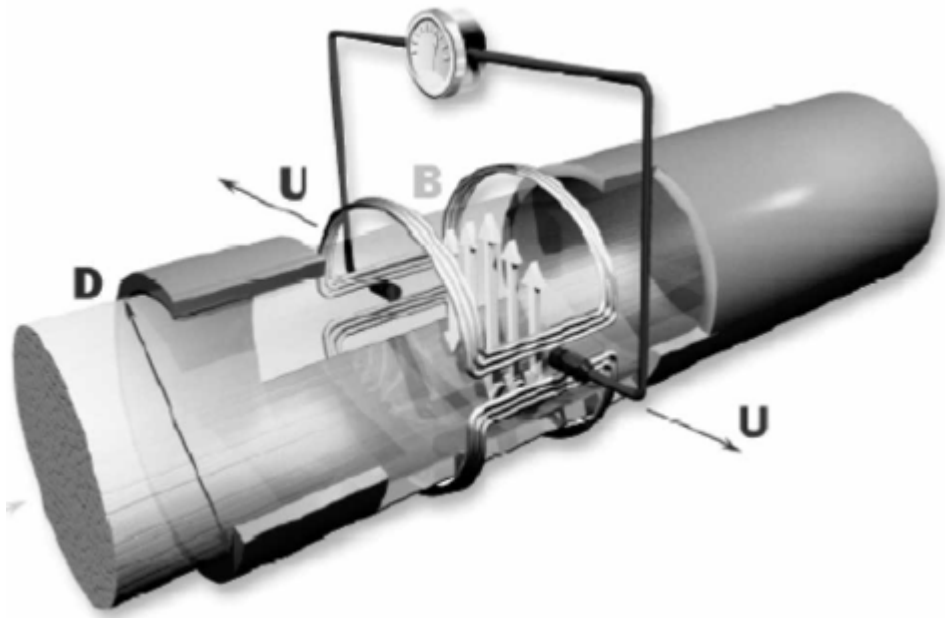
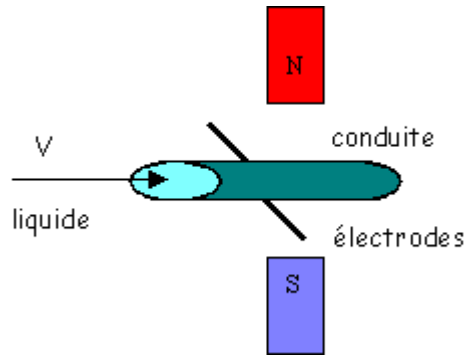
Tuyère : Elle est considérée comme une variante du tube de VENTURI. L'orifice de la tuyère constitue un étranglement elliptique de l'écoulement, sans section de sortie rétablissant la pression d'origine. Les prises de pression sont situées environ $\frac{1}{2}$ diamètre de la conduite en aval et 1 diamètre la conduite en amont. La perte de charge se situe entre celle d'un tube de VENTURI et celle d'un diaphragme.



- Domaine d'utilisation : pour les turbulences importantes ($R > 50\,000$), notamment dans les écoulements de vapeur à haute température. Ce dispositif est inutilisable pour les boues.
- Fluides avec matières en suspension.
- Perte de charge de 5 %.
- Exigent $Re > 50\,000$.
- Utilisées dans des conduites de 25 à 1500 mm.
- Précision : 0,7 à 3 %.
- Dynamique : 1-4.

c) Débitmètre électromagnétique :

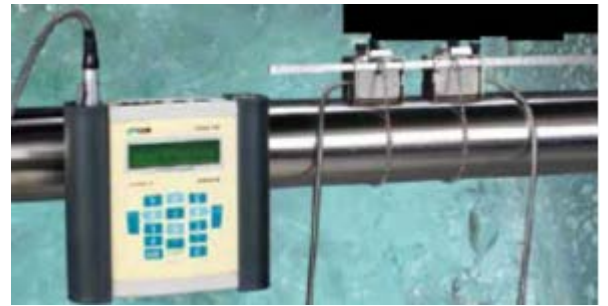
Il utilise la loi de Faraday : Quand un conducteur rectiligne se déplace dans un champ magnétique, une force électromotrice est induite dans ce conducteur. Un champ magnétique est créé par deux enroulements inducteurs placés de part et d'autre d'un même diamètre de la canalisation. Le conducteur est le fluide lui-même qui circule dans une canalisation isolée électriquement à l'intérieur. La force électromotrice est mesurée par deux électrodes au contact avec le liquide et placées aux deux extrémités d'un diamètre perpendiculaire aux lignes d'induction. La force électromotrice mesurée est proportionnelle à la vitesse moyenne du liquide, donc au débit volumique du liquide. Le signal de sortie à une amplitude de quelques millivolts et indique également le sens de l'écoulement.



- Domaine d'utilisation : liquide visqueux, pâteux, chargés d'impuretés, abrasifs ou très corrosifs à condition qu'ils soient conducteurs de l'électricité (ce qui n'est pas le cas des hydrocarbures).
- Diamètre de canalisations : 3 mm à 3 m.
- Position horizontale, verticale ou oblique. Si verticale, débit du bas vers le haut ; si horizontale, électrodes dans le plan horizontal.
- Pas de longueur de conduite rectiligne exigé
- Mesure ne dépendant pas des caractéristiques physiques du liquide (viscosité, densité, granulométrie) et possible à haute température (450 °C) et haute pression (1000 bars).
- Échelle très linéaire.
- Mesure en régime laminaire ou en régime turbulent.
- Perte de charge nulle.
- Vitesse d'écoulement > 1 m/sec.
- Exige un liquide conducteur.
- Tension générée : 12 mV à 3 l/s (25 mm) ; 7 mV à 0,5 m³/s (300 mm).
- Bonne précision de l'ordre de 1 % (limitée pour les faibles vitesses d'écoulement).
- Rangeabilité de 20:1.

d) Débitmètre à ultrasons

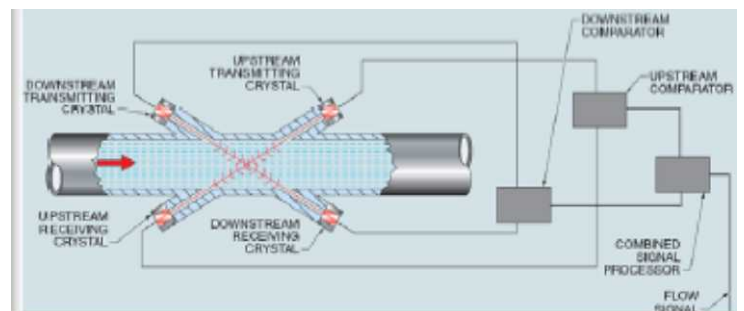
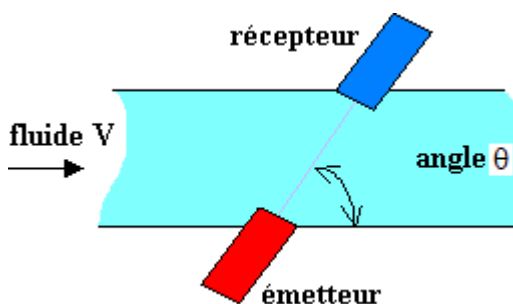
- Peuvent être fixes ou portables.
- Mesure non intrusive «Clamp-On»
- Liquides clairs ou charges, gaz secs ou humides.
- Idéal pour pré localisation de fuites.
- Températures extrêmes : de -200 à +500 °C
- diamètre de canalisations : généralement important (3 à 5000 mm).
- Conduites acier, inox, fonte, SVR, matériaux plastiques même entartrées.
- domaine d'utilisation : fréquemment utilisé pour les écoulements turbulents, pour les fluides non conducteurs (hydrocarbures), là où les débitmètres électromagnétiques ne conviennent pas.



Les débitmètres à ultrasons utilisent deux techniques

- ✓ À temps de parcours 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



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.

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

c : vitesse de propagation du son dans le fluide

v : vitesse du fluide

l : distance entre émetteur et récepteur

La mesure par différence de temps de parcours est la plus simple à utiliser. Ainsi pour une mesure diagonale dans un tube, le temps de mesure est inférieur si elle est faite dans le sens du courant plutôt qu'à contrecourant. La différence entre les durées d'écoulement dans le sens du courant et à contrecourant, dépend directement de la vitesse du flux.

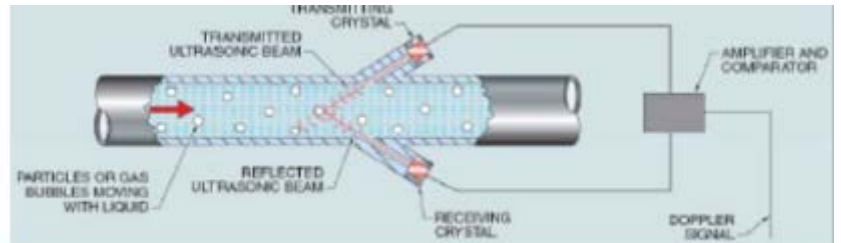
$$t_{AB} = \frac{l}{c+v \cos(\theta)} ; t_{BA} = \frac{l}{c-v \cos(\theta)} \Rightarrow v = \frac{t_{BA}-t_{AB}}{t_{AB}t_{BA}} * \frac{l}{2 \cos(\theta)}$$

Il est primordial que le fluide soit propre et le plus homogène possible, 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.

- Échelle linéaire et réponse instantanée (1 ms).
- Débits de 0.03 à 30 m/s.
- 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 autour de 7 Mhz.
- Rangeabilité élevée 20:1 ou plus.
- Précision : peut atteindre 0,5 %.

Principe du débitmètre à effet Doppler

L'effet Doppler est le décalage de fréquence d'une onde (mécanique, acoustique, électromagnétique ou d'une autre nature) observé entre les mesures à l'émission et à la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.



Le débitmètre à effet Doppler analyse la fréquence de l'ultrason qui est « réfléchi » par une particule du fluide. Pour que le débitmètre fonctionne donc, il doit y avoir des particules solides ou des bulles d'air dans le fluide afin de refléter le faisceau ultrasonique. La variation de fréquence est une image de la vitesse de la particule, et donc du fluide.



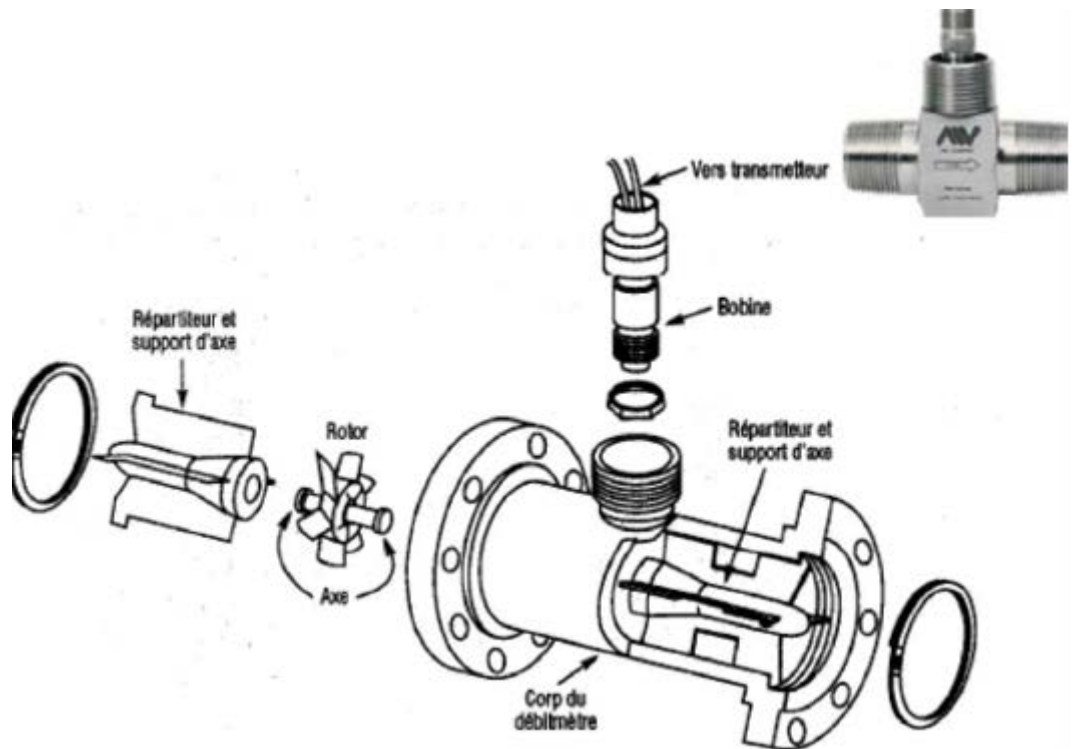
Vitesse d'écoulement :

$$v = K \Delta f$$

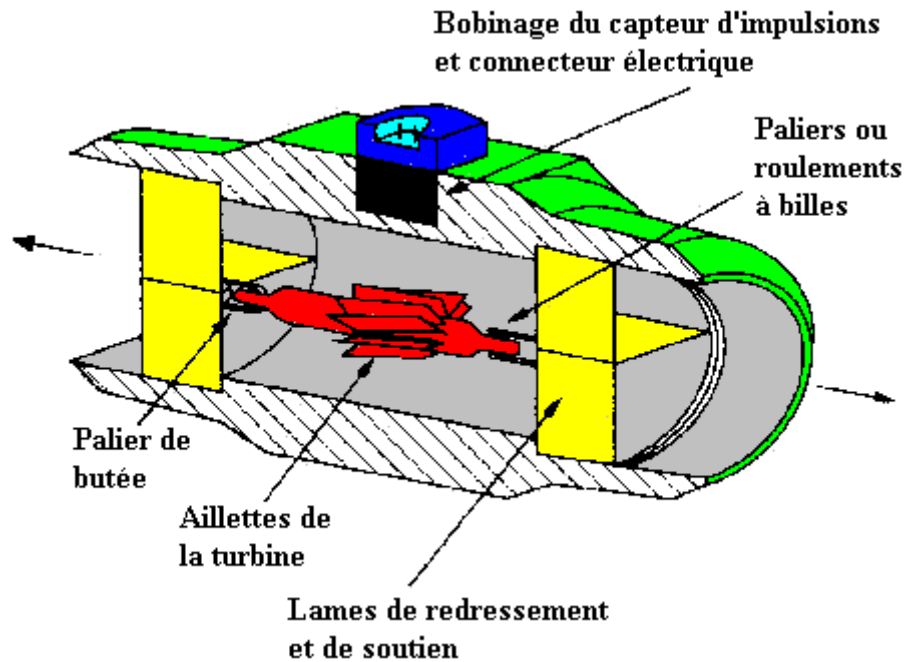
- Méthode destinée aux fluides contenant des bulles ou des matières en suspension (entre 2 et 60 % de matière solide).
- Précision de l'ordre de $\pm 3 \%$.

f) Débitmètre à turbine

L'écoulement du fluide entraîne la rotation d'une turbine (rotor à plusieurs ailettes, reposant sur des paliers) placée dans la chambre de mesure, la vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à celle du fluide, donc au débit volumique total. La vitesse de rotation est mesurée en comptant la fréquence de passage des ailettes détectée à l'aide d'un bobinage (un aimant permanent est parfois solidaire de l'hélice). Chaque impulsion représente un volume de liquide distinct.



- domaine d'utilisation : compatible avec de nombreux liquides (rotor en acier inoxydable). Toutefois la propreté du liquide est essentielle, afin de ne pas encombrer les paliers de butée du rotor qui peut tourner à haute vitesse. De par leur principe ils sont réservés aux fluides peu visqueux, exempt de bulles ou de matières granuleuses. Ils sont destinés aux applications industrielles générales (eau, alcools, carburants, acides, gaz liquéfiés, liquides cryogéniques...)
- Diamètre de canalisations : 5 mm à 60 cm environ.
- É.M. de 25 L/h à 10 000 m³/h.
- Perte de charge non-nulle (≈ 15 kPa).
- Conduite rectiligne : amont 10D ; aval 5D.
- Temps de réponse : plusieurs millisecondes.
- Rangeabilité de 10:1 à 100:1.
- Précision : 0,1 à 2 % de l'étendue de mesure, selon les appareils.



g) Débitmètre à effet Vortex

Le principe est basé sur le phénomène de génération de tourbillons, appelé effet Karman. Lorsque le fluide rencontre un corps non profilé, il se divise et engendre des tourbillons, de part et d'autre et en aval de l'obstacle. Le nombre de tourbillons formés en aval par unité de temps est proportionnel au débit moyen. Une vitesse précise d'écoulement du fluide est déterminée par le comptage des tourbillons. Cette vitesse est mesurée à l'aide d'un capteur sensible aux variations oscillatoires de pression.

Vitesse du fluide :

$$v = \frac{f_t \cdot d}{S_t} = \frac{f_t}{k}$$

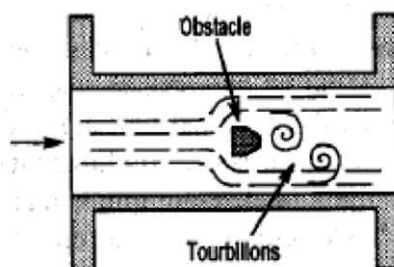
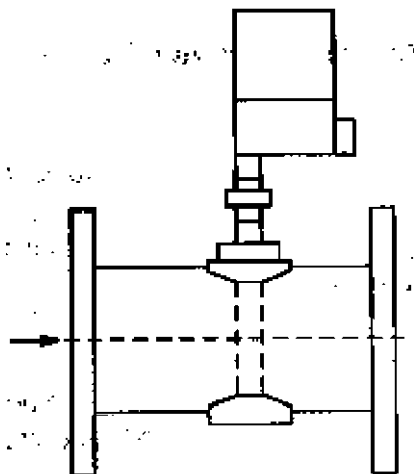
S_t = Nombre de Strouhal

v = Vitesse d'écoulement

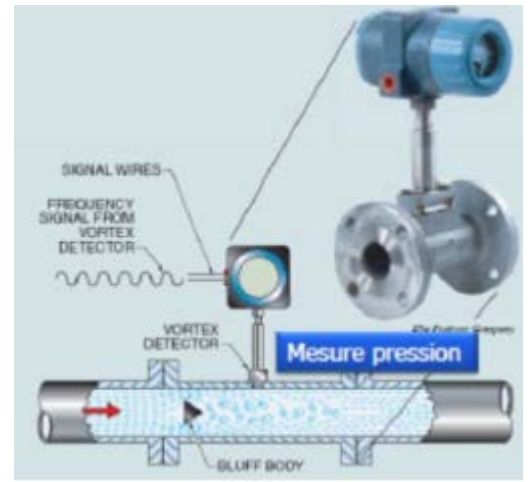
d = Largeur du corps perturbateur

f_t = fréquence des tourbillons

Le facteur K dépend du nombre de REYNOLDS, mais est pratiquement constant sur une vaste plage de débit.



- Capteur simple et robuste.
- Insensible aux variations de pression, masse volumique, température et viscosité
- Domaine d'utilisation : Il est destiné au liquide propre, gaz ou vapeur et non recommandé pour la mesure de faibles débits.
- Il entraîne une perte de charge, supporte des vitesses de fluide importantes.
- Diamètre de canalisations : 12 à 600 mm.
- Temps de réponse très court (millième de sec).
- Nombre de Reynold entre 10 000 à 300 000.
- Perte de charge élevée (30 kPa).
- Doit avoir une conduite rectiligne de 10D en amont et 5D en aval.
- Grande dynamique de mesure : 10:1 à 30:1 pour les gaz/vapeur, ou jusqu'à 40:1 pour les liquides
- Précision : 0,5 %.



III-2-2 PAR MESURE DE SECTION

Débitmètre à flotteur rotatif (Rotamètre)

Il est constitué d'un petit flotteur placé dans un tube conique vertical. Le flotteur est en équilibre sous l'action de :

- Son poids : $m \cdot g$
- La force de poussée d'Archimède : $\rho \times g \times \text{volume du flotteur}$
- De la poussée du liquide (force de trainée) : $\rho \frac{A_f \cdot C \cdot V^2}{2}$

Le débit est obtenu à partir de :

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

M : masse du flotteur en kg.

V : vitesse du fluide en m/s.

C : coefficient de traînée du flotteur (sans unité).

A_f : Aire - section maximale du flotteur en m².

V_f : Volume du flotteur.

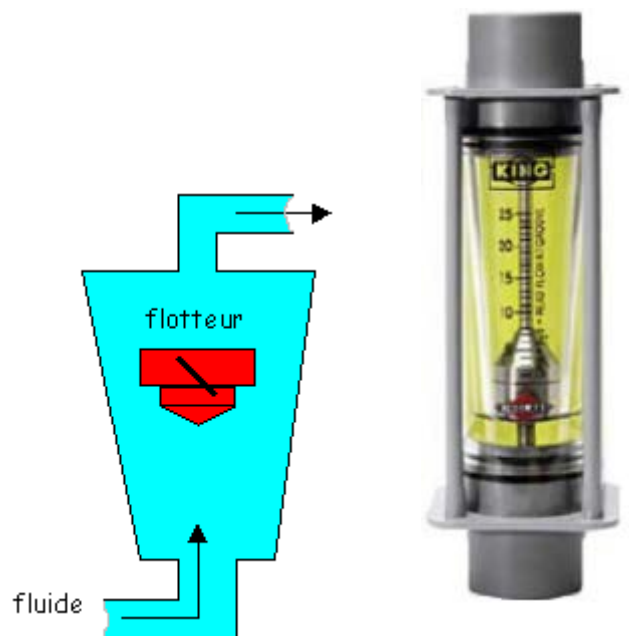
ρ_f : Densité du flotteur.

ρ : masse volumique du fluide en kg/m³.

g : 9.81 m/s²

A : Aire de passage du liquide autour du flotteur.

K_1 : Constante.



Le diamètre du tube en verre étant plus grand en haut qu'en bas, le flotteur reste en suspension au point où la différence de pression entre les surfaces supérieure et inférieure en équilibre le poids. Une encoche dans le flotteur le fait tourner sur lui-même et stabilise sa position. Le repérage de la position du flotteur se fait par lecture directe sur le tube en verre qui est muni de graduations ou par l'intermédiaire d'un couplage optique ou magnétique entre le flotteur et l'extrémité du tube. Il introduit une perte de charge qui est fonction du débit et doit être étalonné dans ses conditions d'emploi.

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.

- Domaine d'utilisation : Il ne tolère pas de haute pression (20 bars au maximum pour les modèles en verre). Souvent utilisés pour les débits de purge
- Diamètre de canalisation : 4 à 125 mm
- Longueur de conduite rectiligne en amont : 5D.
- Sensible aux variations de masse
- Impossible de mesurer des débits puisés
- Échelle de mesure fonction du fluide.
- Rangeabilité de 10:1
- Précision : 2 à 10 % de l'étendue de mesure

III-2-3 COMPTEURS VOLUMETRIQUES

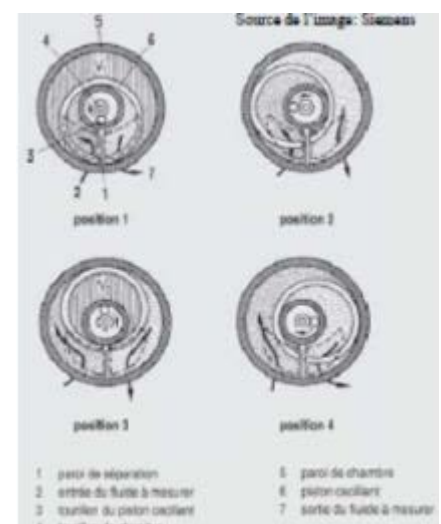
Ils mesurent le volume écoulé Q_v directement, en emprisonnant de façon répétée un volume élémentaire de fluide. Le volume total de liquide traversant le débitmètre pendant un laps de temps donné est le produit du volume élémentaire par le nombre d'emprisonnements. Ces appareils totalisent souvent le volume directement sur un compteur intégré, mais ils peuvent également délivrer une sortie impulsions qui peut être transmis sur un afficheur. Ils en existent plusieurs types selon le corps d'épreuve utilisé, à piston rotatif, à piston alternatif, à palettes (ou rotors), à double roues ovales, à double roues en huit ou à disque oscillant.



- Domaine d'utilisation : eau, acides, lubrifiants (surtout pas les boues...).
- Éviter les particules solides > 100 microns.
- Diamètre de canalisation : 10 à 300 mm.
- Généralement montés sur des conduites horizontales.
- Le signal de sortie est une oscillation dont la fréquence est proportionnelle au débit.
- Précision : 1 %.
- Rangeabilité de 10:1 à 25:1 selon modèle.

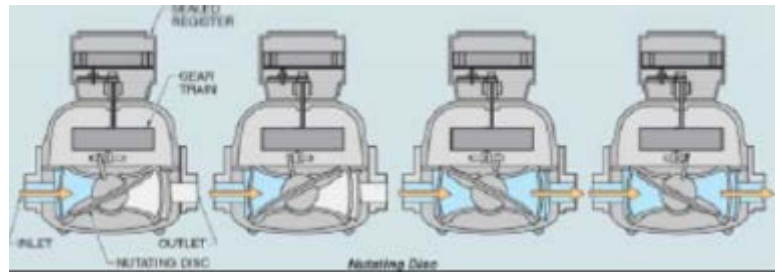
a) Compteurs à piston rotatif

- Débit max 40 m³/h
- Non recommandé si matières en suspension, ni si matières abrasives.
- Rangeabilité de 20:1.
- Fidélité de ± 0.001 %.
- Précision de ± 0.1 %.



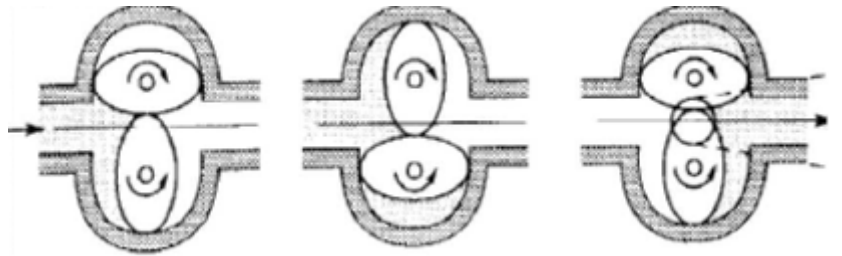
b) Compteurs à disque oscillant

- Utilisé comme compteur d'eau.
- Débit max: 40 m³/h.
- Précision: +/- 0.5 %.
- Rangeabilité de 10:1



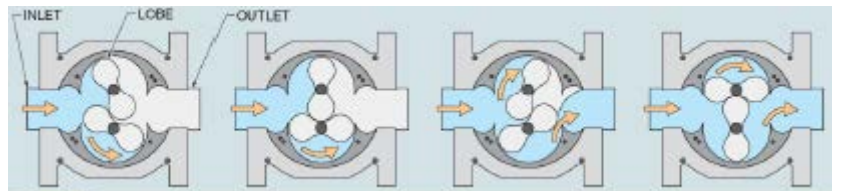
c) Compteurs à double roue ovale

- Grande perte de charge.
- Débit max : 1600 m³/h.
- Rangeabilité de 10:1 à 25:1.
- Précision: +/- 0.2 à 0.5 %.



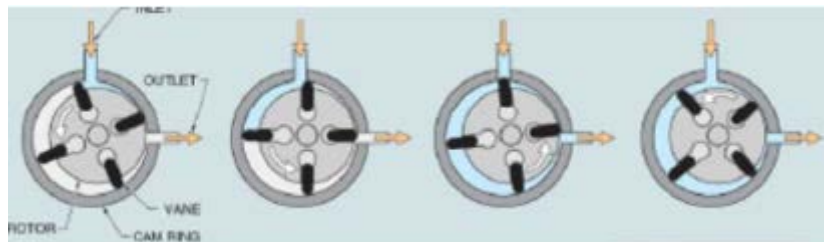
d) Compteurs à double roue en huit

- Débit max : 1500 m³/h.
- Rangeabilité 10:1.



e) Compteurs à palettes

- Précision : 0,3 %



III-2-4 DEBITMETRES MASSIQUES

a) Débitmètre massique thermique

Le principe est basé sur la mesure des transferts calorifiques par le fluide lui-même. Ces dispositifs sont constitués d'un tube métallique à paroi mince, des résistances chauffantes sont bobinées à l'extérieur du tube, la circulation du fluide provoque un déséquilibre thermique entre l'amont et l'aval du tube, le déséquilibre est proportionnel au débit massique.

Mesure de capacité thermique

On mesure la puissance électrique p fournie à une résistance chauffante pour augmenter la température du fluide d'une certaine valeur $\Delta\theta$ (quelques degrés).

$$p = Q_m \cdot C_p \cdot \Delta\theta$$

La connaissance de p , de $\Delta\theta$ et de la capacité calorifique C_p du fluide permettent donc de connaître le débit massique Q_m .

Il est nécessaire que toute la masse du fluide soit uniformément chauffée. Par ailleurs cette méthode n'est réalisable que pour de faibles débits, quelques dizaines de grammes par heure.

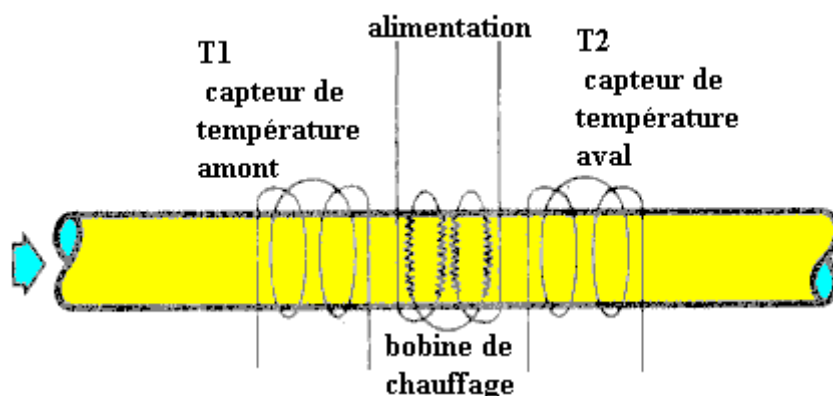
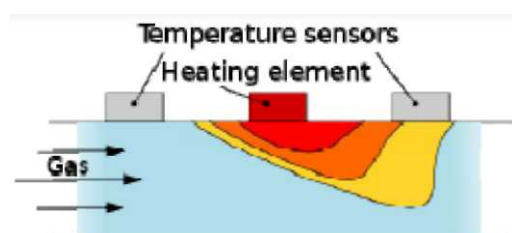
Mesure de transfert thermique par convection

Une résistance chauffante verra son énergie dissipée par transfert thermique de type convectif avec le fluide en écoulement. Plus la vitesse du fluide autour de la résistance sera importante, plus l'échange d'énergie sera grand. Deux fonctionnements sont possibles. Soit la puissance est imposée et l'on mesure l'écart de température entre la résistance et le fluide. Soit l'écart de température est imposé et l'on règle la puissance électrique par l'intermédiaire d'un régulateur.

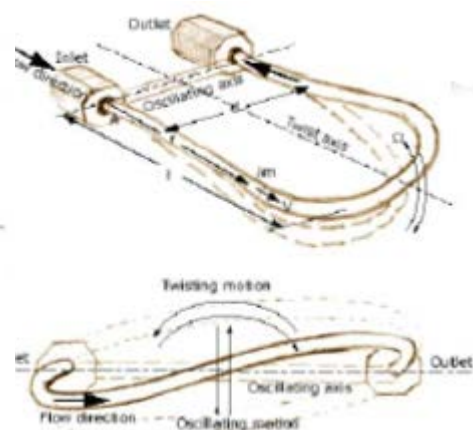
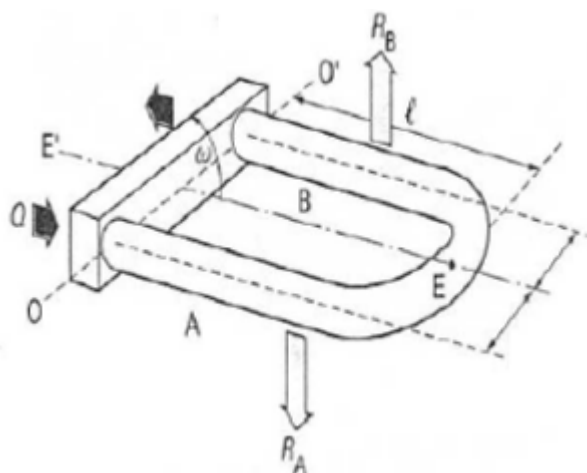
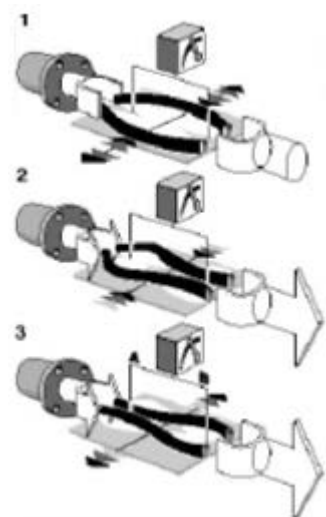
En écoulement turbulent : $p = Q_m \cdot 0,8 \cdot k \cdot \Delta\theta$

où p est la puissance dissipée et k une constante dépendant de la construction et de la capacité calorifique du fluide. Ce débitmètre s'applique aux débits élevés et il doit être dimensionné selon le débit à mesurer.

- Domaine d'utilisation : liquide propre, gaz, vapeur.
- Diamètre de canalisation : tous diamètres.
- Précision : de l'ordre de 1 %.
- É.M. de 0.5 gr/m à 20 000 kg/h.
- Rangeabilité de 20:1.



b) 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.

Lorsqu'un objet est soumis à la fois à une rotation et à une translation il subit une accélération dite de Coriolis

$$a_c = 2\omega \wedge v_t$$

où ω est le vecteur de rotation (vitesse angulaire) et v_t le vecteur vitesse de translation (vitesse radiale dans le système oscillant ou en rotation).

Cette objet subit donc une force dite de Coriolis

$$F_c = ma_c = 2m\omega \wedge v_t$$

m = masse du corps en déplacement

Le débitmètre utilise un système qui met en rotation une portion de masse m du liquide qui s'écoule dans la canalisation. La connaissance de la vitesse de rotation ω et la mesure de $F_c = 2m(\omega \cdot v_t)$ permettent alors d'accéder directement à mv_t puis à la valeur du débit massique

Avantages :

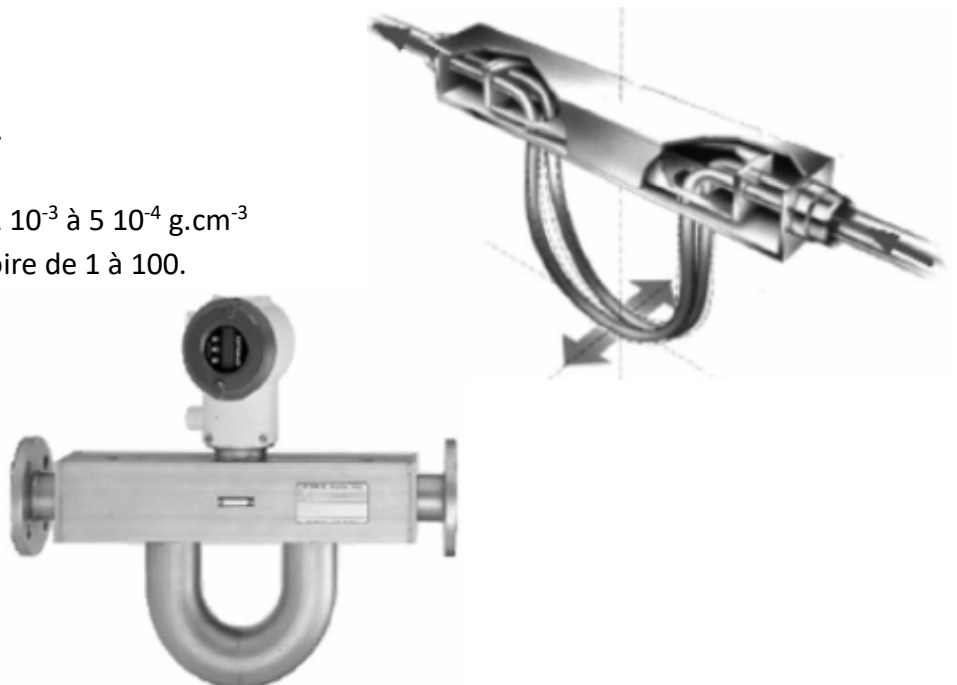
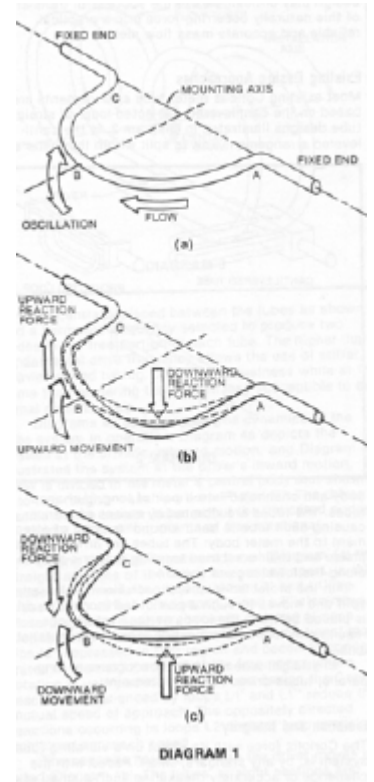
- Signal délivré relativement indépendant de la viscosité, de la densité, de la pression et de la température du fluide
- Signal directement proportionnel au débit massique (réponse linéaire)
- Faible erreur (inférieure à 0.3 %)
- Utilisable aussi pour les gaz dont la masse volumique dépasse 200 kg/m³
- Utilisable pour tous les liquides et particulièrement intéressant pour les produits à forte viscosité, corrosifs, sujet à dépôt et peu tolérants à l'agitation (produits alimentaires), multi phase liquide (si mélange homogène) et fluide non newtonien
- Délivre la densité en ligne et souvent la température

Inconvénients :

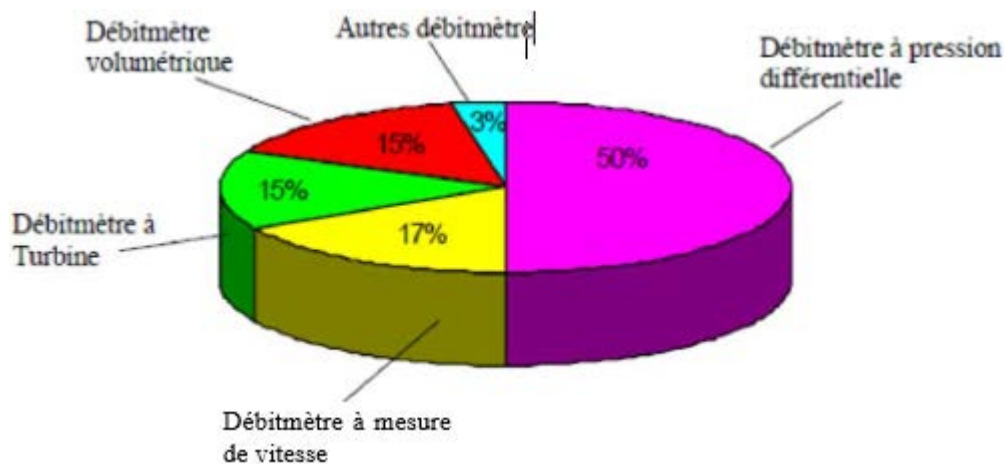
- débitmètre le plus cher.
- sensible aux vibrations du support et aux microcoupures électriques

Bilan :

- Vitesse du fluide de 0.1 à 10 m/s.
- Débit de 0.1 kg/min à 3000 kg/min.
- Diamètre de 1 à 200 mm.
- Erreur sur la masse volumique de $2 \cdot 10^{-3}$ à $5 \cdot 10^{-4}$ g.cm⁻³
- Dynamique de mesure de 1 à 50 voire de 1 à 100.
- Rangeabilité 20:1



III-3 Choix des débitmètres



Par type de fluide

DEBITMETRES	LIQUIDE						GAZ	
	Propre	Chargé	très chargé	Visqueux	conducteur	polyphasique	Propre	Chargé
Diaphragme								
Venturi	+	+/-	+/-				+	+/-
Débitmètre à flotteur	+	+/-		+/-			+	
Compteur volumétrique	+	+		+			+	
Electromagnétique	+	+	+	+	+	+		
Vortex	+	+					+	
Ultrason	+	+	+	+/-				
Coriolis	+	+	+			+	+/-	+/-
Thermique	+							+

Par performance de mesure

DEBITMETRES	Précision	Dvn a inique	Perte de chaire
Diaphragme	0,7 à 2%	3/1	50 à 90% de ΔP_{mes}
Venturi	0,7 à 1,5%	3/1	10 à 20% de ΔP_{mes}
Débitmètre à flotteur	0,5 à 5%	10/1	0,0025 à 0,5 bar
Compteur volumétrique	0,5 à 1%	20/1 à 50/1	très variable
Electromagnétique	0.5 à 1%	10/1	Négligeable
Vortex	0,75 à 1,5%	10/1	idem diaphragme
Ultrason	1 à 5%	10/1 à 40/1	Négligeable
Coriolis	0,2 à 0,4 %	25/1	0,004 à 2bar
Thermique	1%	10/1	Faible

En fonction des contraintes d'installation

DEBITMETRES	Longueur droite amont	Diamètre disponible	Température	Pression maximale
Diaphragme	10 à 30D	0,025 à 1 m	-20 à 500°C	150 bar
Venturi	5 à 10D	0,05 à 1.2 m	-200 à +200°C	150 bar
Débitmètre à flotteur	0	0,004 à 0,12 m	-260 à +400°C	40 à 450 bar
Compteur volumétrique	0	0,003 à 0,3 m	-30i+30(re	400 bar
Electromagnétique	5D	0,002 à 2,6 m	-30 à +180°C	250 bar
Vortex	15 à 25D	0,015 à 0,3 m	-200 à +400°C	300 bar
Ultrason	5 à 20D	0,025 à 4 m	-200 à +200°C	300 bar
Coriolis	0	0,001 à 0,15 m	-240 à +200°C	400 bar
Thermique	0	0,003 à 0,12 m	-20 à +180°C	400 bar

En fonction des couts

DEBITMETRES	Coût d'achat	Coût d'installation	Coût de maintenance
Diaphragme		+ / ++	+ / ++
Venturi	++	+	
Débitmètre à flotteur		-	
Compteur volumétrique	++	++	++
Electromagnétique	++	++	+
Vortex	+	- / +	- / +
Ultrason	+	-	
Coriolis	+++	++	- / +
Thermique	+	- / +	+