

## IV MESURE DE DEBIT

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.

### IV-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  $\rho$  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  $\rho$  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  $\rho$  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 :

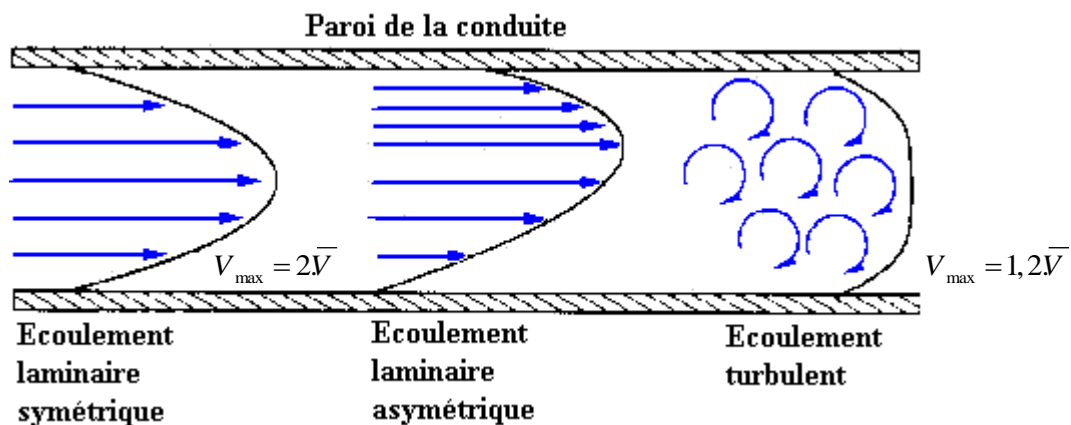
- si les vitesses de déplacement sont faibles
- si la viscosité des fluides est faible : c'est le cas des gaz

- 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.

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

dans laquelle :

- $\rho$  est la masse volumique du fluide (kg/m<sup>3</sup>)
- $V$  est la vitesse moyenne de l'écoulement (m/s)
- $D$  est le diamètre de la canalisation (m)
- $\mu$  est la viscosité dynamique du fluide (Pa .s), liée à la viscosité cinématique  $\nu$  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)
- $\rho$  est la masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ )
- 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 ( $\rho$  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  $\rho g$  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  $\Delta H$  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.)

## IV-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 :  $Q_m = \rho \cdot Q_v$ .

### IV-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.

- domaine d'utilisation : liquides propres ou visqueux 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. 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
- précision : 1 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 :  $Q_v = S_1 \times V_1 = S_2 \times V_2$

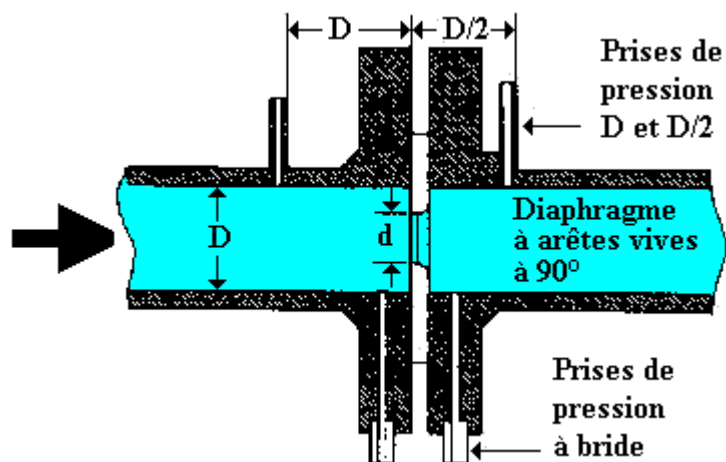
Celle ci montre qu'avec un écoulement régulier et uniforme, une réduction de diamètre de la canalisation entraîne une augmentation de la vitesse du fluide, donc de l'énergie potentielle ou de la pression de la canalisation. Le débit-volume est alors obtenu à partir de  $Q_v = K \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$

Où :

- $P_1$  est la pression en amont de l'organe déprimogène
- $P_2$  est la pression au niveau de la section contractée
- $\rho$  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

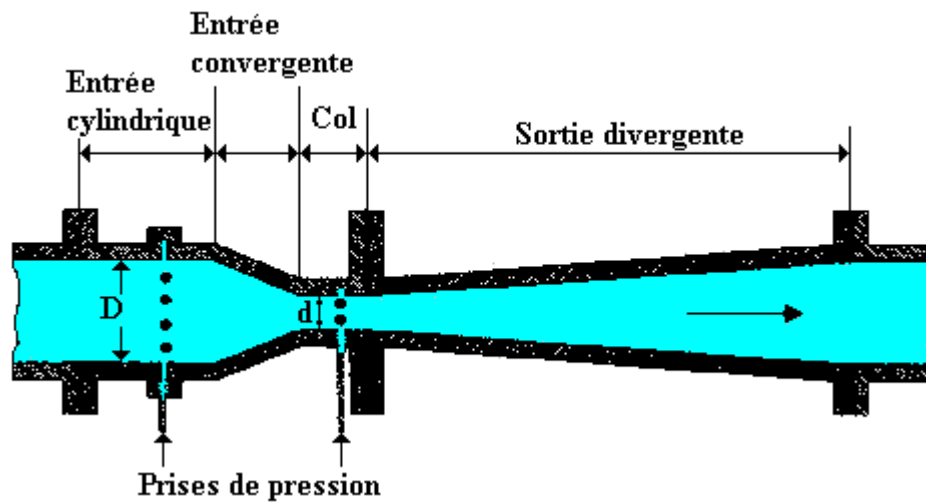
La mesure du débit se réduit alors à la mesure de la différence de pression  $\Delta p$  du fluide qui apparaît entre deux points situés en amont et en aval de l'étranglement de la conduite. Les organes déprimogènes les plus connus sont le diaphragme, la tuyère et le venturi.

**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.



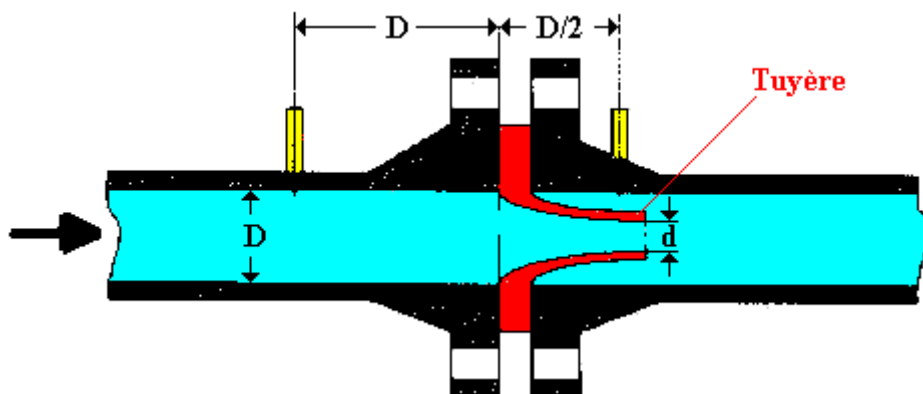
- domaine d'utilisation : ne convient pas aux liquides contenant des impuretés solides car celles-ci peuvent s'accumuler à la base du diaphragme. Il introduit une perte de charge importante
- diamètre de canalisation : tous diamètres disponibles
- précision : 2 à 5 %
- dynamique : 1-4

**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
- précision : 0,5 à 3 % selon les cas

**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.

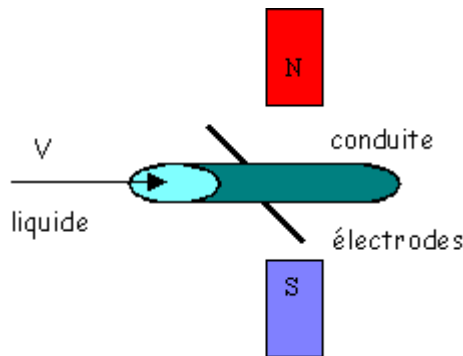


- domaine d'utilisation : pour les turbulences importantes ( $R > 50000$ ), notamment dans les écoulements de vapeur à haute température. Ce dispositif est inutilisable pour les boues
- précision : 1 à 3 %
- dynamique : 1-4

### 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

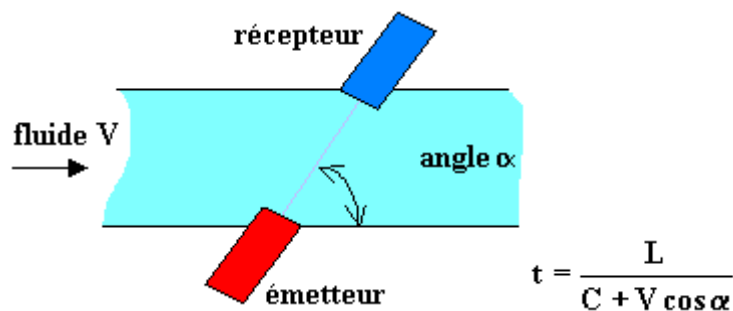
dans une canalisation isolée électriquement à l'intérieur. La force électromotrice est mesurée par deux électrodes au contact avec le liquide et placées aux deux extrémités d'un diamètre perpendiculaire aux lignes d'induction. La force électromotrice mesurée est proportionnelle à la vitesse moyenne du 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
- bonne précision de l'ordre de 1 % (limitée pour les faibles vitesses d'écoulement)
- mesure ne dépendant pas des caractéristiques physique du liquide (viscosité, densité, granulométrie) et possible à haute température (450 °C) et haute pression (1000 bars)

#### 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.



$C$  : vitesse de propagation du son dans le fluide

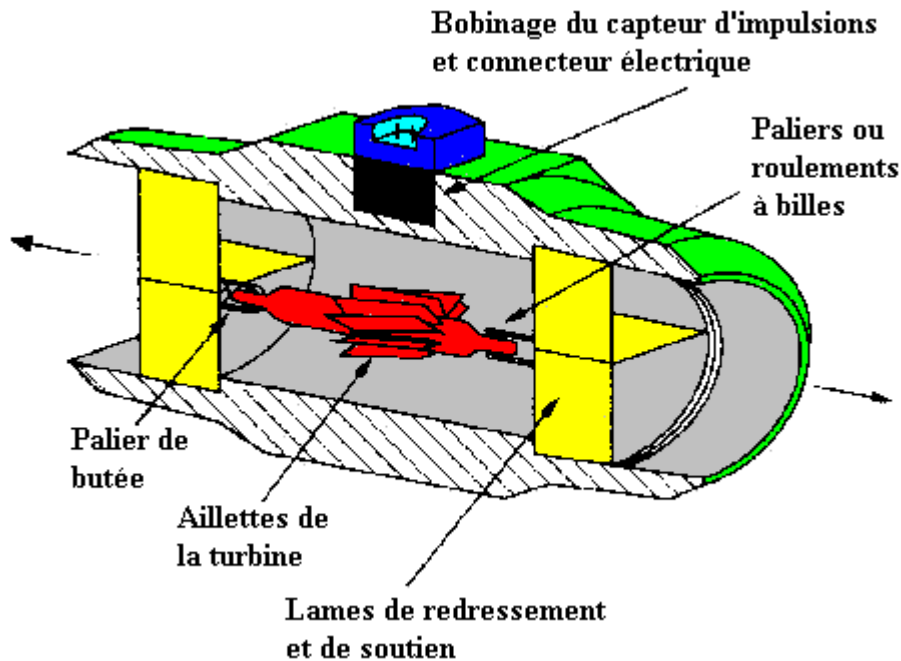
$V$  : vitesse du fluide

$L$  : distance entre émetteur et récepteur

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 (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

#### 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 : 10 mm à 30 cm environ
- précision : 0,2 à 2 % de l'étendue de mesure, selon les appareils
- temps de réponse : plusieurs millisecondes

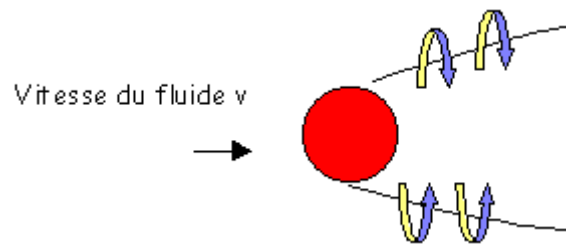
#### g) Débitmètre à effet Vortex

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 du corps non profilé. 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 = fréquence des tourbillons / facteur K. Le facteur K dépend du nombre de REYNOLDS, mais est pratiquement constant sur une vaste plage de débit.



- 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 500 mm
- précision : 1 %
- bonne dynamique : 1-20

#### IV-2-2 PAR MESURE DE SECTION

**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 ( $M.g$ )
- de la force de poussée d'Archimède ( $\rho \times g \times \text{volume du flotteur}$ )
- de la poussée du liquide ( $\rho \frac{S.C.V^2}{2}$ )

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.

M : masse du flotteur en kg

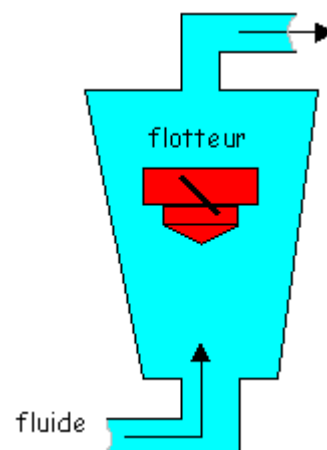
g : accélération de la pesanteur 9,81 m/s<sup>2</sup>

$\rho$  : masse volumique du liquide en kg/m<sup>3</sup>

V : vitesse du fluide en m/s

S : surface du flotteur en m<sup>2</sup>

C : coefficient de traînée du flotteur (sans unité)



- 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
- précision : 2 à 10 % de l'étendue de mesure
- dynamique : 1-10

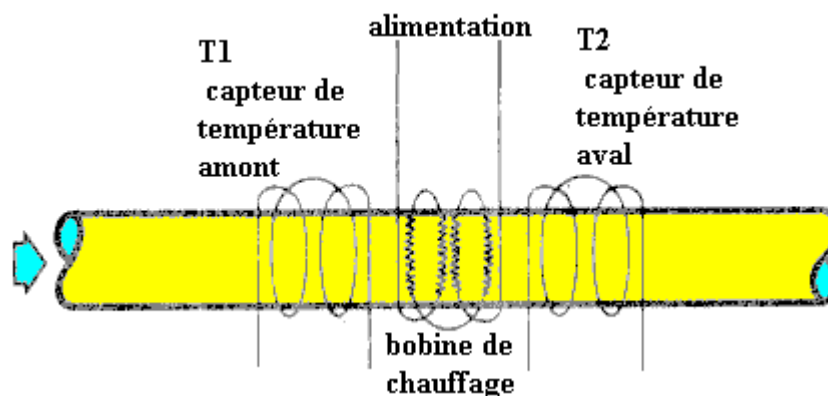
#### IV-2-3 COMPTEURS VOLUMETRIQUES

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, à palettes (ou rotors), à roues ovales, à disque oscillant.

- domaine d'utilisation : eau, acides, lubrifiants (surtout pas les boues...)
- diamètre de canalisation : 10 à 300 mm
- précision : 1 %
- dynamique : 1-15

#### IV-2-4 DEBITMETRE MASSIQUE THERMIQUE

Le principe est basé sur la mesure des transferts caloriques 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.



- domaine d'utilisation : liquide propre, gaz, vapeur
- diamètre de canalisation : tous diamètres
- précision : de l'ordre de 1 %
- dynamique : 1-10