

Chapitre 3 : Mesures des Débits.

1. Introduction :

Le transport des fluides industriels dans les conduites et les mesures de leurs débits sont nécessaires pour la plus part des opérations de la production et de la commercialisation. Pour assurer le transport et la distribution de ces fluides sans une grande perte, des appareils de mesure de débit sont nécessaires afin de minimiser ces pertes.

L'objectif de ce chapitre est de mentionner les débitmètres les plus utilisés dans l'industrie et les conditions de ces installations dont le but d'assurer les bonnes performances.

2. Mesure des débits :

Les mesures de débit se classe en trois catégories :

- les mesures de débits de fluides en conduite fermée ;
- les mesures de débit d'eau à surface libre (chenal, conduit ouvert, rivière) ;
- les mesures de débits solides.

3. Le débit :

Le débit est la quantité de matière ou de fluide, liquide ou gazeux, qui s'écoule par unité de temps. En pratique on distingue deux débits :

3.1. Le débit volumique Q_v : est le volume de fluide écoulé pendant l'unité de temps en (m^3/s), en mesurant la vitesse moyenne à travers une section connue :

$$Q_v = S \cdot V$$

S : est la surface de section de la conduite en m^2 .

V : est la vitesse moyenne du fluide en m/s .

3.2. Le débit massique Q_m : est la masse de fluide écoulée pendant l'unité de temps en (kg/s), on a la relation liant le débit massique au débit volumique :

$$Q_m = \rho \cdot Q_v$$

ρ : est la masse volumique du fluide (kg/m^3). Pour l'eau douce, la masse volumique $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$.

Les liquides peuvent être considérés (à température constante) comme incompressibles, c'est à dire que leur volume ne dépend pas de la pression.

Ce n'est pas le cas des gaz et des vapeurs pour lesquels la masse volumique est proportionnelle à la pression. On peut donc considérer que, à température constante, le débit massique d'un liquide est proportionnel à son débit volumique. Pour un gaz, il n'y a proportionnalité qu'à pression (à température constante).

4. Régimes d'écoulement dans une canalisation

4.1. Écoulement laminaire : les lignes de courant demeurent parallèles entre elles, les couches de fluide glissant les unes sur les autres sans se mélanger, par opposition au régime turbulent.

4.2. Écoulement turbulent : les lignes de courant ne gardent plus leur individualité, mais s'enchevêtrent avec l'échange de particules entre elles.

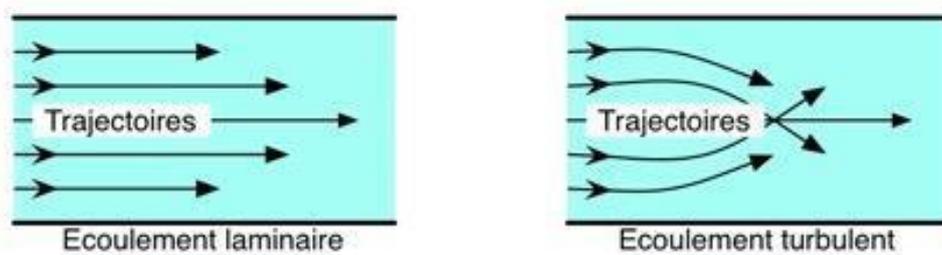


Fig 1. Ecoulement laminaire ou turbulent.

5. Facteurs influant sur l'écoulement des fluides dans les conduites

Les principaux facteurs influant sur l'écoulement des fluides dans une conduite sont les suivants :

5.1. Viscosité dynamique du fluide: C'est la résistance d'un fluide à son écoulement uniforme et sans turbulence. Elle augmente ou diminue en fonction des variations de température. Elle réduit, tout comme le frottement, le débit du fluide près des parois de la conduite où la répartition de la vitesse du fluide n'est pas la même sur toute la surface.

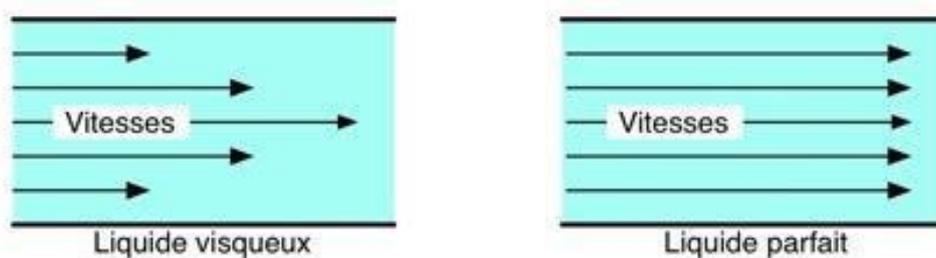


Fig 2. Influence de la viscosité sur la vitesse du fluide.

5.2. Masse volumique du fluide: elle influe également sur le débit, car un fluide plus dense exige une charge supérieure pour maintenir le débit souhaité.

5.3. Vitesse du fluide: elle dépend de la charge qui force le fluide à traverser la conduite. Plus la charge est élevée, plus le débit de fluide est important (les autres facteurs restants constants) et, par conséquent, plus le volume d'écoulement est important. Le diamètre de la conduite influe également sur le débit.

5.4. Frottement de la conduite: il réduit le débit du fluide dans les tuyaux et la vitesse du fluide est plus lente près des parois de la conduite qu'au centre. Il est donc considéré comme un facteur négatif. Plus la conduite est lisse, propre et de grand diamètre, et moins le frottement de la conduite a d'effet sur le débit général du fluide.

6. Techniques de mesure du débit dans les conduites industrielles :

Les débitmètres sont classés suivant des principes très divers, certains sont des appareils de laboratoire (à fil chaud, à laser, à effet Doppler) assurent les mesures de petit débit. Autres sont utilisés pour mesurer le débit dans les conduites industrielles.

Les appareils mesurant le débit s'appellent débitmètres. Les appareils mesurant le volume de fluide (quelle que soit la durée) ou la masse écoulée s'appellent des compteurs.

La plupart des débitmètres indiquent le volume écoulé par unité de temps, ce sont des débitmètres volumiques. Toutefois, 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.

6.1. Débitmètres à Pression Différentielle (Débitmètres à Organes Déprimogènes) :

6.1.1. Principe:

Le principe d'un débitmètre à pression différentielle est basé sur un système perturbateur statique constitué d'un organe déprimogène (création au sein de la canalisation une constriction localisée de la section) qui provoque une chute de pression (création d'une différence de pression statique ΔP entre amont et aval) dont la mesure nous permettra d'en déduire le débit. Ces débitmètres de type manométrique sont les plus anciens appareils de mesure de débit et les plus utilisés pour la mesure des débits volumiques de fluide.

6.1.2. L'ensemble de mesurage:

Le débitmètre à pression différentielle est constitué de deux dispositifs mécaniques réunis par des tubes de liaison :

- **Un élément primaire** composé de l'organe déprimogène (diaphragme, Venturi ou tuyère) créant la différence de pression, associées avec des prises de pressions;

- **Un élément secondaire** ou appareil de mesure, pour mesurer en permanence cette différence de pression et pour donner automatiquement la valeur du débit instantanée (transmetteur de pression différentielle), voir montage **figure 3**.

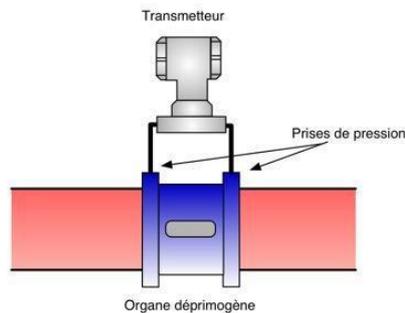


Fig 3. Montage du transmetteur de pression différentielle.

6.1.3. Description technique et normative:

Les normes internationales ISO 5167 et ISO 5168 de 1980, révisées en 1995 et amendées en 1999 définissent les spécifications de construction et les conditions d'utilisation de ces débitmètres ainsi que les procédures de calcul.

Les principaux types d'organes déprimogènes décrits par la norme sont :

- Les diaphragme ou plaque à orifice concentrique
- Les orifices profilés (tubes de tuyères et Venturi)

La **figure 4** montre une schématisation de ces débitmètres :

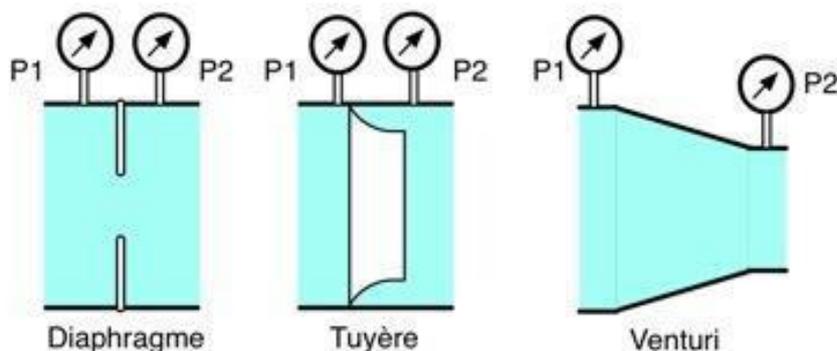


Fig 4. Les principaux débitmètres à organes déprimogènes.

D'autres types de débitmètres à pression différentielle non normalisés sont disponibles : Débitmètre à cible, Débitmètre à coude, Sonde de Pitot...

6.1.3.1. Diaphragme :

Il s'agit d'un disque percé en son centre et perpendiculaire au sens d'écoulement, réalisé dans le 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, c'est-à-dire une chute de la pression statique au niveau de l'orifice.

- C'est le dispositif le plus simple et l'organe déprimogène le plus utilisé.
- Ne convient pas aux liquides contenant des impuretés solides car celles-ci peuvent s'accumuler à la base du diaphragme.
- Diamètre de canalisation : Tous diamètres disponibles.

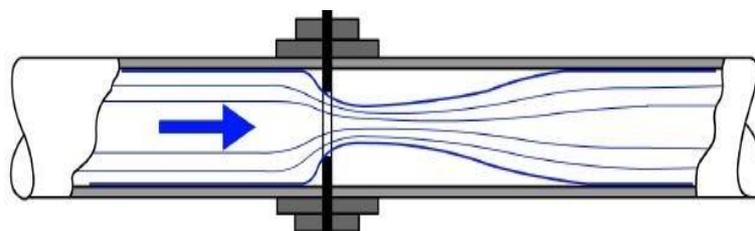


Fig 5. Le Diaphragme.

Prises de pression pour les diaphragmes :

Des prises de pression installées de part et d'autre du diaphragme permettent la mesure de la différence de pression statique. Cette mesure permet d'en déduire directement le débit volumique.

On observe trois types d'emplacement :

Distance Amont	Distance Aval
-D	D/2
-25 mm (1pouce)	25 mm
-0	0 (prises dans les angles)

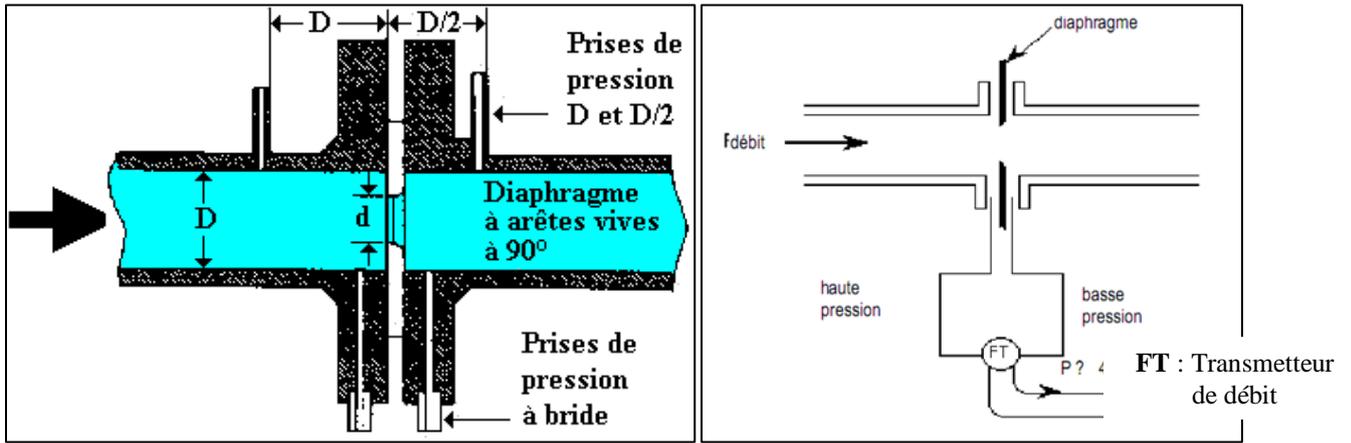


Fig 6. Prises de pression pour les diaphragmes.

Le choix d'un type de prise de pression n'a que peu d'incidence sur l'ordre de grandeur de la pression différentielle. La pression peut être prise soit ponctuellement par un piquage, soit par plusieurs piquages placés en couronne autour de la conduite.

6.1.3.2. Tube de Venturi :

Il est constitué d'un tronc de cône convergent, d'un col cylindrique et d'un tronc de cône divergent (à restriction continue de section). Le dispositif offre une bonne précision. Comme avec le diaphragme, les mesures de pression différentielle sont converties en débit volumique.

- Ils sont bien adaptés à la mesure de fluide (liquide propre, gaz et vapeur) visqueux ou chargé.
- Précision : 0,5 à 3 % selon les cas.

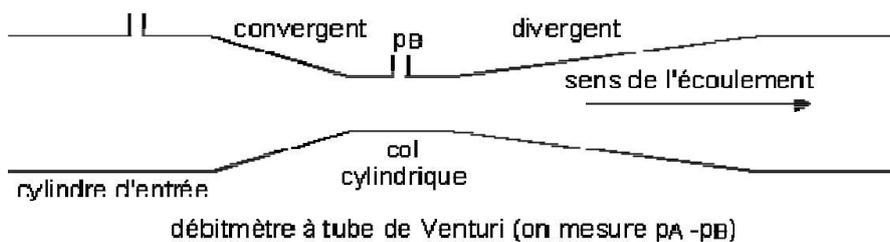


Fig 7. Tube de Venturi.

Prises de pression pour les venturis : au milieu du cylindre d'entrée pour la prise amont et au milieu du col pour la prise aval

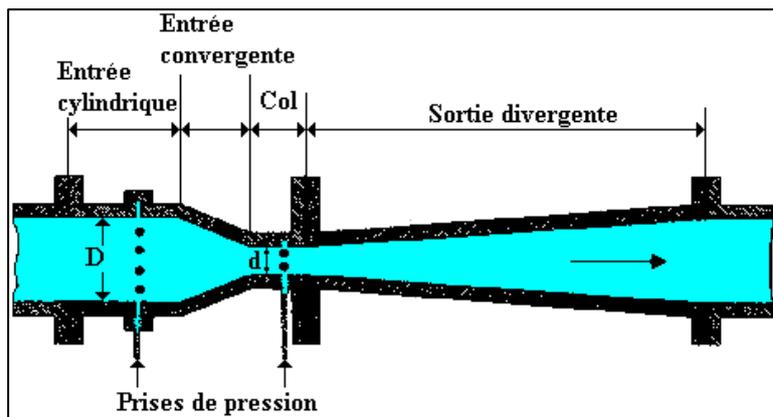


Fig 8. Prises de pression pour les venturis.

6.1.3.3. Tuyère :

Elle est considérée comme une variante du tube de VENTURI. L'orifice de la tuyère constitue un étranglement elliptique de l'écoulement, à restriction continue de section, sans section de sortie rétablissant la pression d'origine. Comme avec le diaphragme et le venturi, les mesures de pression différentielle sont converties en débit volumique.

- Ils sont bien adaptés à la mesure de fluide visqueux, chargé ou pour les turbulences importantes, notamment dans les écoulements de vapeur à haute température. Ce dispositif est inutilisable pour les boues.
- Précision : 1 à 3 %

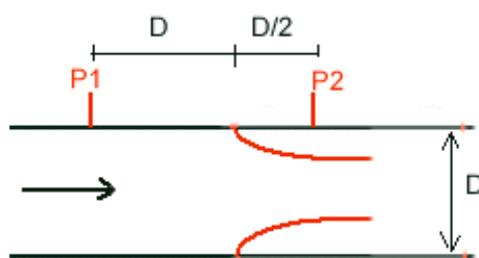


Fig 9. La Tuyère.

Prises de pression pour les tuyères :

Les prises de pression sont situées environ 1 diamètre (D) de la conduite en amont et 1/2 diamètre (1/2D) de la conduite en aval pour la tuyère à long rayon, et dans les angles pour les tuyères à court rayon.

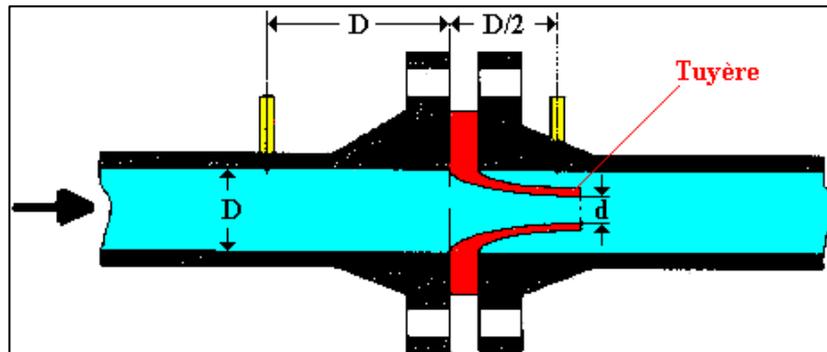


Fig 10. Prises de pression pour les tuyères.

6.1.4. Domaine d'utilisation, avantages et inconvénients des débitmètres à pression différentielle :

Les débitmètres à organes déprimogènes sont utilisés pour la mesure du débit volumique des gaz et des liquides. Ces débitmètres ont connu une large utilisation dans le secteur de l'industrie pétrolière et gazière ainsi que pour la mesure de l'eau. Pour les fluides visqueux tels que les produits pétroliers, l'aspect dynamique de l'écoulement constitue une considération très importante pour le choix d'un élément déprimogène. Bowles (1999) estime qu'environ 80% du parc de débitmètres installés sont du type à pression différentielle, le diaphragme est le plus utilisé.

Les avantages de ces débitmètres sont :

- Peu coûteux,
- Faciles à installer et à exploiter,
- Ils permettent de mesurer de grandes quantités de fluides à haute pression, supérieurs aux débits maximaux mesurables par d'autres types de débitmètres (à effet vortex, turbines etc...).

Les inconvénients de ces débitmètres sont :

- Ils provoquent une perte de charge importante : Elle peut aller jusqu'à 90% de la pression différentielle mesurée sur un diaphragme ; Le Venturi et la tuyère provoquent une perte de charge beaucoup moins importante en raison de leur géométrie profilée.
- Sensibles aux perturbations de l'écoulement (coudes, vannes, élargissements, pulsations etc..) ce qui nécessite des conditions d'installation pénalisantes.

6.2. Rotamètre (Débitmètres à flotteur ou section variable) :

Ces débitmètres sont connus sous l'appellation rotamètre correspondant au nom de la société Rota, actuellement appartient au groupe Japonais Rota-Yokogawa qui a mis depuis plus de 100 ans le principe de mesure basé sur un flotteur (ou ludion) en rotation.

Il est constitué d'un petit flotteur placé dans un tube conique vertical. Le diamètre du tube en verre étant plus grand en haut qu'en bas, Le flotteur monte jusqu'à ce que les forces qui agissent sur lui soient en équilibre. Une encoche dans le flotteur le fait tourner sur lui-même et stabilise sa position.

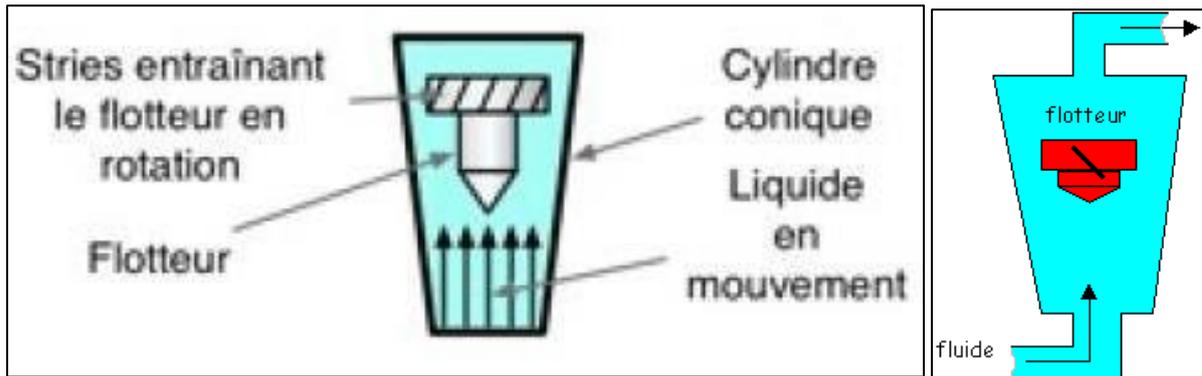


Fig 10. Débitmètre à flotteur.

6.2.1. Forces exercées sur le flotteur :

Le flotteur est soumis essentiellement à trois forces :

- Poids du flotteur, constant.
- La force de poussée d'Archimède A (la poussée hydrostatique) constante selon le principe d'Archimède en cas de masse volumique constante du produit.
- La force S de poussée du liquide avec laquelle l'écoulement du produit soulève le flotteur (variable).

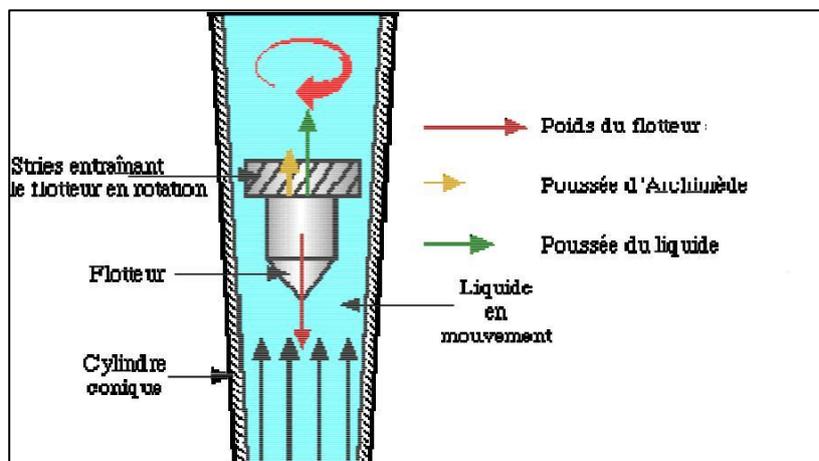


Fig 11. Forces exercées sur le flotteur.

6.2.2. Types de débitmètres :

Les débitmètres à sections variables sont disponibles avec un cône de mesure en verre ou en métal.

6.2.2.1. Le cône de mesure en verre :

Le flotteur et le produit étant directement visibles (**Figure 12**), il permet de lire directement la valeur de débit par repérage de la position du flotteur sur le tube en verre qui est muni de graduations (**Figure 13**),



Fig 12. Rotamètres à cône de mesure en verre.

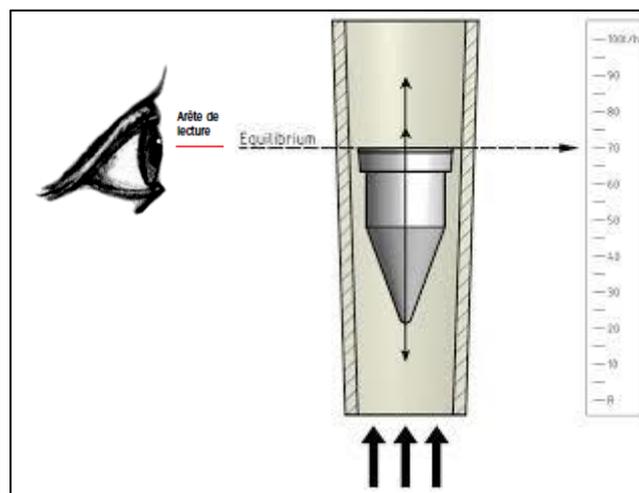


Fig 13. Repérage de la position du flotteur d'un rotamètres à cône en verre.

6.2.2.2. Le cône de mesure métallique :

Il est conçu pour des conditions d'utilisation difficiles en matière de :

- Pression.
- Température.
- résistance à corrosion.

Le flotteur n'étant pas visible directement, le repérage de sa position se fait par l'intermédiaire d'un couplage optique entre le flotteur et l'extrémité du tube. Le débit qui correspond à la position du flotteur est transmis sur un indicateur mécanique, électronique ou électromécanique.



Fig 14. Rotamètres à cône de mesure métallique (avec indicateurs : mécanique (A), électronique (B) ou électromécanique (C)).

6.2.3. Caractéristiques techniques :

- Domaine d'utilisation : ils sont conçus pour la mesure de liquides et de gaz;
- Pressions de 1 Bar à 450 Bars fonction du corps du rotamètre (20 bars au maximum pour les modèles en verre);
- Diamètre de canalisation : allant de 4 à 125 mm;
- Précision : 2 à 10 % de l'étendue de mesure;
- Perte de charge résiduelle importante;
- Éléments principaux interchangeables, maintenance facile;
- Veiller à la verticalité de l'appareil car le fluide se déplace de bas en haut;
- Coût faible.

6.3. Compteurs volumétriques :

Ils mesurent le volume écoulé directement, en emprisonnant de façon répétée un volume élémentaire de fluide. Donc leur principe de fonctionnement est d'isoler puis de transporter de l'entrée à la sortie de l'appareil des volumes élémentaires égaux de fluide bien définis géométriquement. On déplace donc un volume connu 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.

6.3.1. Types de compteurs :

Ils en existent plusieurs types selon le corps d'épreuve utilisé :

6.3.1.1. Compteurs à piston rotatif :

- Débit max: 40 m³/h;
- Fidélité de ± 0.001 %;
- Précision de ± 0.1 %.

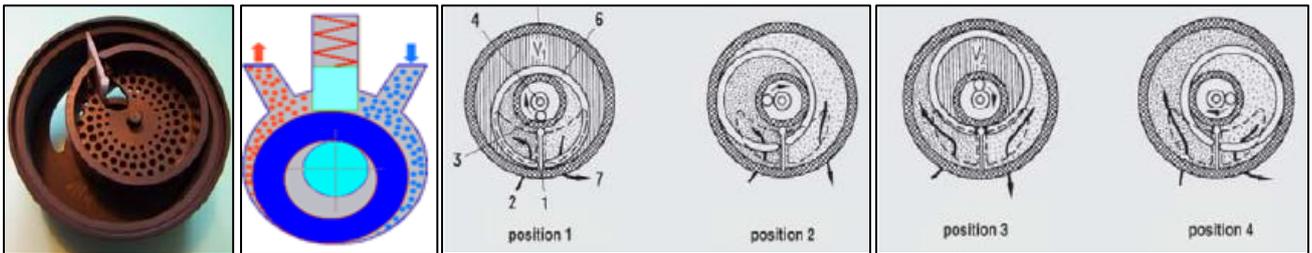


Fig 15. Compteurs à piston rotatif et leur principe de fonctionnement.

6.3.1.2. Compteurs à disque oscillant :

- Débit max: 40 m³/h;
- Précision: ± 0.5 %.

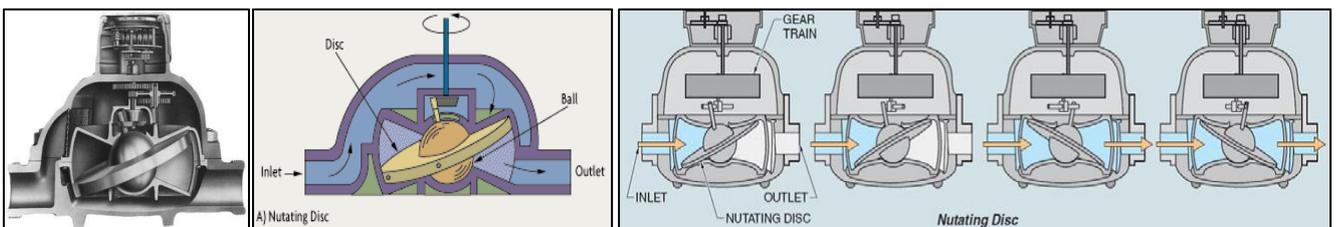


Fig 16. Compteurs à disque oscillant et leur principe de fonctionnement.

6.3.1.3. Compteurs à double roue ovale :

- Débit max: 1600 m³/h;
- Précision: ± 0.2 à 0.5 %.

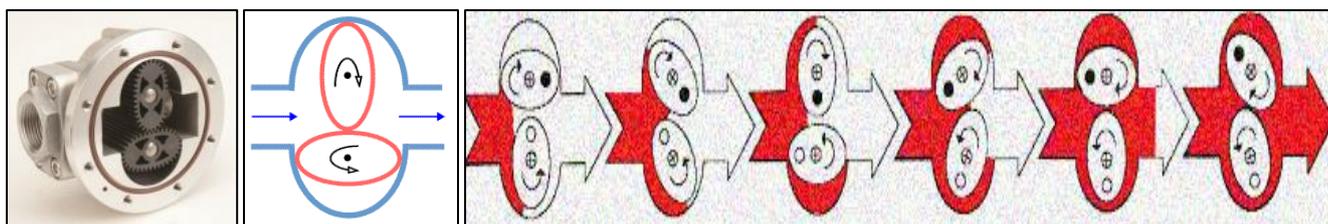


Fig 17. Compteurs à double roue ovale et leur principe de fonctionnement.

6.3.1.4. Compteurs à double roue en huit :

- Débit max: 1500 m³/h.

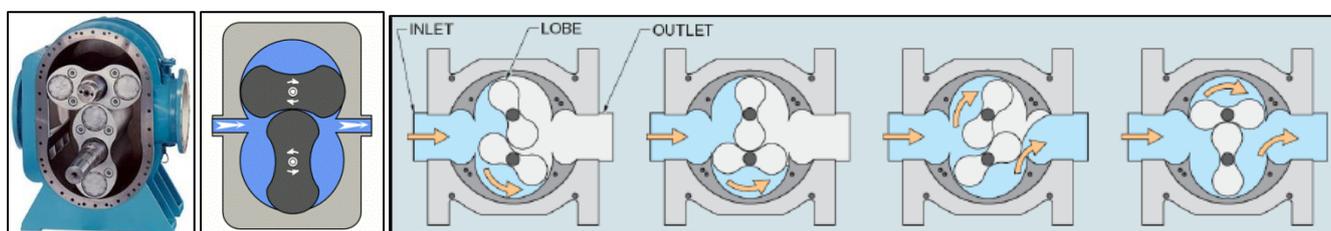


Fig 18. Compteurs à double roue en huit et leur principe de fonctionnement.

6.3.1.5. Compteurs à palettes :

- Précision: +/- 0.3 %.

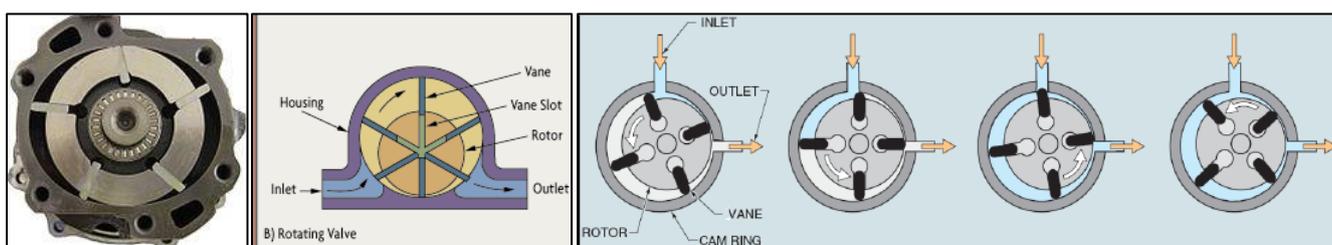


Fig 19. Compteurs à palettes et leur principe de fonctionnement.

6.3.2. Caractéristiques techniques :

- Domaine d'utilisation : adapté pour les liquides et les gaz;
- Pressions jusqu'à 300 Bars;
- Diamètre de canalisation : 10 à 300 mm;
- Adapté au comptage de volume;
- Précision : 1 %;
- Perte de charge résiduelle faible;
- Généralement montés sur des conduites horizontales.