

I. Mesure de débit

I.1. Introduction

Le mot « débit » est utilisé depuis le début du XIXe siècle avec les notions de vitesse d'écoulement et de géométrie transversale.

Le débit est la quantité de matière ou de fluide, liquide ou gaz, qui s'écoule par unité de temps. Il existe deux types de débits :

- **Débit massique Q_m** qui s'exprime en kg/s
- **Débit volumique Q_v** qui s'exprime en m³/s

Si ρ est la masse volumique du fluide (kg/m³) on a la relation liant le débit

$$Q_m = \rho \cdot Q_v$$

I.2. Régime laminaire et régime turbulent :

La Viscosité : C'est la résistance d'un fluide à son écoulement uniforme et sans turbulence. En fonction de la viscosité du fluide, la répartition de la vitesse du fluide n'est pas la même sur toute la surface

- ✓ Dans le cas d'un écoulement laminaire, on peut déterminer le débit d'un fluide à partir de sa vitesse :

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = V (\text{m}/\text{s}) \times S(\text{m}^2)$$

Avec Q le débit du fluide, V la vitesse du fluide et S la section de la canalisation

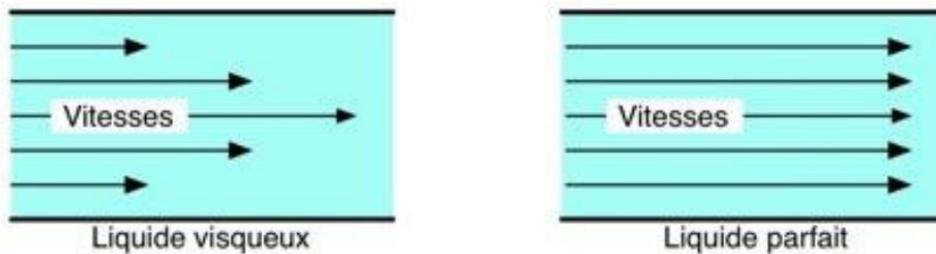
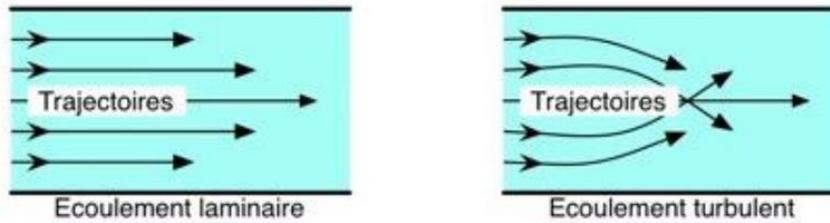


Fig.1. Influence de la viscosité sur vitesse du fluide

- ✓ **Le régime laminaire d'un fluide** s'effectue par glissement des couches de fluide les unes sur les autres sans échange de particules entre elles, par opposition au régime turbulent.



Dans le cas d'un écoulement incompressible et isotherme, le nombre de Reynolds suffit pour déterminer le type d'écoulement :

$$R_e = \frac{V(m/s) \cdot Q(m)}{\nu(m^2/s)}$$

V : vitesse du fluide en m/s .

L : longueur caractéristique de la canalisation en m .

ν : la viscosité cinématique du fluide en m^2/s .

La viscosité cinématique est égale à la viscosité dynamique divisée par la masse volumique.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

μ : viscosité dynamique en kg/ms ou N/m^2s ou Pas .

ρ : masse volumique en kg/s .

Un écoulement est **turbulent** pour $Re > 2\,300$. Dans le cas contraire, l'écoulement est laminaire.

I.3. Les différents débitmètres

Les appareils mesurant le débit s'appellent débitmètres, ils sont classés suivant des principes très divers, Parmi les méthodes de mesures de débit :

- La méthode du venturi (débitmètres à pression différentielle)
- La méthode du diaphragme
- Le chronométrage direct pour un volume déterminé

I.3.1. Débitmètres à pression différentielle

Le principe est basé sur un système perturbateur statique constitué d'un organe d'étranglement ou organe déprimogène qui provoque une chute de pression dont la valeur est fonction du débit de l'écoulement et des caractéristiques thermodynamiques du fluide à mesurer.

La théorie de l'organe déprimogène repose sur l'application des équations de Bernoulli et de continuité de conservation de l'énergie et de la masse (**fluides incompressibles**)

I.3.1.1. Le Venturi :

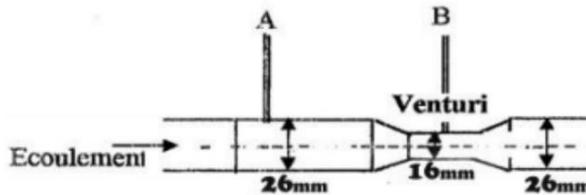


Fig.3 Le tube de venturi

Le tube de venturi est constitué d'un convergent suivi d'un divergent, il est caractérisé par une faible perte de charge. Il est tout particulièrement adapté aux fluides chargés. Le venturi peut être réalisé en acier ou en alliages divers. Or l'expression du débit massique est donnée par la formule

$$Q = \rho \times S_B \times V_B$$

Le débit pour cette méthode est indirectement mesuré en calculant la vitesse du fluide au point B, sachant la différence de pression qu'il y a entre les points A et B sans tenir compte des pertes de charge

$$V_B = \sqrt{\frac{2g}{\rho g} \frac{(P_A - P_B)}{1 - \left(\frac{S_B}{S_A}\right)^2}}$$

$$\frac{P_A - P_B}{\rho g} = x = h_A - h_b$$

L'application des principes de conservation de la masse et de l'énergie, pour un écoulement de fluide incompressible, entre les sections de l'écoulement A et B on permet de trouver les lois précédentes

- ✓ A cause des pertes de charge, la valeur réelle V_B' est plus faible que la valeur V_B calculé théoriquement ; mais les 2 vitesses sont proportionnelles par un coefficient K_v Tel que :

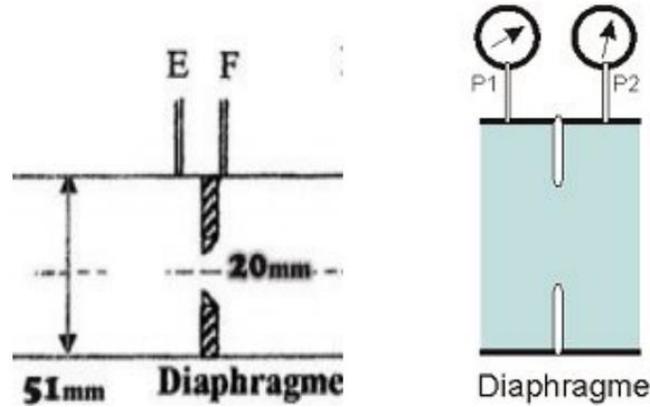
$$V_B' = K_v \cdot V_B$$

K_v : coefficient de perte de charge

I.3.1.2. Diaphragme (débitmètre à pression différentielle)

Un resserrement de la conduite crée entre amont et aval une différence de pression D_p liée au débit par une relation de la forme :

$$V_F = \sqrt{\frac{2g}{\rho g} \frac{(P_E - P_F)}{1 - \left(\frac{S_F}{S_E}\right)^2}}$$



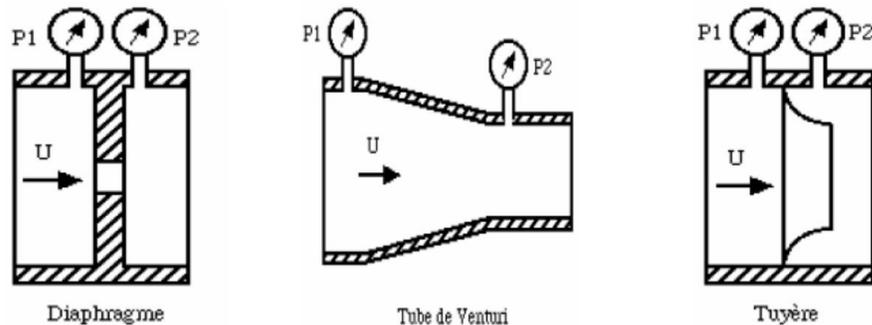
La prise en compte des pertes de charge est là aussi matérialisée par la multiplication par un coefficient K_D

$$K_D = Q_D / Q_T$$

Q_D , Q_T respectivement débits réelle et théorique

Les principaux types d'organes déprimogènes:

1. Les diaphragme ou plaque à orifice concentrique
2. Les orifices profilés (tuyères, tubes de Venturi et les Venturi-tuyères)



I.3.2. Débitmètres à flotteur

Le débitmètre à flotteur, également appelé Rotamètre, ou encore spiromètre ou gyromètre, est un appareil de mesure du débit, constitué d'un tube vertical transparent faiblement conique et d'un flotteur

- **Principe**

Le fluide entre par la partie inférieure du tube de mesure. Une force de frottement est générée par le passage du fluide entre l'espace annulaire, le flotteur et la paroi du tube. Le flotteur se soulève jusqu'à ce que toutes les forces en présences (friction, l'apesanteur et la flottabilité du flotteur) soient en équilibre. Le tube de mesure est conçu de telle sorte que l'espace entre le tube et le flotteur soit plus important en partie supérieure permettant de passer un débit plus conséquent. Comme l'effet

d'apesanteur est uniquement effectif dans une orientation verticale, le tube de mesure doit être orienté verticalement

Le flotteur est équilibré sous l'action:

- De la force de poussée d'Archimède
- De la traînée
- De son poids

$$\rho g V + C_x \frac{\rho S U^2}{2} = \rho_0 g V$$

V : volume du flotteur de masse volumique ρ_0 .

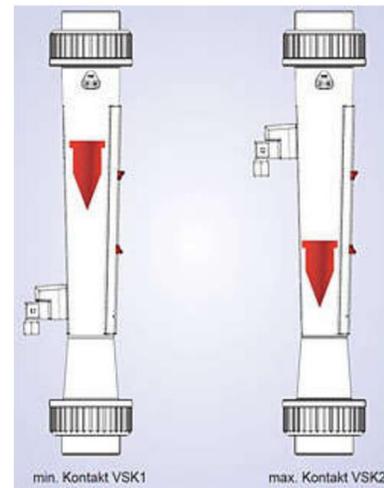
U : vitesse du fluide de masse volumique ρ

C_x : coefficient de traînée et S la surface projetée sur un plan perpendiculaire à la vitesse (πr^2)

On déduit la vitesse du fluide à la position d'équilibre à partir de l'équation précédente, le diamètre du conduit varie linéairement avec la hauteur z : $D = D_0 + az$

D'où le débit est :

$$Q = \sqrt{\pi} a z \sqrt{\frac{2gV}{C_x} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)}$$



I.3.3. Débitmètre électromagnétique

Le débitmètre électromagnétique fonctionne suivant le principe de Faraday. Quand un liquide conducteur s'écoule perpendiculairement à travers un champ magnétique, une différence de potentiel électrique est créée au sein du liquide. Cette différence de potentiel, captée à l'aide de deux électrodes permet, par le calcul, d'en déduire la vitesse puis le débit du fluide



- ✓ **Loi d'induction de FARADAY** : La tension induite dans un conducteur se déplaçant à travers un champ magnétique est proportionnelle à la vitesse de passage du conducteur

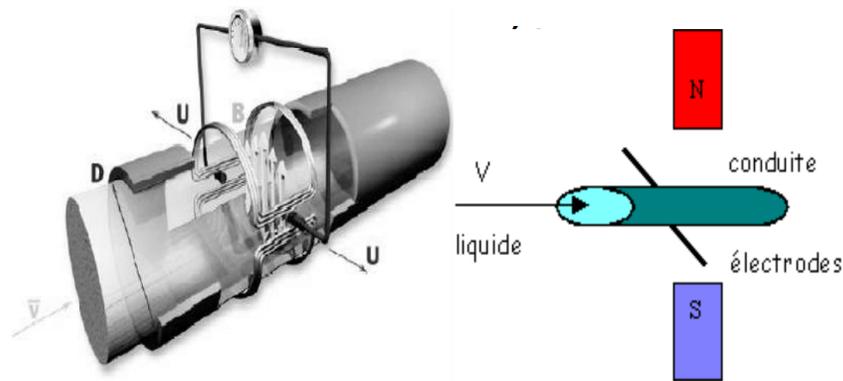
$$F_{em} = B \cdot d \cdot u$$

u : Vitesse du fluide [m/s]

d : Diamètre de la conduite [m]

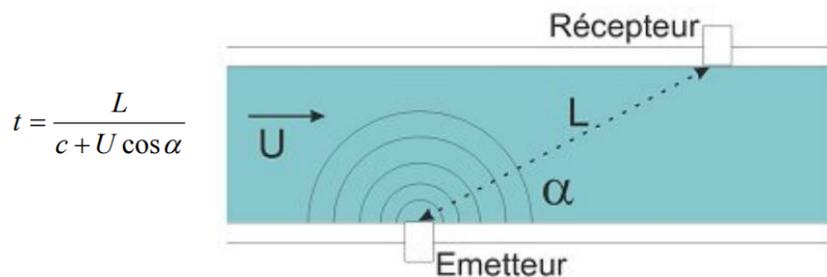
B : Induction électromagnétique [teslas]

FEM (Volts)



I.3.4. Le débitmètre à ultrasons

On mesure le temps de propagation d'une onde ultrasonore dans le fluide entre émetteur et récepteur (éléments piézoélectriques). Pour fluide sans particule (pour éviter la dispersion des ondes), généralement utilisé pour les diamètres importants (jusque 6m) pour une gamme de débits : 0,1 à 105 m³ /h avec une précision de 1% environ



C : vitesse du son dans le fluide.

I.3. Le choix et les erreurs liées à chaque type

Les critères de choix sont très nombreux, les principaux éléments à considérer sont :

✓ Caractéristiques du fluide

- Nature du fluide (liquide chargé, conducteur...)
- Viscosité
- Régime d'écoulement
- Température
- Pression
- 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

II. Mesure de vitesse

II.1. Les appareils de mesure de la vitesse

Les capteurs de vitesse (appareil de mesure) portent également le nom plus industriel de tachymètres. Le type de déplacement est soit rectiligne, soit angulaire ; la sortie est analogique ou numérique. On distingue les vitesses de rotation, les vitesses des déplacements linéaires, ainsi que les vitesses des fluides.

II.2. Mesure des vitesses de rotation

• Il existe plusieurs solutions pour mesurer dans l'industrie les vitesses de rotation ou déplacement d'objets. Les deux techniques les plus utilisées sont la tachymétrie et les stroboscopes.

II.2.1. tachymètre

• Un tachymètre est un instrument de mesure permettant de déterminer la vitesse de déplacement d'un objet en mouvement. Le capteur peut être mécanique, optique ou à courants de Foucault, ou bien consister en un système de conversion du temps et de la distance, sur certaines montres.

• un tachymètre permettant d'indiquer la vitesse de rotation d'un mobile, comme une poulie, un arbre de ventilation ou de moteur. On le trouve couramment dans l'industrie et les transports, où il permet un contrôle et une surveillance des machines rotatives.

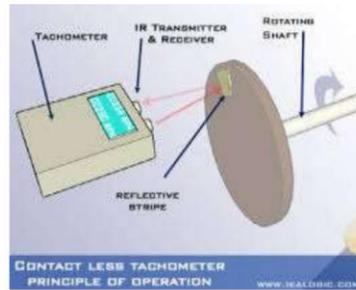
• Le tachymètre peut également être utilisé pour mesurer la distance en chronométrant le parcours sur une certaine distance à vitesse constante $Distance = Vitesse \times Temps$

✓ **Type de tachymètre:**

Il existe deux types de tachymètre:

- **Tachymètre sans contact (optique)**

Les tachymètres optiques utilisent le principe de réflexion de la lumière. Ils sont équipés d'une LED qui émet une lumière qui va se réfléchir sur une cible et revient vers l'appareil équipé d'un récepteur. La vitesse est mesurée en comptant la fréquence à laquelle le faisceau est réfléchi. Cette solution est particulièrement utilisée pour les mesures d'objets tournants type axes, moteurs...



- **Tachymètre à contact:**

Les tachymètres à contact sont équipés en général d'un embout type roue ou cône. Le tachymètre converti la rotation de la roue en impulsions électriques et celui-ci vient mesurer la fréquence de ces impulsions pour déterminer la vitesse. Ce type de tachymètre est utilisé dans les déplacements linéaire



II.2.2. Stroboscope Un stroboscope est une source de lumière intermittente. Par un dispositif mécanique ou électronique, on produit une alternance de phases lumineuses (flashes) et de phases obscures.

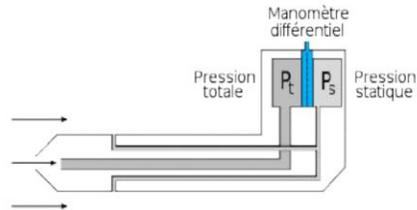
- Le stroboscope est une source de lumière saccadée, issue d'un dispositif mécanique ou électronique qui fait alterner les phases obscures et les phases lumineuses(flashes)
- La stroboscopie permet d'observer des phénomènes périodiques dont la fréquence est trop élevée pour l'œil nu

II.3. Mesure des déplacements linéaires

Radar à effet DOPPLER Un Radar (Radio Detection And Ranging) de contrôle routier est un appareil servant à mesurer la vitesse des véhicules circulant sur la voie publique à l'aide d'ondes électromagnétiques radio. Un radar type Mesta émet une onde continue de fréquence 24,150 GHz qui est réfléchi par la voiture se trouvant dans la direction pointée. Par effet Doppler, cette onde réfléchi possède une fréquence légèrement différente de celle émise : plus grande fréquence pour les véhicules s'approchant du radar et plus petite pour ceux s'en éloignant

II.4. Mesure de la vitesse des fluides

II.4.1. Le tube de Pitot.



Le **tube de Pitot** et l'**antenne de Prandtl** sont des systèmes similaires de mesure de vitesse des fluides. Ils sont notamment utilisés pour l'anémométrie en aéronautique. Il doit son nom au physicien français Henri Pitot qui propose en 1732, un dispositif de mesure des eaux courantes et de la vitesse des bateaux. Ce premier appareil de mesure est ensuite amélioré par Henry Darcy puis par Ludwig Prandtl.

Principe de fonctionnement

Le tube de pitot sur le front de l'écoulement fournit la pression totale P_t une prise située latéralement fournit la pression statique ; un manomètre différentiel fournit la différence des deux, c-à-d la pression dynamique

Cas de l'écoulement incompressible

Dans le cas d'un écoulement incompressible (c'est-à-dire en régime subsonique pour un nombre de Mach inférieur à 0,4), le calcul de la vitesse est effectué par application du théorème de Bernoulli. On néglige alors le terme z pour avoir une relation directe entre la vitesse et la pression dynamique $p_t - p_s$ que l'on mesure avec un capteur de pression ou un simple manomètre.

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p_s = 0 + p_t \Rightarrow v^2 = \frac{2(p_t - p_s)}{\rho}$$

v = vitesse

p_s = pression statique

p_t = pression totale

ρ = masse volumique du fluide

Cas de l'écoulement compressible

Dans le cas d'un écoulement compressible (nombre de Mach supérieur à 0,4), il faut utiliser la formulation du théorème de Bernoulli étendue aux écoulements compressibles. En négligeant la différence d'altitude z , la relation suivante est utilisée pour calculer le nombre de Mach:

$$\frac{p_t}{p_s} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \text{ (pour } M < 1 \text{)}$$

M = nombre de Mach

p_t = pression totale

p_s = pression statique

γ = rapport des capacités calorifiques du fluide C_p/C_v .