

LA MESURE DU DEBIT

Dans ce chapitre, nous abordons les méthodes de mesure des vitesses et des débits.

Les deux grandeurs « vitesse » et « débit » sont reliées par des équations vues dans le cours de physique. Mais, à ce stade, il importe de bien distinguer la vitesse moyenne de la vitesse locale. Par exemple, connaissant la section d'un écoulement et une mesure de son débit

volumique, on ne pourra en déduire « que » sa vitesse moyenne (par $v_{moy} = \frac{Q_V}{S}$), mais absolument pas les vitesses locales (c'est à dire les vitesses en différents points de la section).

Inversement, une mesure de vitesse locale est insuffisante pour connaître le débit.

C'est la raison pour laquelle, les deux types de mesure (de vitesse et de débit) peuvent être menées de façon indépendantes, ou de façon couplées.

I RETOUR SUR LE COURS DE PHYSIQUE

1) Le débit

On distingue deux types de débits :

- le débit volumique : défini par $Q_V = v_{moy} \cdot S$ avec v_{moy} vitesse moyenne sur la section S
- le débit massique : $Q_m = \rho \cdot v_{moy} \cdot S = \rho \cdot Q_V$

ATTENTION : seul le débit massique est conservé entre deux sections d'un tube de courant. Cette loi de conservation est nommée « EQUATION DE CONTINUITE » :

$$Q_{m,1} = Q_{m,2}$$

ce qui donne :

$$\rho_1 \cdot S_1 \cdot v_{moy,1} = \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_{moy,2}$$

Si, de plus, le fluide est INCOMPRESSIBLE, alors, la masse volumique est la même en (1) et en (2), et le débit volumique est conservé !

➔ le débit volumique s'exprime en $m^3 \cdot s^{-1}$

➔ le débit massique s'exprime en $kg \cdot s^{-1}$

Rappelons aussi une formule élémentaire qui est exploitée par certaines techniques de mesure de débit **lorsque la vitesse du fluide peut être considérée comme constante** :

$$Q_V = \frac{\text{Volume}}{\text{temps}}$$

où « Volume » est un certain volume rempli pendant un certain temps « temps ».

2) Le théorème de Bernoulli

Ce théorème relie, le long d'une ligne de courant, les trois grandeurs « vitesse », « pression » et « altitude ».

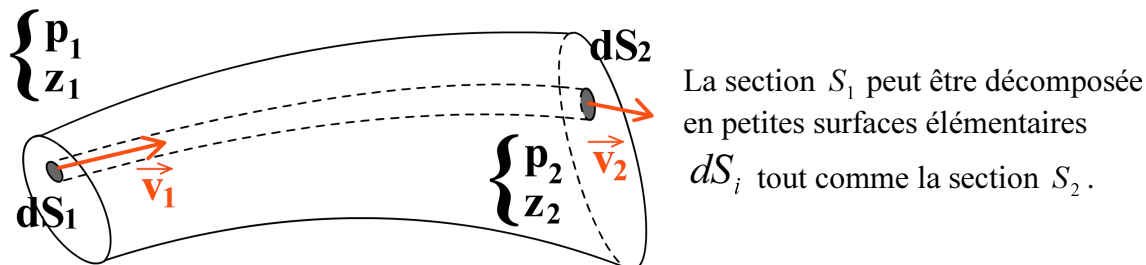
Le théorème de Bernoulli prend la forme suivante, dans le cas d'un fluide parfait :

$$p + \frac{1}{2 \cdot \rho} \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z = C^{ste} \quad (\text{en pression !})$$

La vitesse « v » représente alors aussi bien la vitesse moyenne, que la vitesse locale puisque la distinction ne s'impose pas pour un fluide parfait.

Qu'en est-il pour un fluide réel ?

Nous avons rappelé ci-dessus que le débit (volumique ou massique) est défini grâce à la vitesse moyenne v_{moy} . Mais, s'agit-il encore de cette vitesse moyenne dans le terme d'énergie cinétique ?



En se rappelant que : $pression = \frac{Puissance}{débit_volumique}$, et que le débit volumique est défini par :

$Q_V = \int_{sectionS} v_i \cdot dS_i$, on peut écrire le théorème en bilan de puissance sur la section S_1 (ou sur la section S_2) :

$$\int_{sectionS} p_i \cdot v_i \cdot dS_i + \int_{sectionS} \frac{1}{2\rho} \cdot v_i^2 \cdot v_i \cdot dS_i + \int_{sectionS} \rho \cdot g \cdot z_i \cdot v_i \cdot dS_i = C^{ste} \cdot Q_V$$

le premier terme et le troisième terme de cette égalité ne posent pas de problème et font ressortir le débit défini à partir de la vitesse moyenne évoquée en **D** (en effet, les grandeurs p_i et z_i peuvent être sorties de l'intégrale !).

Mais, il n'en va pas de même pour le deuxième terme. Ce terme fait même ressortir une intégrale « en v_i^3 », qui n'a aucune raison de redonner la vitesse moyenne

On est donc amené à définir :

→ une vitesse moyenne débitante $v_{moy,Q} = \int_{section} v_i \cdot dS_i$

→ une vitesse moyenne d'énergie cinétique $v_{moy, Ec}^2 = \frac{\int v_i^3 \cdot dS_i}{Q_V}$ qui est celle intervenant dans le théorème de Bernoulli

$$p + \frac{1}{2 \cdot \rho} \cdot v_{moy, Ec}^2 + \rho \cdot g \cdot z = C^{ste}$$

ces deux vitesses étant a priori différentes !

En pratique, la vitesse moyenne débitante est plus commode à déterminer. C'est d'ailleurs elle qui est reliée au débit.

C'est pourquoi on introduit un coefficient α sans dimension tel que :

$$\alpha = \frac{v_{moy, Ec}}{v_{moy, Qv}}$$

Ce coefficient α prend les valeurs suivantes :

- en régime laminaire : $\alpha = 2$
- en régime turbulent, dans un tuyau rectiligne, de section constante, et après un parcours supérieur à 10 fois le diamètre, $1,02 < \alpha < 1,15$
- pour les fluides parfaits, $\alpha = 1$

MORALITE DE CETTE HISTOIRE :

La plupart des écoulements industriels se font en régime turbulent, si bien que l'on peut, sans commettre d'erreur notable, prendre $\alpha = 1$, et continuer d'écrire le théorème de Bernoulli comme il a été vu dans le cours de physique !

REMARQUE :

Cette année, nous ne nous soucierons pas de ce coefficient qui sera pris égal à 1, quelque soit le régime, et ce, même en régime laminaire.

3) Les différents régimes d'écoulement

Le cours de physique a montré l'importance d'un nombre sans dimension, caractérisant le rapport $\frac{\text{force_inertie}}{\text{force_frottement}}$.

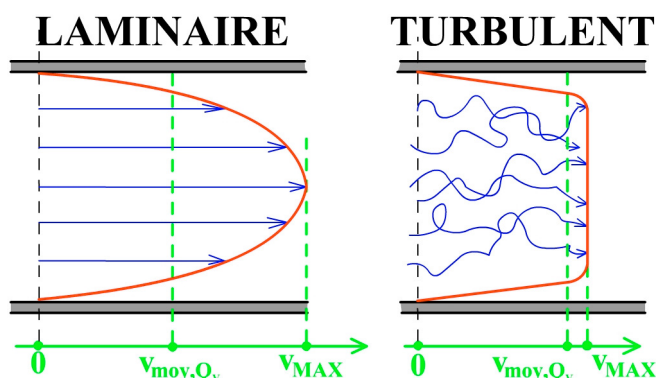
Ce nombre, dans les écoulements au sein de canalisations cylindriques s'exprime par :

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{moy, Qv} \cdot D}{\mu}$$

où ρ est la masse volumique du fluide, μ sa viscosité dynamique (Pa.s), et D le diamètre de la canalisation cylindrique.

- si $Re \leq 2000$: **le régime est laminaire**, les forces de frottement dominent dans ce type d'écoulement, la conséquence est que les couches de fluide glissent les unes sur les autres sans s'entremêler. Le profil des vitesses est parabolique
- si $2000 < Re < 4000$: **le régime est incertain**, mais, s'il est turbulent à un certain instant, alors, il le restera

→ si $Re \geq 4000$: le régime est turbulent, les forces d'inerties dominent et les lignes de courant se mêlent. La distribution des vitesses selon une section droite est « écrasée ». Autrement dit, la vitesse moyenne est très peu éloignée des vitesses réelles.



Ces rappels de physique vont nous servir à étudier une catégorie importante de débitmètres :
les débitmètres à organe déprimogène

II LES DEBITMETRES A ORGANE DEPRIMOGENE

Le marché mondial des débitmètres a été estimé à 2500 millions de dollars en 1995, et est en constante augmentation.

Les transactions commerciales contrôlées à partir de mesures débitométriques (gaz, pétrole ...) représentent elles aussi un chiffre d'affaire énorme.

Etant donné la taille de ces marchés, il est surprenant de constater que la précision et la capacité de la plupart des débitmètres restent faibles en comparaison avec les instruments de mesure utilisés pour les autres grandeurs (température, pression).

Par exemple, le débitmètre à diaphragme, qui fut utilisé à des fins commerciales dès le début des années 1900, avec sa modeste précision de $\pm 2\%$, est encore, pour beaucoup de pays le seul débitmètre à être habilité dans les transactions de gaz naturel.

1) Présentation

Plus de 40 % des mesures faites sur les liquides, les gaz et les vapeurs dans l'industrie, le sont à partir de débitmètres à organe déprimogène : le **diaphragme**, le tube de **Venturi** et la **tuyère**.

Le principe de ces débitmètres repose sur l'**effet Venturi** : la pression change lorsque la section change. De plus, on montre facilement, à partir du théorème de Venturi que cette pression est plus faible, là où la section est plus faible (cf. cours de physique, et paragraphe ci-dessous). Ainsi, à partir de l'un des éléments cités ci-dessus, on transforme une partie de l'énergie de pression en énergie cinétique, et on mesure la chute de pression résiduelle entre l'amont (*upstream*) et l'aval (*downstream*).

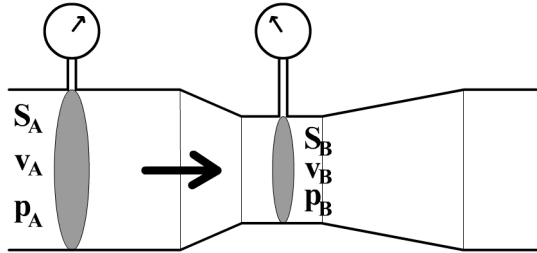
Tout débitmètre à organe déprimogène est donc constitué de deux éléments :

- un obstacle (responsable d'une Δp)
- un capteur de pression différentielle (mesure de la Δp)

Un des principaux avantages de ces débitmètres à organe déprimogène est qu'il n'est pas nécessaire de passer par une calibration, à partir du moment où ils ont été conçus conformément aux normes établies. De plus, ils ne possèdent pas de parties mobiles, et par conséquent, ils restent fiables dans le temps.

Parmi les principaux inconvénients, il y a leur rangeabilité limitée (typiquement 3:1), la perte de charge qu'ils provoquent sur l'installation, et leur sensibilité au comportement de l'installation (afin de minimiser cette sensibilité, on placera une certaine longueur en amont, et en aval du débitmètre – cf. norme).

2) Expression théorique du débit pour un débitmètre à organe déprimogène



Refaisons la démonstration permettant de comprendre le principe de tout débitmètre à organe déprimogène.

Le schéma ci-contre est celui d'un venturi, mais cette démonstration restera valable quel que soit l'obstacle, puisque le fluide est supposé pour l'instant parfait.

La masse volumique du fluide est notée « ρ » (qui peut être variable « a priori »).

- **théorème de Bernoulli :**

$$\text{il se réduit ici à } p_A - p_B = \frac{\rho_B}{2} \cdot v_B^2 - \frac{\rho_A}{2} v_A^2$$

- **la conservation du débit massique** (puisque ρ peut être variable):

$$Q_m = \rho_A \cdot v_A \cdot S_A = \rho_B \cdot v_B \cdot S_B \quad \text{soit} \quad v_A = \frac{Q_m}{\rho_A \cdot S_A} \quad \text{et} \quad v_B = \frac{Q_m}{\rho_B \cdot S_B}$$

- **la combinaison de ces trois équations :**

$$p_A - p_B = \frac{Q_m^2}{2 \cdot \rho_B \cdot S_B^2} - \frac{Q_m^2}{2 \cdot \rho_A \cdot S_A^2} = Q_m^2 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \rho_B \cdot S_B^2} - \frac{1}{2 \cdot \rho_A \cdot S_A^2} \right)$$

- **hypothèse d'une masse volumique constante :**

il est impossible d'aller plus loin sans supposer que la masse volumique du fluide est constante : $\rho = C^{ste}$.

ATTENTION : cette masse volumique peut néanmoins dépendre de la température et de la pression du procédé (auquel cas, il faudra associer au débitmètre, un capteur de température, et un capteur de pression afin de pouvoir déterminer le facteur correctif).

Par contre, si le fluide est compressible ($\rho_A \neq \rho_B$), il faudra faire appel à la THERMODYNAMIQUE (cf. cours de 2^{ème} année !)

- **expression du débit volumique :**

$$\text{avec } \rho = C^{ste} \quad \text{alors} \quad Q_m^2 = \frac{\rho \cdot (p_A - p_B)}{\frac{1}{S_B^2} \cdot \left(1 - \frac{S_B^2}{S_A^2}\right)}$$

- **introduction du rapport des diamètres β :**

$$\text{on pose } \beta = \frac{D_B}{D_A} \text{ et } p_A - p_B = \Delta p$$

alors

$$Q_m = \sqrt{\frac{S_B^2 \cdot \rho \cdot \Delta p}{(1 - \beta^4)}}$$

- **expression du débit volumique :**

il suffit de diviser par ρ le résultat ci-dessus, et après simplification, il vient :

EXPRESSION THEORIQUE DU DEBIT

$$Q_V = \frac{S_B}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

La formule ainsi obtenue, n'est que théorique, puisque la viscosité du fluide n'a pas été prise en compte, ni la perte de charge introduite par l'obstacle, ni la contraction de veine qui se produit systématiquement lorsqu'un fluide s'écoule au travers d'un orifice, et de plus, le fluide a été supposé incompressible.....

Nous allons voir dans le paragraphe suivant, comment modifier cette expression afin de pouvoir l'appliquer concrètement.

3) Expression pratique du débit pour un débitmètre à organe déprimogène

Avant de passer à une description des différents organes déprimogènes, nous allons donner la forme définitive de l'expression permettant de calculer le débit.

En fait, par rapport à l'expression théorique, on introduit des coefficients correctifs « tout simplement » !!

Du point de vue de l'utilisateur (et, par conséquent de l'étudiant de CIRA), il est fondamental de se rappeler la formule sous la forme :

$$Q_V = K_V \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad \text{pour le débit volumique, avec } K_V = \text{CONSTANTE}$$

$$Q_m = \rho \cdot Q_V = \rho \cdot K_V \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} = K_m \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta p} \quad \text{pour le débit massique, avec } K_m = \text{CONSTANTE}$$

a- la norme ISO 5167-1 :

alors qu'aux Etats-Unis la norme la plus utilisée pour ce type de calculs est l'API 2530, en Europe, la référence est la norme ISO 5167-1.

Cette norme traite de la forme et des conditions d'emploi des différents appareils déprimogènes, et donne également des informations relatives au calcul du débit et des incertitudes associées.

Les éléments déprimogènes normalisés (il en existe d'autres ...) sont les diaphragmes à bord droit, les tuyères et les tubes de Venturi. Ils seront décrits dans les paragraphes suivants.

b- la formule de calcul :

on introduit :

- **un coefficient de décharge « C »** qui permet de corriger l'erreur due à la perte de charge introduite par l'organe déprimogène. Ce coefficient est fonction du nombre de Reynolds R_e . Par exemple, pour un Venturi, $C \approx 0,97$ à $0,99$ tandis que pour un diaphragme, $C \approx 0,6$. Il est donné précisément par la norme ISO 5167-1.
- **le coefficient de vitesse d'approche « $E = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$ »**
- **un coefficient qui tient compte de la nature compressible du fluide « \mathcal{E}_1 »**. Ce coefficient vaut 1 pour les fluides incompressibles, et sera fonction de caractéristiques thermodynamiques pour un fluide compressible (comme les chaleurs spécifiques massiques c_p et c_v ).
- **les indices :** (1) pour la prise de pression en amont de l'organe déprimogène, et évidemment (2) pour la prise de pression en aval de cet organe déprimogène
- **la masse volumique ρ_1 dans la formule est donc celle en amont**

la formule du débit volumique s'écrit alors :

$$Q_V = C.E.\mathcal{E}_1.S_2.\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_1}}$$

et celle du débit massique :

$$Q_m = C.E.\mathcal{E}_1.S_2.\sqrt{\rho_1.\Delta p}$$

c- exemple de calcul du coefficient de décharge :

pour un diaphragme, placé sur une conduite de diamètre D avec des prises de pression situées à L_1 en amont et L_2 en aval, le coefficient de décharge est donné par l'équation de Stolz :

$$C = 0,059 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,184\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5}.\left(\frac{10^6}{R_e}\right)^{0,75} + 0,09.L_1.\beta^4.E - \left(\frac{L_2}{D}\right).\beta^3$$

d- principe de détermination de l'organe déprimogène :

Le procédé impose un débit Q_m , dans une canalisation de diamètre D avec un fluide de masse volumique ρ et une viscosité dynamique μ . Il faut donc déterminer le couple $\{\Delta p, d\}$ c'est à dire le diamètre intérieur de l'organe différentiel « d » ainsi que la pression différentielle Δp qui y sera mesurée.

*****1^{ère} ETAPE*****

on se fixe une Δp parmi différentes valeurs « standards » : 60, 120, 240 et 480 mbar.

Mais, rien n'interdit de prendre d'autres valeurs.

La pression différentielle étant fixée, on utilise la formule donnant le débit massique

$Q_m = C.E.\varepsilon_1.S_2.\sqrt{\rho_1.\Delta p}$, dans laquelle, on se fixe également les valeurs de :

- coefficient de décharge $C = 0,6$
- coefficient de vitesse d'approche $E = 1$
- coefficient de détente $\varepsilon_1 = 1$

On peut tirer de ces hypothèses, la valeur de « d » : $d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_m}{\sqrt{\rho_1.\Delta p}}}$

On possède alors une estimation de « d » et donc de « β ».

→ on vérifie pour le couple $\{\Delta p, d\}$ si les limites imposées par la norme NF ISO 5167-1 sur β et Re sont respectées.

→ si aucun couple $\{\Delta p, d\}$ ne convient, il faut envisager de changer le diamètre « D » de la tuyauterie.

*****2^{ème} ETAPE *****

on affine le résultat obtenu après la 1^{ère} étape, en :

- calculant le coefficient de détente ε_1 si le fluide est incompressible
- calculant le coefficient de vitesse d'approche E
- calculant la portée du débitmètre
- ajustant la valeur de « d » afin d'avoir la portée désirée.

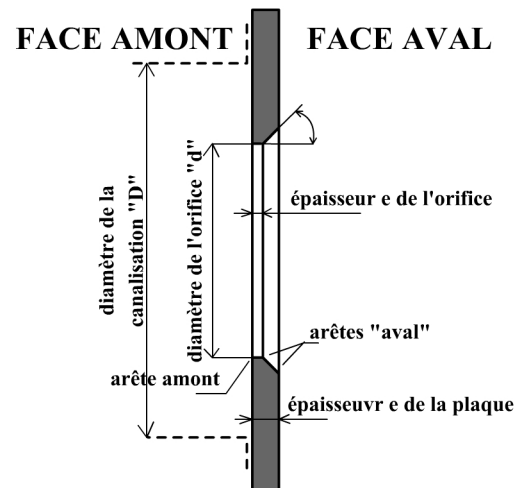
A partir de la valeur « définitive » de « d », on calcule le coefficient de décharge C et la portée réelle du débitmètre, ainsi que la perte de charge Δp_c dans l'organe déprimogène.

4) Le diaphragme (orifice plate) à bord droit

Le diaphragme est le moins cher, et le plus simple des organes déprimogènes. Il s'agit, ni plus ni moins d'un trou percé dans une plaque. Evidemment, ce trou sera déterminé en fonction de la norme ISO 5167-1.

Signalons les principales caractéristiques :

- l'épaisseur e est comprise entre 0,005.D et 0,02.D
- l'épaisseur E est, elle, comprise entre e et 0,05.D
- l'arête amont ne doit présenter aucune bavure (arête vive)



De plus, le diamètre d doit être supérieur à 12,5 mm, tandis que le rapport d'ouverture $\frac{d}{D}$ doit rester compris entre 0,20 et 0,75.

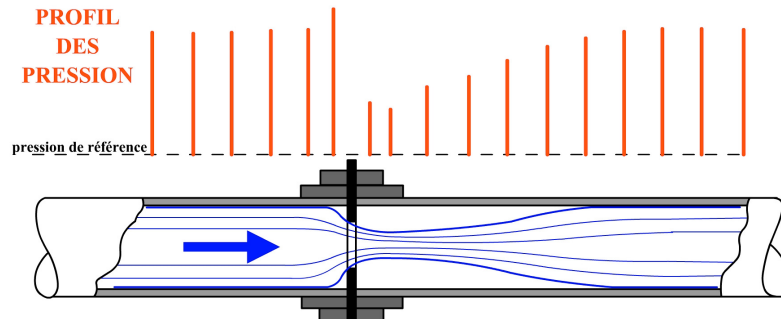
Cet orifice doit être cylindrique et perpendiculaire à la face amont.

Mais, si le diaphragme est le moins onéreux des organes déprimogènes, c'est aussi lui qui introduit la plus grande perte de charge des organes déprimogènes, puisque l'accroissement d'énergie cinétique est entièrement perdu en frottements dans le fluide situé en aval.

La valeur de cette perte de charge est de 40 % à 95 % de la Δp mesurée.

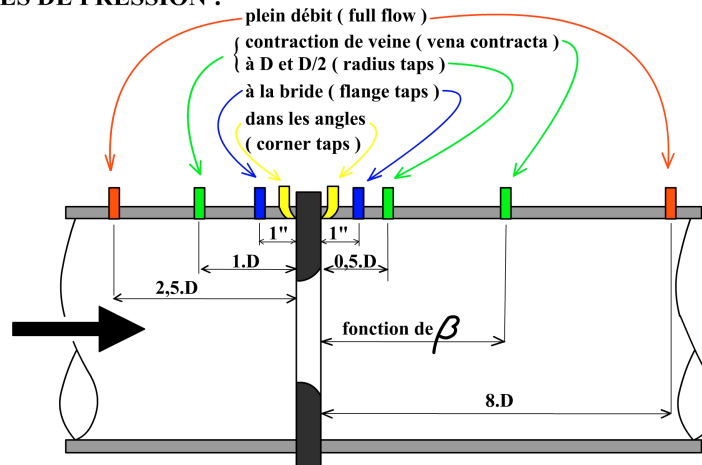
Remarquons d'ailleurs qu'il ne faut pas confondre la perte de charge avec la pression différentielle mesurée (par contre, cette perte de charge dépend de la pression différentielle mesurée ...).

Le profil des vitesses au passage d'un diaphragme est donné sur le schéma ci-dessous :



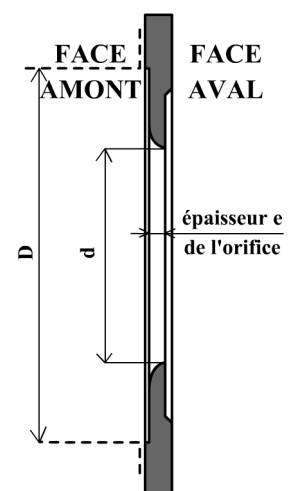
Et les prises de pression possibles sont mentionnées sur la figure ci-après :

PRISES DE PRESSION :



Les limites d'utilisation des diaphragmes à bord droit en fonction du nombre de Reynolds s'expliquent par le fait que, pour un rapport β donné, le coefficient de décharge « C » est pratiquement constant au-dessus d'un certain nombre de Reynolds (dit « limite »), alors qu'il varie de façon non négligeable au-dessous de cette limite.

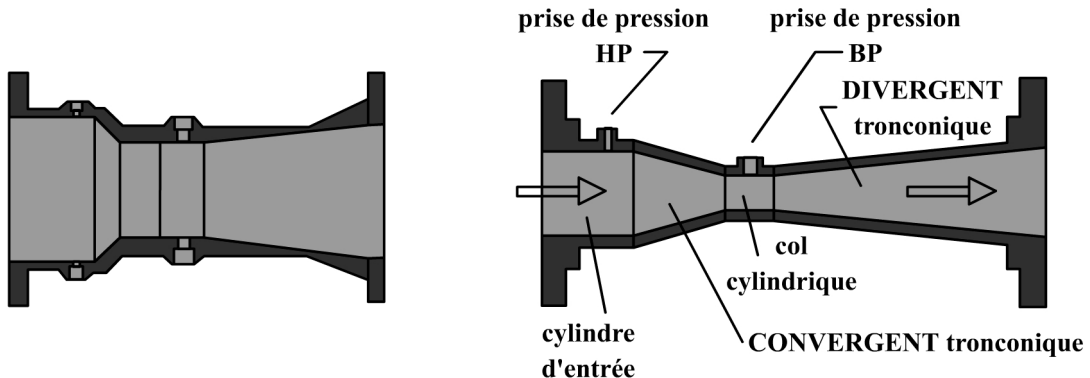
C'est pourquoi, aux faibles nombres de Reynolds, on préfère utiliser des diaphragmes à bord amont, en quart de cercle. Ceux-ci sont alors beaucoup moins sensibles aux variations du nombre de Reynolds.



5) Le tube de Venturi (Venturi tube)

Le tube de Venturi classique est le plus vieux des débitmètres à pression différentielle, employé pour la première fois en 1887.

Parce qu'il canalise bien mieux la veine de fluide qu'un diaphragme, sa précision est bien meilleure. De plus, son coefficient de décharge est proche de l'unité (typiquement 0,95), et la perte de charge qu'il engendre est bien plus faible.



Là encore, la norme ISO 5157-1 donne toutes les dimensions et instructions utiles à la construction d'un Venturi.

Les principaux inconvénients des tubes de Venturi sont :

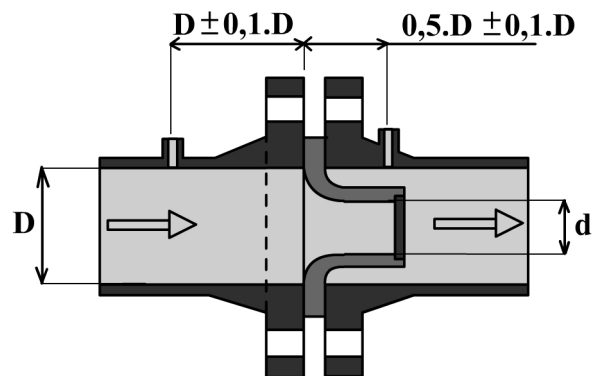
- sa taille, puisqu'elle peut aller à plus de $6.D$, sans compter la longueur nécessaire en amont
- son prix, plus élevé que celui d'un diaphragme

La valeur de la perte de charge qu'il engendre est de 5 % à 20 % de la Δp mesurée.

6) La tuyère (nozzle)

La tuyère est un « diaphragme amélioré », qui épouse la forme de la veine jusque dans sa section contractée.

La partie arrondie a généralement un profil en « quart d'ellipse », excepté pour les faibles débits où on utilise un profil en « quart de cercle ».



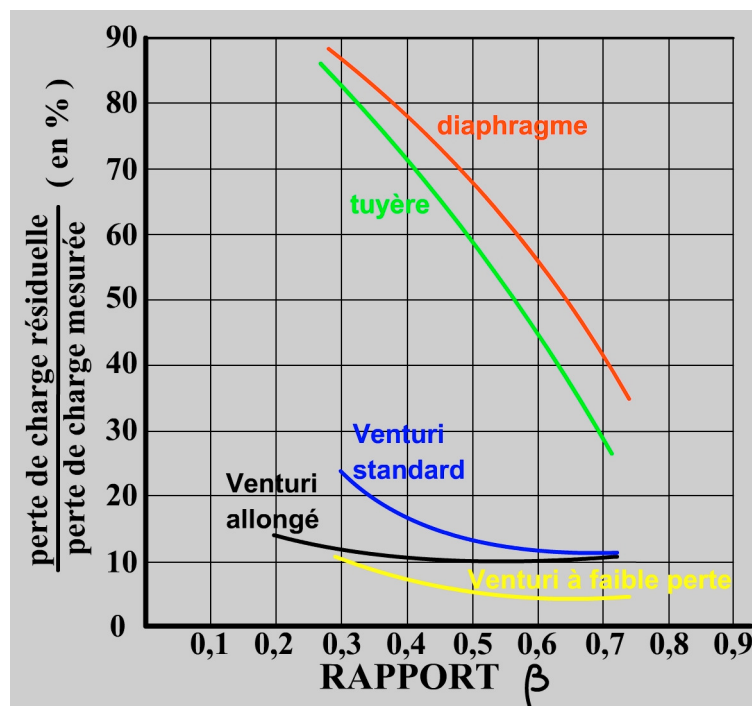
En Europe, c'est la norme ISA 1932 qui est la plus utilisée pour le dimensionnement des tuyères, alors qu'aux Etats-Unis, c'est l'ASME.

7) Comparaison des organes déprimogènes

Pour fixer les idées, on donne un tableau et un graphique résumant les domaines d'emploi et les pertes de charge engendrées.

	PERFORMANCES					APPLICATIONS				
	précision	rangeabilité	Diamètre Canalisation (mm)	Perte De charge	coût	Gaz propre	Gaz chargé	Liquide propre	boue	vapeur
DIAPHRAGME	± 2%	3 : 1	10-1000	FORTE	FAIBLE	OUI	NON	OUI	NON	OUI
VENTURI	± 2%	3 : 1	25-500	FAIBLE	FORT	OUI	PEUT- ÊTRE	OUI		PEUT- ÊTRE
TUYERE	± 2%	3 : 1	25-250	FORTE	MOYEN	OUI	PEUT- ÊTRE	OUI	NON	OUI

perte de charge résiduelle engendrée, en fonction de β , par divers organes déprimogènes :



8) Application à la mesure de débit massique d'un gaz

Comme nous l'avons rappelé en 3), le débit massique est donné par une formule du type :

$$Q_m = \rho \cdot Q_v = \rho \cdot K_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} = K_m \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta p}$$

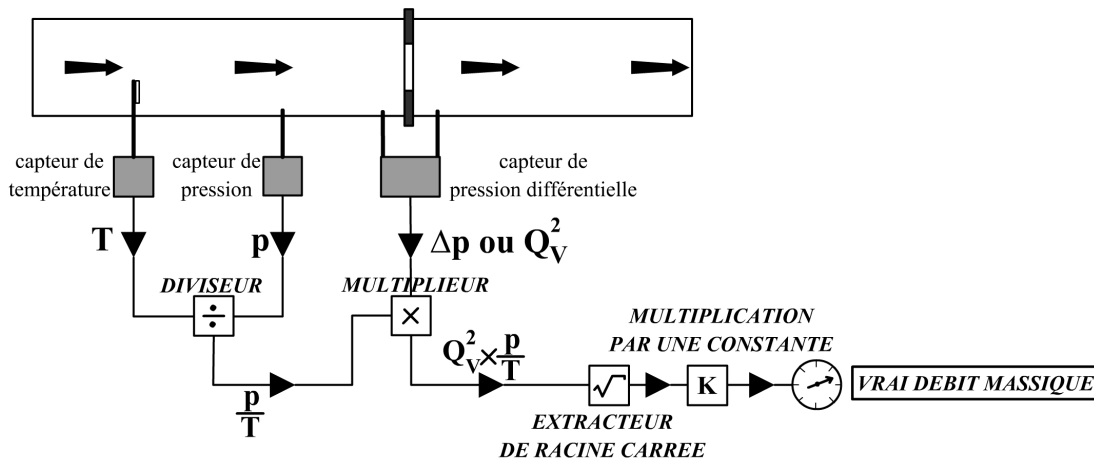
Or, pour un gaz, la masse volumique dépend fortement de la température et de la pression. Dans l'hypothèse d'un gaz parfait, nous pouvons écrire :

$p.V = n.R.T$ ou encore $p = \frac{1}{V} \cdot \frac{m}{M} \cdot R.T = \frac{1}{M} \cdot \rho \cdot R.T$ (puisque $\rho = \frac{m}{V}$, et en notant « M » la masse molaire du gaz parfait).

On a donc une relation du type : $\rho = k \cdot \frac{p}{T}$, ce qui signifie, pour le débit massique :

$$Q_m = K \cdot \sqrt{\frac{p}{T} \cdot \Delta p}$$

Une mesure du débit massique est donc possible en associant à la mesure de pression différentielle, une mesure de la pression et une mesure de la température en amont. C'est ce que réalise le circuit électrique ci-dessous :



Ce schéma réalise une « correction de débit ».

ATTENTION : la correction de débit est **nécessaire** parce que la masse volumique d'un gaz dépend fortement de la température et de la pression. L'organe déprimogène a été installé et calibré à partir d'un gaz pris dans certaines conditions (notées par exemple p_0, T_0), mais, les conditions réelles sont rarement celles-ci. Il faut donc corriger la valeur annoncée (qui est celle des conditions p_0, T_0 !!!).

CETTE CORRECTION EXISTE MEME SI LE GAZ PEUT ETRE CONSIDERE COMME INCOMPRESSIBLE !

III LES DEBITMETRES UTILISANT LA PRESSION DYNAMIQUE

Dans le cours de physique, nous avons défini :

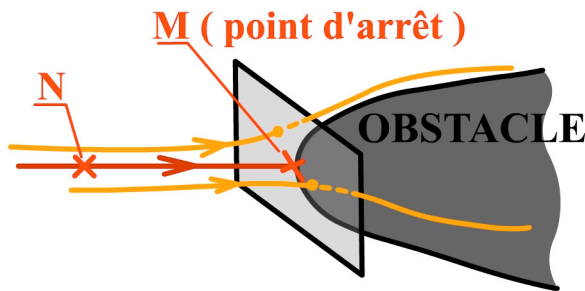
- la pression statique $p + \rho \cdot g \cdot z$
- la pression dynamique $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$

et, nous avons aussi étudié un dispositif permettant la mesure directe de la pression dynamique : le tube de Pitot.

Ainsi, de par la relation $Q_V = v_{moy} \cdot S$, ce tube de Pitot permet une mesure du débit (évidemment, nous supposons encore une fois que le coefficient $\alpha \approx 1 \dots$). Il s'agit donc d'un débitmètre exploitant la mesure de la pression dynamique.

Les deux débitmètres évoqués dans ce paragraphe sont : la sonde de Pitot, et la sonde de Burton encore appelée sonde annubar, qui est en fait un groupement de tubes de Pitot.

1) Rappel de mécanique des fluides



En présence d'un obstacle, les L.C. contournent l'obstacle, mais il y en a au moins une qui s'arrête en un point de cet obstacle (point M sur le dessin).

En ce point M appelé **point d'arrêt** :

$$v_M = 0$$

la charge totale, exprimée en pression est :

$$P_{totale,M} = p_M + \rho \cdot g \cdot z_M = p_M^*$$

tandis qu'en un point N, en amont de M et sur la même L.C. :

$$P_{totale,N} = p_N + \rho \cdot g \cdot z_N + \frac{1}{2} \rho \cdot v_N^2 = p_N^* + \frac{1}{2} \rho \cdot v_N^2$$

par différence, on obtient (dans le cas où $z_M = z_N$) puisque le long d'une L.C. la charge totale est constante :

$$p_M = p_N + \frac{1}{2} \rho \cdot v_N^2 \quad \text{qui représente « la pression d'arrêt »}$$

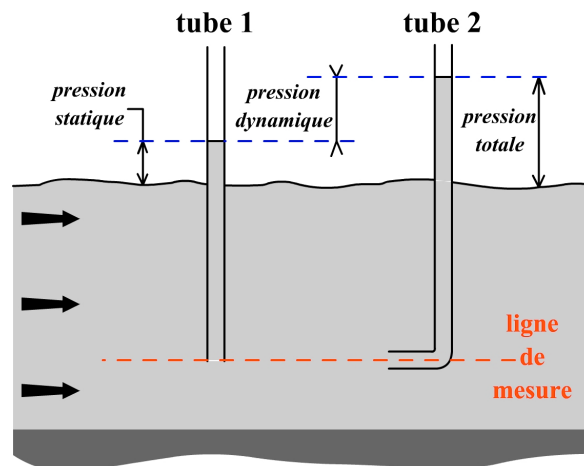
Il y a donc une possibilité de mesurer une vitesse de fluide. C'est ce qui est mis en pratique dans la sonde de Pitot.

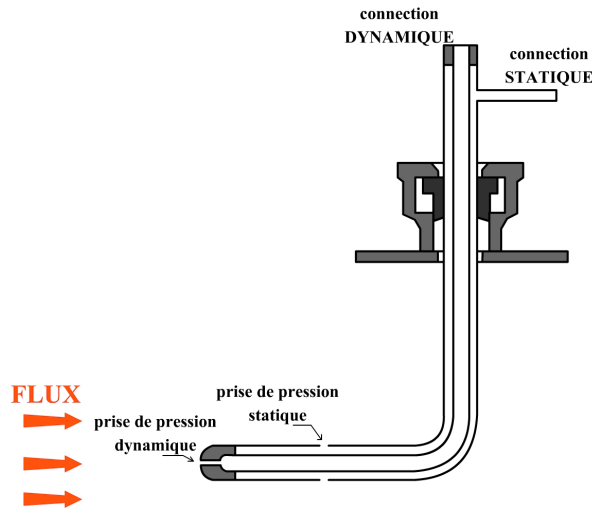
2) La sonde de Pitot (« Pitot tube »)

Elle est constituée par un jeu de deux tubes :

- un tube qui donne accès à la pression statique en un point de la section
- un tube qui donne accès à la pression dynamique en ce même point

La différence de ces deux pressions, mesurée par un manomètre différentielle, permet d'avoir une image de la vitesse du fluide sur la ligne de mesure.





En notant « S » la section de la canalisation, et « ρ » la masse volumique du fluide :

$$P_{TOTAL} = P_{STATIQUE} + P_{DYNAMIQUE}$$

soit :

$$P_{DYN} = P_{TOT} - P_{STAT} = \Delta p$$

ce qui donne :

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \Delta p$$

D'où la mesure de la vitesse du fluide, au point d'impact du tube de Pitot :

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}}$$

Et, si la vitesse du fluide peut être considérée comme uniforme sur toute la section S de la canalisation :

$$Q_V = S \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}}$$

Le tube de Pitot est l'un des capteurs les plus simples, utilisé dans une large gamme de mesure de débits : entrée d'air dans les voitures de course et les avions de combat, mais aussi pour les mesures de débits d'air, de liquides dans les conduites industrielles ouvertes ou fermées.

Alors que sa précision, et sa rangeabilité sont modestes, sa mise en place est simple (il peut être placé dans des canalisations déjà existantes sans interruption du processus ...), et il peut être adapté à des conditions extérieures extrêmes.

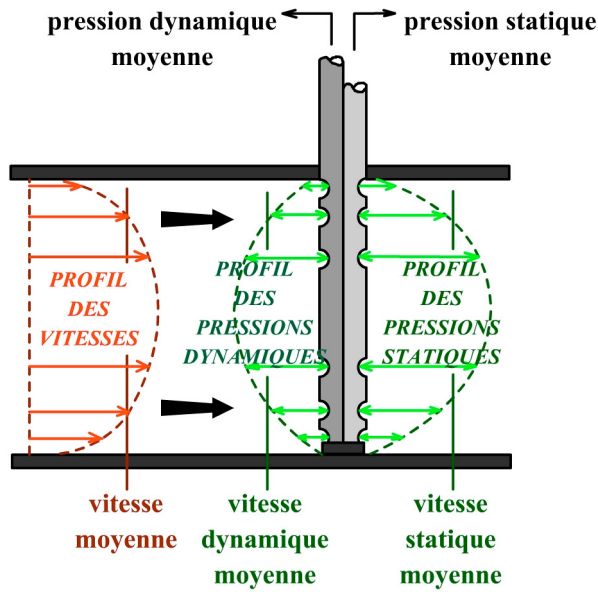
Les tubes de Pitot doivent être utilisés pour des régimes hautement turbulents ($Re > 20\,000$).

3) La sonde annubar (ou de Burton)

La formule $Q_V = S \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}}$ n'est applicable que si la vitesse mesurée par le tube de Pitot

est quasi-constante sur la section. Ou, ce qui revient au même, que si la vitesse mesurée est bien la vitesse moyenne.

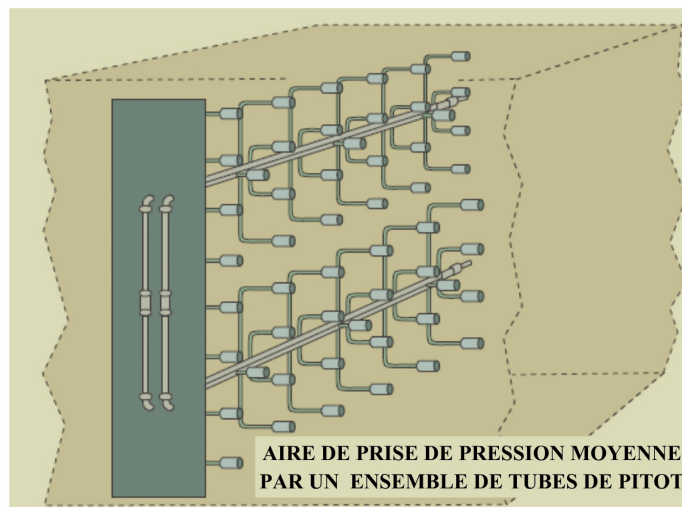
L'idée est donc de placer, non plus un tube de Pitot, mais plusieurs le long d'une section. Cet ensemble de tubes de Pitot forment une sonde appelée « sonde annubar ».



Le tube de prise de pression dynamique ne porte plus une seule ouverture, mais plusieurs, réparties afin de mesurer la pression dynamique moyenne.

De même pour le tube de prise de pression statique.....

On peut trouver des ensembles de tubes de Pitot placés sur de grandes sections d'écoulement, afin d'avoir une mesure de la vitesse moyenne d'écoulement :



4) Comparaison avec un organe déprimogène

Soit un organe déprimogène, de diamètre intérieur « d », placé dans une canalisation de diamètre « D » (nous avons défini le rapport $\beta = \frac{d}{D}$). Le différentiel de pression qu'il crée

s'exprime par :
$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \left(\frac{S^2}{s^2} - 1 \right) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot (\beta^{-4} - 1)$$

Tandis que pour le tube de Pitot, le différentiel mesuré s'écrit :
$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

Ainsi, pour une valeur courante de $\beta \approx 0,6$, le terme $(\beta^{-4} - 1) \approx 6,7$

L'élément déprimogène a un coefficient d'amplification de 6,7 par rapport au tube de Pitot.

IV LES DEBITMETRES A SECTION VARIABLE

L'idée d'utiliser une pression différentielle pour la mesure d'un débit, comme dans les organes déprimogènes, peut aussi être appliquée dans les débitmètres à section variable. MAIS, avec une différence fondamentale : c'est la section de passage qui varie, le champ de pression restant quasiment constant

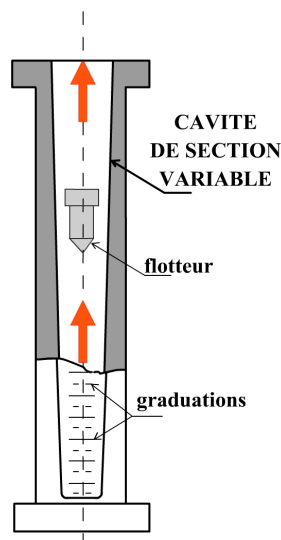
Ainsi, le terme de « débitmètre à section variable » renvoie aux débitmètres pour lesquels la section de passage pour le fluide varie avec le débit : il s'agit principalement des rotamètres, et des débitmètres à vanne mobile. La mesure du débit est alors donnée par une quantité géométrique comme une hauteur de ludion, ou un angle de vanne.

Le débitmètre à vanne mobile est plutôt utilisé comme un indicateur local, et non comme un débitmètre, aussi sera-t-il présenté succinctement.

1) Le rotamètre (« tapered-tube meter », ou « rotameter »)

a- description :

Le rotamètre est un débitmètre simple et robuste pour les gaz et les liquides qui tient une large part dans le marché des canalisations inférieures à 100 mm.

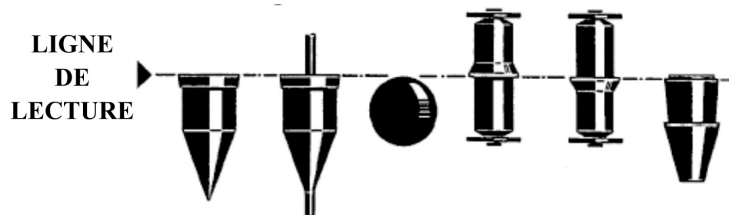


Il est constitué d'un tube en verre transparent, dont l'intérieur est conique (ou, en tout cas de section variable ...), la section la plus étroite étant dirigée vers le bas.

A l'intérieur de ce tube est placé un ludion (« bob »), de masse volumique ρ_L plus élevée que celle du fluide ρ . La forme de ce ludion, et sa masse volumique ρ_L sont choisies en fonction du fluide et du débit maximal à manipuler.

Le terme « ludion » est préférable au terme « flotteur » puisque dans tous les cas, il est totalement immergé.

Quelques formes possibles du ludion :



A noter que la forme sphérique est souvent retenue pour les tubes de petits diamètres. De plus, ce ludion possède des petites rainures tout autour de sa partie supérieure.

Le rôle de ces petites rainures est d'induire une légère rotation (fréquence de l'ordre d'1 Hz), afin d'augmenter la stabilité du ludion (effet gyroscopique).

Pour les rotamètres à tubes très larges, on ajoute parfois une tige dans l'axe du ludion afin d'éviter un retournement de celui-ci.

b- bilan des forces :

Le fluide circule du bas (faible section) vers le haut (forte section) du rotamètre.

Le ludion est soumis à trois forces :

- son poids \vec{P} (vers le bas)
- la poussée d'Archimède $\vec{\pi}_A$ (vers le haut)
- la traînée \vec{F} (vers le haut)

Le bilan, en régime permanent (c-à-d flotteur à l'équilibre) s'exprime par :

$$\vec{P} + \vec{\pi}_A + \vec{F} = \vec{0}$$

En notant « ρ_L » la masse volumique du ludion, « V_L » le volume du ludion, et « ρ » la masse volumique du fluide ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) :

$$P = \pi_A + F \Rightarrow \rho_L \cdot V_L \cdot g = \rho \cdot V_L \cdot g + F$$

à ce stade, nous devons donner l'expression de la traînée, qui résulte des différentes forces de frottement s'exerçant sur le ludion (sans démonstration ...) :

$$F = C_x \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot S_L$$

avec :

- C_x : coefficient de traînée qui est quasiment constant pour $100 \leq Re \leq 200000$
- S_L : section de ludion équivalente (section du ludion projetée sur un plan \perp à v)

Ainsi :

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{V_L \cdot g \cdot (\rho_L - \rho)}{C_x \cdot \rho \cdot S_L}}$$

Dans cette expression, tous les termes sont constants,

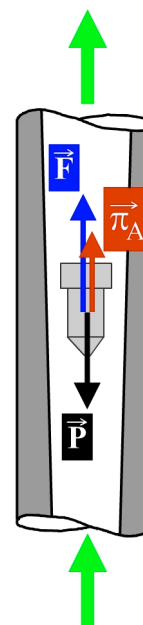
$$v = C^{ste} \text{ autour du ludion}$$

CONSEQUENCE IMPORTANTE :

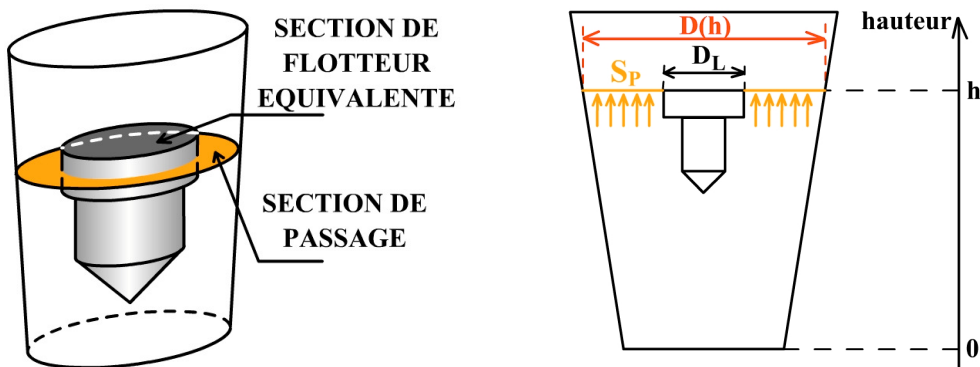
« le profil des vitesses au voisinage du ludion étant constant, le ludion va se positionner en conséquence, à condition que la section du tube soit variable »

Précisons :

appelons « D_L » le plus grand diamètre du ludion, et « $D(h)$ » le diamètre du tube à la hauteur « h ». Alors, la section par laquelle circule le fluide, appelée section de passage « S_p » s'obtient par,



$$S_p = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2(h) - D_L^2)$$



Cette section de passage dépend bien évidemment de la hauteur « h » du ludion.
Pour finir :

$$Q_V = S_p \cdot v = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2(h) - D_L^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{V_L \cdot g}{C_x \cdot \rho \cdot S_L} \cdot (\rho_L - \rho)}$$

ou encore, en remarquant que la section de passage est une « donnée constructeur S(h) » :

$$Q_V = C^{ste} \cdot S(h) \cdot \sqrt{\frac{m_L \cdot g}{\rho \cdot S_L} \cdot \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_L} \right)}$$

c- nécessité d'un étalonnage :

afin de déterminer les graduations de son rotamètre, le constructeur utilise un ludion bien précis, sur un fluide bien précis (souvent pour les liquides, de l'eau à 15 °C, et pour les gaz, de l'air à 15°C sous 1 bar). A priori, la valeur lue sur ce rotamètre, ne sera exacte que pour ce ludion, et ce fluide.

Son emploi serait bien limité si on ne pouvait sortir de cet étalonnage.

Dans les autres cas (ludion différent et/ou fluide différent), on applique le terme correctif suivant (les valeurs indicées « 0 » concernent le fluide d'essai, et les valeurs indicées « 1 » concernent le fluide étudié) :

$$Q_{V,REEL} = Q_{V,LU} \cdot \frac{D_{L,1}}{D_{L,0}} \cdot \sqrt{\frac{m_{L,1}}{m_{L,0}} \cdot \frac{\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_{L,1}} \right)}{\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_{L,0}} \right)}}$$

avec, donc :

- $D_{L,0}$ et $D_{L,1}$ diamètres respectivement du ludion d'essai, et du ludion utilisé
- $\rho_{L,0}$ et $\rho_{L,1}$ leur masse volumique respective
- $m_{L,0}$ et $m_{L,1}$ leur masse respective

- ρ_0^0 le fluide d'étalonnage, dans les conditions de température et pression de l'étalonnage
- ρ_1 le fluide réellement utilisé, dans éventuellement d'autres conditions que celles de l'étalonnage

d- Caractéristiques :

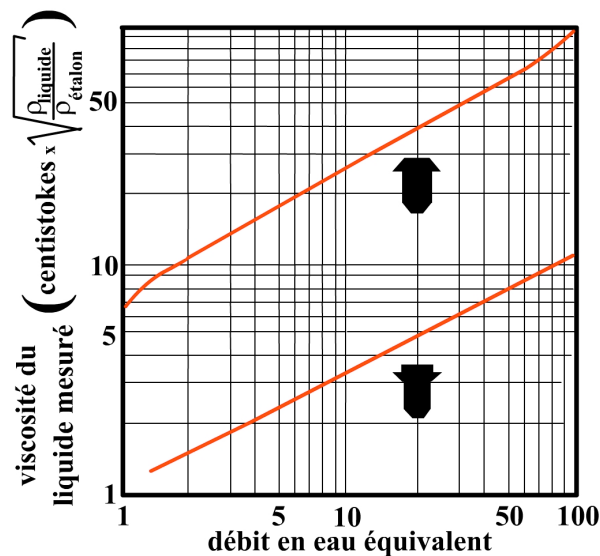
- construction simple et robuste
- grande fiabilité
- faible perte de charge
- utilisable pour une large variété de liquides et gaz
- portée typique pour de l'eau : 0,04 L/h à 150 m³/h
- portée typique pour de l'air : 0,5 L/h à 3000 m³/h
- rangeabilité de l'ordre de 10 :1
- imprécision de l'ordre de 0,4% à 4% du débit maximal
- insensible aux turbulences en amont (donc, pas de contrainte sur la forme de la conduite en amont)
- température maximale d'utilisation de l'ordre de 400 °C
- pression maximale d'utilisation de l'ordre de 40 bar
- faible coût
- faible prix d'installation

Signalons aussi quelques problèmes inhérents aux rotamètres :

- nécessité de les installer verticalement
- non utilisable pour les faibles débits (le coefficient C_x varie énormément)
- non utilisable pour les vapeurs saturées
- non utilisables pour les liquides corrosifs, et/ou contenant des résidus solides
- non utilisables pour les gaz contenant des résidus solides

La plupart des rotamètres sont insensibles aux variations de viscosité. Les plus sensibles sont les plus petits rotamètres, avec des ludions sphériques, tandis que les très grands y sont quasiment insensibles.

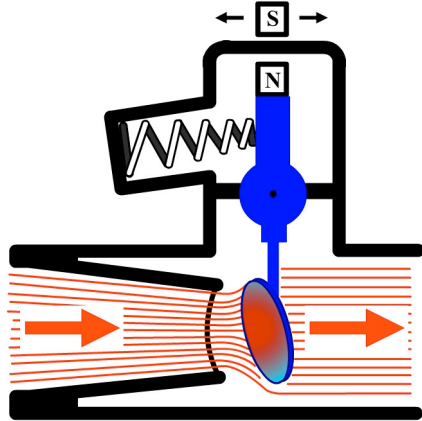
Les limitations de chacun sont données par une documentation constructeur (exemple ci-dessous).



2) Le débitmètre à vanne mobile

Le débitmètre à vanne mobile est un composant robuste, tout indiqué pour les débits très importants lorsqu'une précision modeste est requise.

Les fluides fortement chargés en impuretés peuvent également être mesurés.



Son principe est illustré par le schéma ci-contre : Un volet, qui ferme la canalisation à débit nul grâce à un dispositif de rappel (un ressort par exemple), va subir une force (due à la pression dynamique) dès qu'un débit sera établi dans la canalisation.

On accède à la lecture du débit par une échelle indexant le déplacement de la vanne.

Là encore, un étalonnage sera nécessaire en fonction du fluide utilisé.

Un exemple de réalisation est présenté ci-dessous :

