

CH 5 DEBITMETRIE

5.0- INTRODUCTION

Débitmétrie

Comme le nom l'indique, il est question ici de mesurer le débit (a priori volumique) d'un écoulement fluide dans un tube ou un canal.

Comme on le constate dans les tables du § 5.5, il existe différents procédés de mesure des débits mettant en œuvre des procédés physiques distincts.

Les **systèmes linéaires** ou quasi linéaires donnent $Q \propto \text{Signal}$: ils exploitent principalement l'électromagnétisme, la propagation des ultrasons, la rotation d'éléments tournants (genre roue à ailettes), un écoulement à section variable (Rotamètre § 5.1) ou encore d'autre effet mécanique (Vortex, Coriolis ...)

D'autres systèmes très courants et basés sur des pertes de charges lors d'un écoulement, ne sont pas linéaires : le diaphragme (§5.3) et le tube de Pitot (§ 5.2) (ou encore les tuyères à Venturi) donnent $Q \propto \text{Signal}^{1/2}$, le déversoir triangulaire donne $Q \propto \text{Signal}^{5/2}$

Les débitmètres traités dans ce chapitre

Dans la progression du Cours, ce chapitre a pour objectif principal de proposer à la suite du Ch2 d'autres exemples d'écoulements simples analysables uniquement à l'aide des concepts de débit et de charge. **On prend en compte « la réalité » des frottements par des coefficients correcteurs globaux** (suivant en cela le principe directeur de la Norme AFNOR) mais en restant dans le cadre de la formulation du Théorème de Bernoulli.

Chacun des exemples retenus propose un **aspect métrologique** particulier.

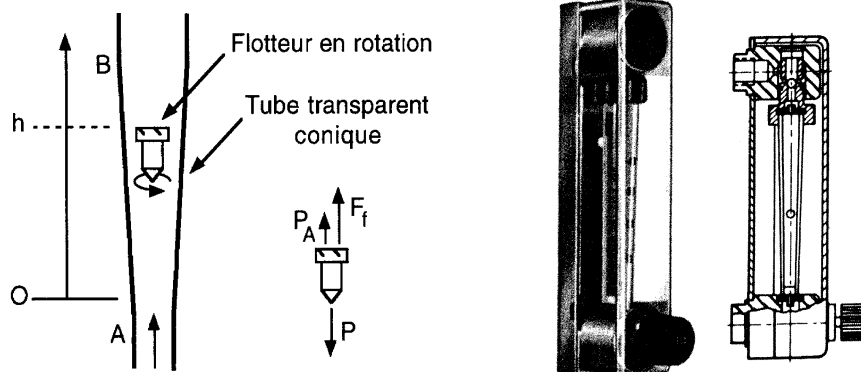
5.1- DEBITMETRE A SECTION VARIABLE (ROTAMETRE)

Un rotamètre est constitué d'un tube transparent de faible conicité s'évasant vers le haut dans lequel un « flotteur » est libre de se mouvoir verticalement : on remarquera donc que la surface par laquelle le fluide passe autour du « flotteur » dépend de la hauteur, ou encore que **la section d'écoulement est de surface variable**.

Le principe est que le « flotteur » se stabilise en équilibre à une hauteur fixe par rapport au référentiel de la tuyauterie et qui dépend essentiellement du débit du fluide.

Des rainures pratiquées sur le flotteur permettent au fluide d'imposer une rotation au flotteur qui stabilise le flotteur verticalement par effet gyroscopique afin de faciliter la lecture (cette rotation n'a rien à voir avec le principe de fonctionnement du débitmètre).

Notation :
cône : petit diamètre b , grand diamètre B , hauteur totale h_t , diamètre d à la hauteur h
Flotteur : masse m_f , diamètre d_f , volume V_f , masse volumique ρ_f et C_x
Liquide : masse volumique ρ



a- Analyser les forces mises en jeu dans le fonctionnement d'un rotamètre. Préciser les conséquences pratiques (montage, lecture...)

b- En se basant sur l'équilibre du flotteur, déterminer la vitesse moyenne u du fluide dans la zone de passage restreint (on notera que le frottement est pris en compte dans la traînée). On remarquera qu'elle est indépendante du débit.

c- Montrer que pour un débit Q donné, la vitesse u étant fixée par les caractéristiques du rotamètre, la grandeur « image » du débit est alors la surface par laquelle le fluide s'écoule (d'où l'appellation de cette famille de débitmètre !)

Montrer que lorsque le flotteur change de position d'équilibre, la surface de passage du fluide change. Montrer que la relation entre le débit volumique Q et la hauteur lue h est : $Q = \alpha h^2 + \beta h + \gamma \approx \beta h + \gamma$

La relation est-elle linéaire ? quasi-linéaire ? (préciser les avantages d'une telle propriété).

d- Soit un rotamètre à liquide étalonné de façon standard, c'est à dire pour de l'eau à 15°C. Déterminer le facteur de correction nécessaire si on l'emploie pour de l'essence à 20°C (en négligeant la dilatation du rotamètre).

Donnée : masse volumique de l'essence à 15°C $\rho_{15} = 710 \text{ kg.m}^{-3}$ et $\rho_f = 8020 \text{ kg.m}^{-3}$

Correction de la masse volumique de produit pétrolier selon la norme ASTM D 1250

Connaissant la masse volumique à 15°C ρ_{15} d'un produit pétrolier, on peut calculer sa masse volumique à une température t °C par $\rho_t = A \times \rho_{15}$

On calcule $A = \exp[-\alpha_{15}(t - 15)(1 + 0.8 \alpha_{15}(t - 15))]$ avec $\alpha_{15} = \frac{K_0}{\rho_{15}^2} + \frac{K_1}{\rho_{15}}$

Pour ρ_{15} compris entre 650 et 778.5 kg.m^{-3} , on a $K_0 = 346.4228$ et $K_1 = 0.4388$

Pour ρ_{15} compris entre 779 et 838.5 kg.m^{-3} , on a $K_0 = 594.5418$ et $K_1 = 0$

Pour ρ_{15} compris entre 839 et 1075 kg.m^{-3} , on a $K_0 = 186.9696$ et $K_1 = 0.4862$

Limite : t compris entre -15°C et 150°C

Exception : gaz liquéfiés, lubrifiants

Le TP « Boucle de débitmétrie eau » propose une étude de modèle $Q = \alpha h^2 + \beta h + \gamma \approx \beta h + \gamma$ pour un rotamètre par étalonnage sur un débitmètre électromagnétique.

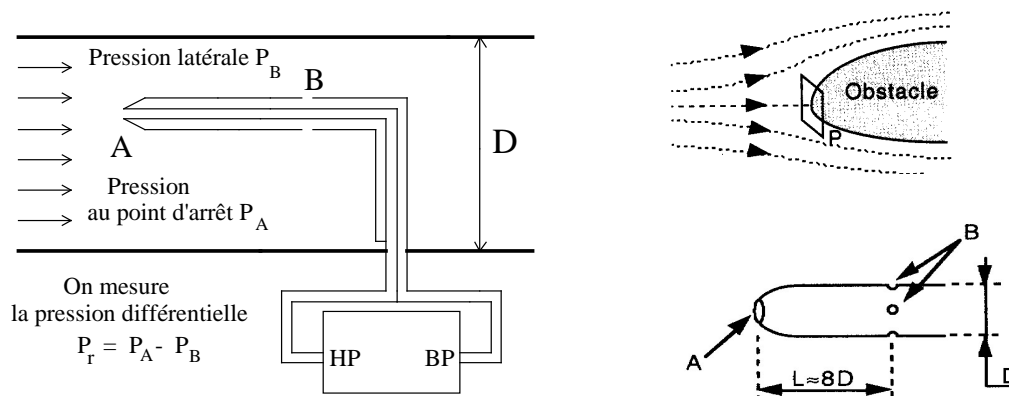
5.2- DEBITMETRE A TUBE DE PITOT

Mesure d'une vitesse avec un tube de Pitot (dans le cas du vent, on emploie le terme d'**anémomètre**)

Le tube de Pitot doit être disposé face à l'écoulement ; si possible horizontalement dans le cas des liquides. Son diamètre doit être suffisamment faible pour que sa présence ne modifie pas sensiblement la section de passage du fluide.

On montre par la suite que cet appareillage (tube de Pitot et manomètre différentiel) n'a pas une réponse linéaire (la vitesse varie en $\sqrt{\delta P}$). Il a donc une plage d'utilisation limitée (telle que la précision reste suffisante). Cet appareillage est utilisé pour mesurer des vitesses fluides assez élevées 30m/s pour les gaz, 10m/s pour les liquides. Il s'agit en fait de vitesse relative : on mesure la vitesse de déplacement des avions avec un « Pitot ».

Le capteur se présente comme un ensemble de deux tubes concentriques.



Le tube intérieur débouche en tête de capteur (prise de pression en A). Lorsqu'un écoulement fluide rencontre un obstacle placé en son sein, la plupart des lignes de courant contournent cet obstacle. Il existe une ligne au moins qui aboutit en un point de l'obstacle, normalement au plan tangent. Cette ligne particulière, en amont de l'obstacle, n'est pas modifiée par la présence de l'obstacle. A est un point **d'arrêt** de l'écoulement : la vitesse du

fluide y est donc nulle $u_A = 0$. On y mesure la pression P_A . De plus le capteur est disposé horizontalement ; on choisit arbitrairement $z_A = 0$.

Le tube extérieur, étanche par rapport au tube intérieur permet de prendre la pression en B situé sur le coté (en fait il y a plusieurs trous sur la circonférence ; pour éviter les remous B doit être éloigné de A de 6 à 8 fois le diamètre). La vitesse u_B du fluide en B est supposée identique à la vitesse qu'aurait le fluide à l'emplacement du tube s'il n'était pas là. On mesure la pression P_B . Enfin, les diamètres étant petits, on suppose $z_B \approx z_A = 0$

a- En supposant l'écoulement idéal, écrire l'égalité des charges en A et en B.

b- En déduire que la relation entre la vitesse u et la pression différentielle δP que l'on définira,

$$\text{est : } u = \sqrt{\frac{2}{\rho} \delta P}$$

c- Montrer que si le fluide est assimilable à un gaz parfait, on a la relation $u_{\text{gaz parfait}} = \sqrt{\frac{2R}{M} \frac{T}{P} \delta P}$ où

M est la masse molaire du gaz, T sa température et P la pression au niveau du capteur.

Mesurer la vitesse du fluide revient donc à mesurer la pression différentielle entre les points A et B. En pratique, on utilise le plus souvent un manomètre différentiel piezorésistif où δP est proportionnel au courant de sortie (exprimé dans la norme 4-20 mA) : cf. TP « Mesure sur veine fluide d'air »

En général, la non-idéalité de l'écoulement et l'effet de forme de la tête du capteur sont pris en compte par un facteur de correction multiplicatif (souvent proche de 1).

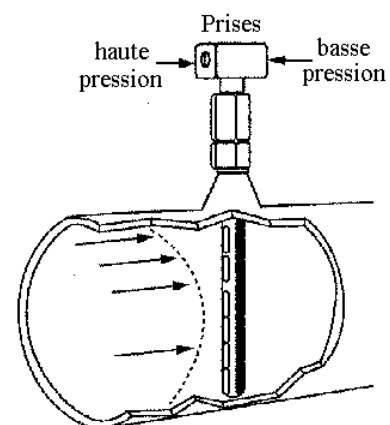
Débitmétrie à tube de Pitot

Il est possible d'exploiter la mesure de la vitesse du fluide pour en déduire le débit volumique de l'écoulement.

Il faut alors considérer les trois cas suivants :

- L'écoulement est supposé idéalement uniforme (peu réaliste dans les faits concrets) : on obtient le débit en multipliant simplement la vitesse moyenne par la surface de la section de la veine fluide $Q = S u$
- L'écoulement n'est pas uniforme (situation fréquente) : la solution est un calcul du débit « par intégration des vitesses ». L'idée est de réaliser une exploration du champ de vitesse afin de connaître le mieux possible la vitesse en fonction des coordonnées XY dans le plan de la section. Puis de définir un découpage de ce plan en un ensemble de petites surfaces où la vitesse sera connue et supposée uniforme (maillage du plan). Ensuite on calcule l'élément de débit dans chaque élément de maille. Enfin on obtient le débit total en additionnant tous ces éléments de débit correspondant à la totalité des éléments de surface du maillage, c'est à dire la surface entière. Cette démarche numérique est en fait une intégration numérique (méthode d'éléments finis). Cette démarche est mise en œuvre dans le TP « Mesure sur veine fluide d'air ».
- Pour un écoulement non uniforme, il a été développé une variante appelée « capteur multitrous » comme la sonde Annubar[®] : on constatera la présence d'orifices de prise de pression sur toute la largeur de l'écoulement. Si celui-ci présente une symétrie de révolution (c'est une situation assez fréquente pour des écoulements qualifiés de « laminaires » cf. chapitre ultérieur), alors le signal de mesure peut être considéré comme moyenné : on détermine donc une valeur proche de la vitesse moyenne (ou « vitesse débitante »). Le fabricant introduit un facteur de correction multiplicatif $K \approx 0.6$ qui tient compte de la géométrie particulière de la sonde.

Sonde Annubar[®]



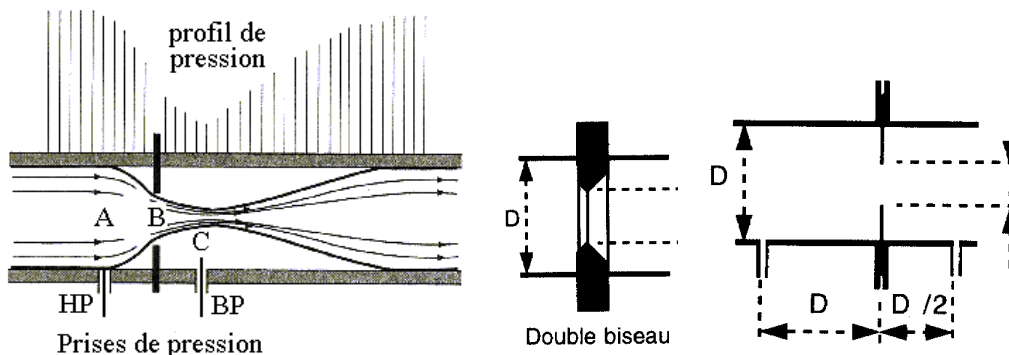
5.3- DEBITMETRE A DIAPHRAGME

Le principe repose sur « l'effet Venturi » (publié en 1797) qui décrit l'écoulement idéal d'un fluide incompressible dans une canalisation horizontale dont la section varie de S_A à S_C : le théorème de Bernouilli traduit donc $H_A = H_C$. La diminution de surface entraîne donc une augmentation de vitesse et par suite une diminution de pression.

Le diaphragme est concrètement une rondelle mince percée d'un orifice biseauté de diamètre d inférieur au diamètre de la canalisation D . Le diaphragme est appelé « organe déprimogène » car il crée une diminution de pression dans le fluide. Le diaphragme doit obligatoirement être disposé dans une canalisation horizontale.

Le rapport des diamètres $\beta = \frac{d}{D}$ est le rapport d'ouverture ; il est compris entre 0,2 et 0,8 ; typiquement 0,5 .

On remarque que l'écoulement à travers le diaphragme se traduit par un resserrement du tube de courant dont le diamètre minimum est plus petit que celui de l'orifice : ce lieu est appelé « veina contracta ». La difficulté est que son lieu précis dépend du débit, tout en restant peu éloigné du point C. Pour palier cela, la norme définit le lieu des prises de pression qui sont situées généralement à des distances normalisées du diaphragme : D en amont, $D/2$ en aval.



a- Exprimer la conservation de la charge $H_A = H_C$

b- En exprimant les vitesses en fonction du débit, déduire une relation simple entre le débit Q_v , les surfaces des sections en A et en C ainsi que la pression différentielle $P_A - P_C = \delta P$ (préciser son signe)

c- Eliminer les surfaces au profit du diamètre de l'orifice d et des coefficients $\beta = \frac{d}{D}$ et $E = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

d- La norme propose de tenir compte des écarts à l'idéalité du modèle d'écoulement en introduisant les coefficients suivants en facteur : $C \approx 0.6$ coefficient de décharge (corrige de la contraction du tube de courant), $\epsilon < 1$ coefficient de détente (corrige de la compressibilité du fluide)

$$\text{Montrer que l'on a : } Q_v = \frac{\pi d^2}{4} C E \epsilon \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\delta P} \quad \text{et} \quad Q_m = \rho Q_v = \frac{\pi d^2}{4} C E \epsilon \sqrt{2\rho} \sqrt{\delta P}$$

e- AN : Pour un diaphragme d'orifice $d = 50$ mm, mesurant un débit d'eau dans une canalisation de diamètre $D = 100$ mm et en prenant $C = 0.62$, donner les relations numériques entre Q_v et $\sqrt{\delta P}$ pour les couples d'unité ($m^3 \cdot s^{-1}$, Pa) et (m^3/h , mbar), puis celle entre Q_m et $\sqrt{\delta P}$ pour les couples d'unité ($kg \cdot s^{-1}$, Pa) et (t/h , mbar),

La norme précise les formules détaillées (!) pour calculer les coefficients de correction :

Calcul de C (formule de Stolz)

$$C = 0.5959 + 0.0312 \beta^{2.1} - 0.184 \beta^8 + 0.0029 \beta^{2.5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.75} + 0.09 L \beta^4 \frac{1}{1-\beta^4} - 0.0337 L \beta^3$$

La distance de « prise à la bride » (!) est $L = \frac{25.4}{D(\text{en mm})}$

Calcul de ϵ (valeur moyenne correspondant à 70% de la pleine échelle)

$$\epsilon = 1 - \frac{(0.41 + 0.35 \beta^4) 0.00049 \delta P}{\kappa P} \quad \text{où } \kappa \text{ est la compressibilité du fluide } (\epsilon = 1 \text{ pour un liquide})$$

5.4- DEBITMETRE A DEVERSOIR (POUR ECOULEMENT A CIEL OUVERT)

Les écoulements liquides peuvent aussi être à ciel ouvert (canal, rivière, fossé ...): l'exemple usuel est un collecteur d'eau pluviale ou d'eau usée (cet exercice est inspiré d'un travail de stage au Service des Eaux à la CARENE Saint Nazaire)

Une technique utilisée consiste à créer une sorte de barrage transversal à l'axe du canal et présentant une encoche. De forme triangulaire, elle réalise un déversoir par laquelle l'eau s'écoule (**soit h** la hauteur entre le niveau supérieur de l'eau et la pointe inférieure de l'encoche et ϑ l'angle au sommet).

Pour simplifier les calculs, on fera plusieurs hypothèses :

- dans le canal précédant le déversoir l'écoulement est régulier, avec la même vitesse particulière u_A en tout point de la section du canal de surface S_A ,
- la surface S_A de la section du canal est très grande devant la surface triangulaire S_D du déversoir,
- la vitesse locale d'écoulement de l'eau au niveau du déversoir ne dépend que de la cote z du point, c'est à dire de la hauteur au dessus du bas de l'encoche (en effet, la vitesse de l'eau n'est pas uniforme sur la surface du jet),
- l'écoulement idéal au niveau du déversoir se fait à charge constante (on néglige les frottements). La correction de non-idéalité pour l'écoulement réel se fait en multipliant le débit idéal par un facteur de correction C déterminé par étalonnage.

Donnée : $\vartheta = 60^\circ$, $C = 0.80$, $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$, $\frac{u(K)}{K} = 1\%$, $h_{\max} = 20 \text{ cm}$, incertitude-type sur h : $u(h) = 2 \text{ mm}$

Relation débitométrique : $Q_{\text{réel}} = K h^{5/2}$

a- Faire deux figures : l'une représente l'écoulement vu de dessus, l'autre l'écoulement vu de face au niveau du déversoir (on prend un axe Ox horizontal et un axe Oz vertical ascendant).

b- Montrer que la vitesse de l'eau dans le canal est négligeable devant celle de l'eau au niveau du déversoir

c- Exprimer la vitesse de l'eau au niveau du déversoir à la hauteur z au dessus du point bas de l'encoche.

d- Déterminer la relation entre le débit et la hauteur h , en conditions idéales. Montrer qu'en conditions réelles, on a la relation $Q_{\text{réel}} = K h^{5/2}$, calculer K .

Analyse métrologique

e- Exprimer l'incertitude-type relative sur le débit $\frac{u(Q)}{Q}$

f- Déterminer h_{\min} correspondant à l'incertitude-type relative maximale tolérée sur le débit, soit 10%.

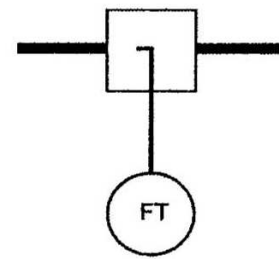
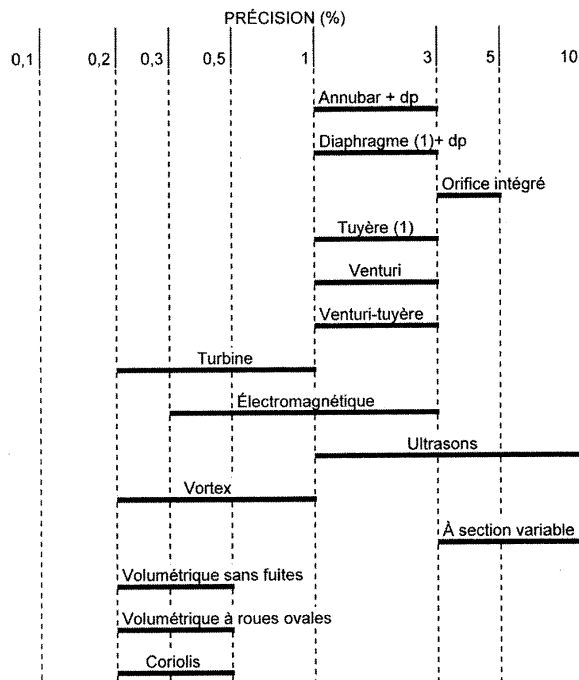
g- Calculer pour h_{\max} , $h_{\max}/2$ et h_{\min} les incertitudes-type relatives sur h et Q , ainsi que le débit Q et son incertitude-type sur $u(Q)$. Préciser l'étendue de mesure en $L.s^{-1}$ et en m^3/h .

5.5- TABLEAUX COMPARATIFS : METHODES, POSSIBILITE, PRECISION...

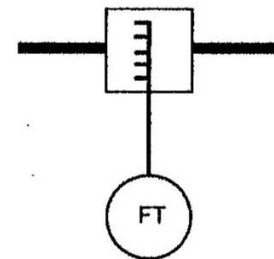
Guide de sélection d'un débitmètre

	LIQUIDE					GAZ		VAPEUR		
	Propre	Chargé en particules	Peu visqueux	Très visqueux	Corrosif	Faible perte de charge	Propre		Chargé en particules	Faible perte de charge
Annubar + mano. différentiel (dp)	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>
Diaphragme (1) + mano.différentiel	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	[2]	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>
Diaphragme à bord arrondi + dp	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>						
Tuyères	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Venturi	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Venturi-tuyère	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Turbine	<input type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Électromagnétique [3]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Ultrasons	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>
Vortex	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
À section variable	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>			
Volumétrique sans fuite	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>							
Volumétrique à roues ovales	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
Coriolis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>								
Après choix d'un ou plusieurs types, voir ou calculer les contraintes suivantes										
Diamètre de la conduite		Tableau 5.1								
Précision requise		Tableau 5.2								
Autres contraintes		Tableau 5.3								
Légende										
Application recommandée <input type="checkbox"/>										
Application possible <input type="checkbox"/>										
Notes										
[1] Tous types à bord droit										
[2] Manomètre différentiel équipé de séparateurs à membrane										
[3] Pour liquide conducteur										

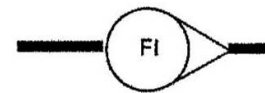
Précision des débitmètres en % de la mesure dans la zone d'utilisation



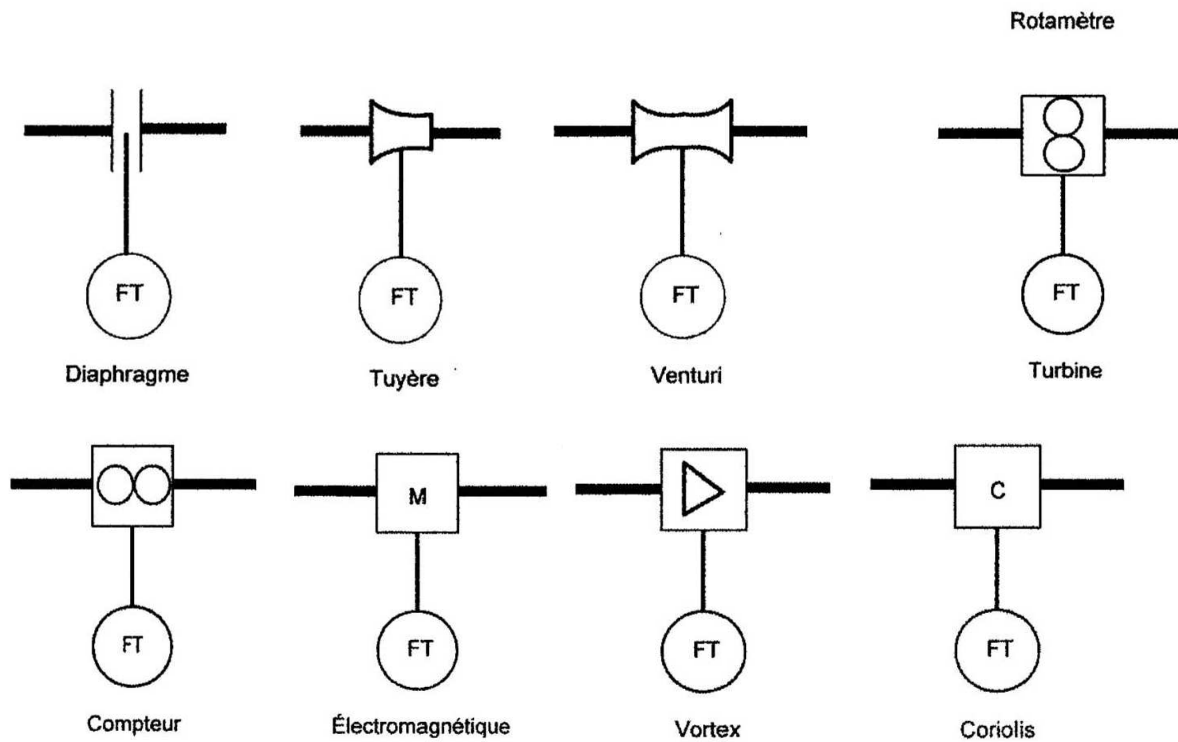
Tube de Pitot



Annubar



Représentation symbolique des différents débitmètres



Rotamètre

Diaphragme

Tuyère

Venturi

Turbine

Compteur

Électromagnétique

Vortex

Coriolis

Les informations du §5.5 sont extraites de : « Instrumentation industrielle » par Michel Grout 2002 Dunod