

Chapitre 2

ASPECTS FONDAMENTAUX ET PRATIQUES DE LA DEBITMETRIE DES FLUIDES INDUSTRIELS

Chapitre 2 - ASPECTS FONDAMENTAUX ET PRATIQUES DE LA DEBITMETRIE DES FLUIDES INDUSTRIELS

2.1 – Introduction

La mesure du débit des fluides est une opération très importante dans toute activité industrielle. Son importance est dictée par les faits suivants dans l'activité de l'entreprise :

- Le contrôle et la régulation du processus de fabrication des produits ;
- La mise en marche des machines énergétiques (moteurs, turbines à gaz, pompes etc..) et
- La commercialisation des fluides énergétiques.

Dans ce chapitre, un exposé est présenté sur les aspects fondamentaux des écoulements de fluides dans les conduites industrielles; Les principales techniques de mesure du débit sont exposées avec un accent particulier sur l'aspect pratique de la débitmétrie.

2.2 – Grandeurs mesurées :

Le débit est la quantité de matière ou de fluide, liquide ou gazeux, qui s'écoule par unité de temps.

En pratique deux grandeurs peuvent être mesurées :

- **Débit-masse** ou **débit massique** Q_m qui s'exprime en kg/s
- **Débit-volume** ou **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-masse au débit-volume :

$$Q_m = \rho \cdot Q_v \quad (2.1)$$

2.3 – Techniques de mesure du débit dans les conduites industrielles

2.3.1 – Classification des Techniques de Mesure du débit dans les conduites industrielles

La mesure du débit en conduite fermée repose sur plusieurs principes. Dans la plus part des principes, on essaye de déterminer la vitesse moyenne de l'écoulement, d'une manière directe,

ou indirectement en utilisant une autre grandeur liée avec elle.

En général, les principes de mesure peuvent être classés comme suit :

- Débitmètres de pression différentielle : L'indication de ces débitmètres est une pression différentielle dont la racine carrée est proportionnelle au débit mesuré. Cette catégorie de débitmètre regroupent les débitmètres à diaphragme, tube de Venturi, la tuyère et le tube de Pitot.
- Débitmètre à **turbine**
- Débitmètre à **ultrasons**
- Débitmètre à **effet vortex**
- Débitmètre **électromagnétique**
- Débitmètre à flotteur (ou **rotamètre**)
- Débitmètres **massiques** (ou débitmètres-masse)

D'après une étude présentée par Bowles (1999), la classification des débitmètres installés dans l'industrie mondiale du gaz montre que les débitmètres à diaphragme constituent 80% du total suivi par les débitmètres turbine avec un taux de 5 à 10 % ; Les technologies émergentes de l'ultrason et à effet vortex commencent à gagner du terrain d'une manière progressive. En Algérie, d'après une étude présentée par Boukhiar (2001), les principales stations de comptage des hydrocarbures installés sur le réseau de pipelines de SONATRACH (composé de 14 oléoducs et 13 gazoducs et de longueur totale de 14.495 km), sont principalement des plaques à orifice (ou diaphragme) , des Venturi et des turbines ; Des débitmètres à ultrasons commencent à être installés depuis le début des années 1990.

2.3.2 – Débitmètres à pression différentielle

2.3.1.1 - Principe et théorie

Le principe d'un débitmètre à pression différentielle est basé sur un système perturbateur statique constitué d'un organe d'étranglement qui provoque une chute de pression dont la valeur est fonction du débit de l'écoulement et des caractéristiques thermodynamiques du fluide à mesurer. Dans ce qui suit nous exposant la théorie de ce débitmètre dans le cas de fluides incompressibles qui repose sur l'application des équations de Bernoulli et de continuité. L'écoulement dans un organe déprimogène est schématisé dans la figure 2.1 ; L'application des deux principes de

conservation de la masse et de l'énergie, pour un écoulement de fluide incompressible, entre les sections de l'écoulement (1) et (2) permet d'écrire :

$$Q_v = V_1.S_1 = V_2.S_2 = Cte \quad (2.2)$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} = Cte \quad (2.3)$$

Avec :

P: est la pression statique du fluide ;

Z : est la hauteur (cote) par rapport à un plan de référence ;

V : est la vitesse de l'écoulement.

ρ : est la masse volumique du fluide ;

g : est l'accélération de la pesanteur.

S : Aire de section de la conduite. (A : L'aire de section de l'orifice $A=S_2$)

La combinaison des équations (2.2) et (2.3) permet d'obtenir une relation pour le débit volumique Q_v :

$$Q_v = C \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}\right)}} A \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (2.4)$$

C est le **coefficient de décharge** du débitmètre

On définit le **rapport d'ouverture** ou rapport des diamètres $\beta = d/D$ (2.5)

Le **coefficient de vitesse d'approche E** :

$$E = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}\right)}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (2.6)$$

Ce coefficient exprime l'effet de la géométrie sur la contraction de la veine fluide.

La relation (2.4) fait apparaître que le signal primaire de la pression différentielle ($\Delta P = P_1 - P_2$) et

par conséquent les erreurs de mesure sur le débit se trouvent multipliées par le coefficient de vitesse d'approche E ; Donc, et afin de réduire cette erreur on doit éviter que le coefficient β ne soit proche de 1, c'est à dire V_1 proche de V_2 .

Il faut noter encore qu'on appelait **coefficient de débit** : $\alpha = C.E$, mais ce paramètre n'est plus utilisé par la norme ISO 5167 (2001).

Les coefficients de décharge C et de débit α dépendent de la géométrie de la conduite et du débitmètre, donc du coefficient β , et du nombre de Reynolds, Re qui caractérise la nature du régime de l'écoulement. Il est important de noter que les débitmètres à pression différentielle sont beaucoup plus adaptés pour mesurer les écoulements turbulents. Leur précision devient moins bonne au régime laminaire.

2.3.1.2 – Description Technique :

Les normes internationales ISO 5167 de 1980, révisées en 1995 et amendées en 1999 et 2001 définissent les spécifications techniques de construction et les conditions d'utilisation de ces débitmètres ainsi que les procédures de leur calcul.

Les principaux types de débitmètres à pression différentielle ou à organes déprimogènes décrits par la norme ISO 5167 sont :

- Les **diaphragmes** ou **plaques à orifice** ;
- Les orifices profilés (**tuyères**, tubes de **Venturi** et les **Venturi-tuyères**)
- **Sonde de Pitot** et Sonde de Pitot à plusieurs points de mesure (**Sonde annubar**)

D'autres types de débitmètres à pression différentielle non normalisés sont disponibles.

2.3.1.3 - Utilisation Pratique des débitmètres à pression différentielle

Les débitmètres à organes déprimogènes sont utilisés pour la mesure du débit 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. Bowles (1999) estime qu'environ 80% du parc de débitmètres installés sont du type à pression différentielle. Le diaphragme est le plus utilisé ; Ce sont des systèmes qui présentent les **avantages** suivants :

- 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 type 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 provoque une perte de charge beaucoup moins importante en raison de leur géométrie profilée.
- Une faible dynamique de mesure.
- Sensibles aux perturbations de l'écoulement (coudes, vannes, élargissements, pulsations etc..) ce qui nécessitent des conditions d'installation pénalisantes.

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. La norme ISO 5167 spécifie, pour chaque type d'élément, une limite inférieure du nombre de Reynolds. La limite supérieure du nombre de Reynolds est théoriquement $(+\infty)$; Mais en pratique pour des considérations techniques de pompage, la valeur de la vitesse est limitée. Le nombre de Reynolds associé est compris généralement entre 10^5 et 10^7 .

2.4 - Conditionneurs d'écoulement :

2.4.1 – Principe d'un conditionneur d'écoulement :

Le conditionneur d'écoulement est un élément de conduite qui permet l'atténuation des perturbations de l'écoulement et la production de la condition d'écoulement établi dans des longueurs de développement relativement courtes. Un conditionneur d'écoulement permet de réduire les turbulences et les perturbations dans l'écoulement imputables aux configurations de la conduite tels que les coudes, les tés, les vannes partiellement ouvertes etc.. L'utilisation d'un conditionneur d'écoulement entre l'élément perturbateur et le débitmètre permet de minimiser les erreurs de mesure dû aux perturbations de l'écoulement causées par l'élément perturbateur.

Un conditionneur consiste en un organe mécanique où l'écoulement perturbé est subdivisé en plusieurs parties en lui faisant passer par des passages annulaires réduits. En plus de sa

capacité à produire la condition de l'écoulement établi dans des distances généralement inférieures à 30 fois le diamètre de la conduite, un conditionneur d'écoulement doit présenter les deux caractéristiques principales suivantes:

- La perte de charge engendrée sur l'écoulement soit minimale;
- L'encombrement qu'il peut provoquer dans l'installation de conduite soit minime.

2.4.2 – Classification des conditionneurs d'écoulement :

Une grande variété de conditionneurs d'écoulement est décrite dans la documentation technique relative aux mesures industrielles de fluides (Normes et littérature technique). Selon leur mécanisme de fonctionnement, les conditionneurs d'écoulements peuvent être divisé en trois grandes catégories :

Catégorie 1 : Dispositif à mixage turbulent :

Dans les conditionneurs à mixage turbulent la perturbation de l'écoulement est principalement atténuée dans la zone immédiatement en aval du conditionneur sous l'effet du mixage des jets turbulents. Dans cette catégorie on a :

- Le conditionneur Sprenkle (ISO 5167)
- Les conditionneurs à faisceaux de tubes (ISO 5167, AGA3, Stuart)
- Les plats perforés (Laws (1990), Spearman, Mitsubishi, CPACL, etc...)

Catégorie 2 : Dispositif à action Vortex

Toute perturbation de l'écoulement est amortie sous l'action du vortex dans les passages cellulaires du conditionneur. Les conditionneurs de cette catégorie sont :

- Conditionneur Etoile (ISO 5167)
- Conditionneur AMCA (ISO 5167)
- Le Vortab

Catégorie 3 : Dispositif hybrides

Ces dispositifs combinent les fonctionnalités des conditionneurs à mixage turbulent et ceux à action vortex. Ils consistent en général de la combinaison d'un plat perforé et d'un autre élément à action vortex (étoile par exemple) ; Les conditionneurs de cette catégorie sont :

- Conditionneur Zanker ou nid d'abeillers (ISO5167)
- Conditionneur Gallagher (AGA 3)

- Le conditionneur Laws (1995)
- Le conditionneur X4X.

Parmi ces dispositifs, il y'a des conditionneurs qui sont normalisés dans le cadre de la norme ISO 5167 et l'AGA-3 ; D'autres sont en phase de tests et d'approbation par les instances de normalisation internationales. Les programmes de recherche du NIST aux Etats Unies et du NEL en Grande Bretagne concernent le développement et les tests de nouveaux modèles de conditionneur d'écoulement. Une schématisation de quelques conditionneurs d'écoulement est présentée dans la figure (2.2). Le tableau (2.1) présente les caractéristiques de quelques conditionneurs d'écoulement d'après la recherche menée par Sattary (1998).

Tableau 2.1 – Caractéristiques des conditionneurs d'écoulement (Sattary (1998))

Conditionneur	Porosité (%)	Perte de charge	Longueur amont (L/D)	Longueur aval (L/D)
Mitsubishi	59	1.5	2	8-9
Laws	50 - 70	0.7 à 2.4	3	11
Spearman (NEL)	47.5	2.9	4	6
Sprenkle	50	15	10	22
AGA-3		5	5	13
Faisceaux de tube (ISO5167)		5	20	22
AMCA		8	6	6
Etoile		2	3	5
Zanker		4 à 5	4	12
Gallagher		2	7	3 à 7
Plat à vannes de Laws	70	0.8	3	2.5
X4X	50		4	A la sortie du débitmètre

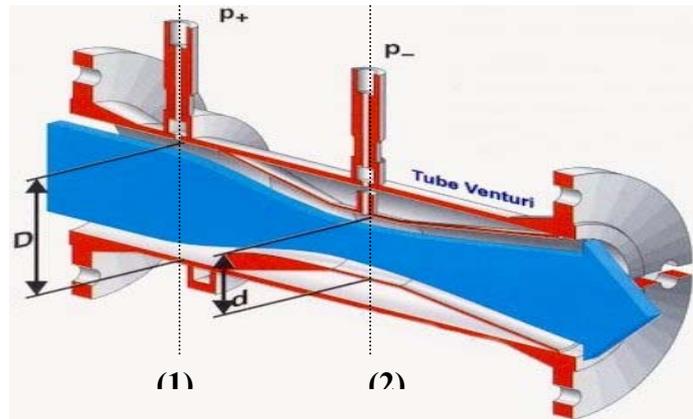
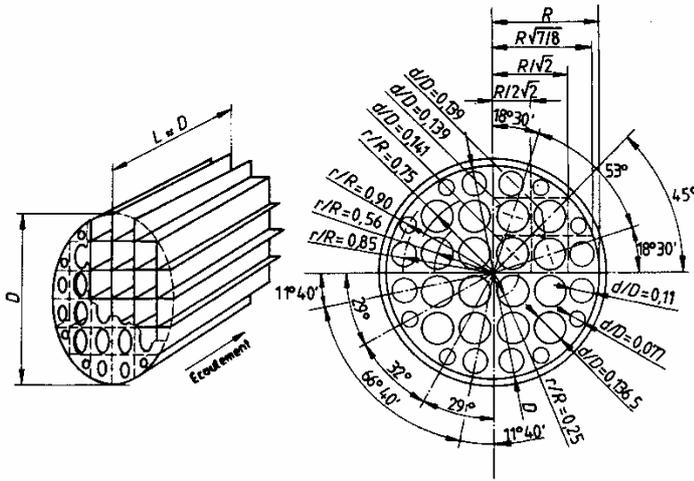
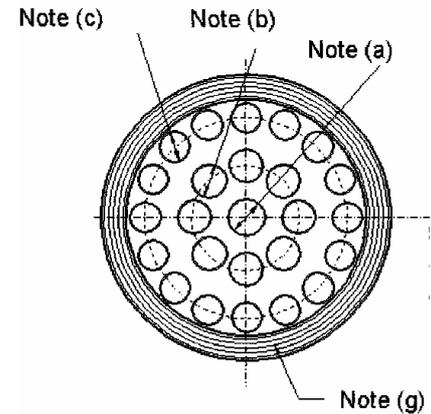


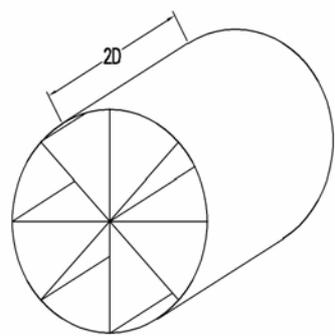
Figure 2.1 – principe d'un Débitmètre à Pression Différentielle



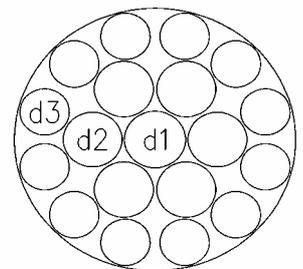
a – Conditionneur Zanker (ISO 5167)



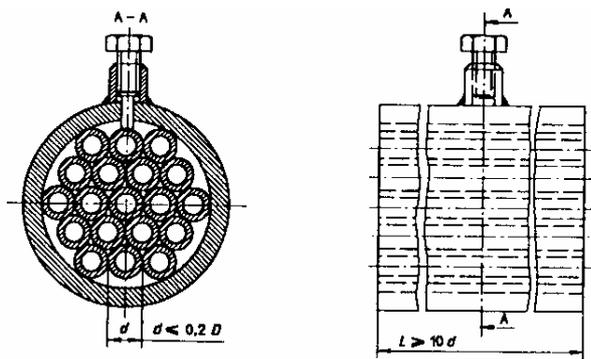
d – Conditionneur Plat perforé CPACL



b – Conditionneur Etoile (ISO 5167)

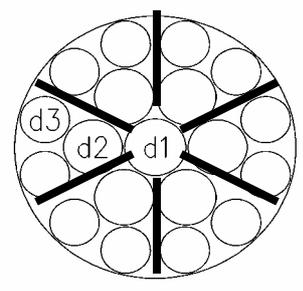


e – Plat perforé Laws



Type C: Tranquilliseur à faisceau de tubes

c – Conditionneur à faisceaux de tubes (ISO 5167)



f – Conditionneur hybride Laws

Figure (2.2) – Schématisation de quelques conditionneurs d'écoulement