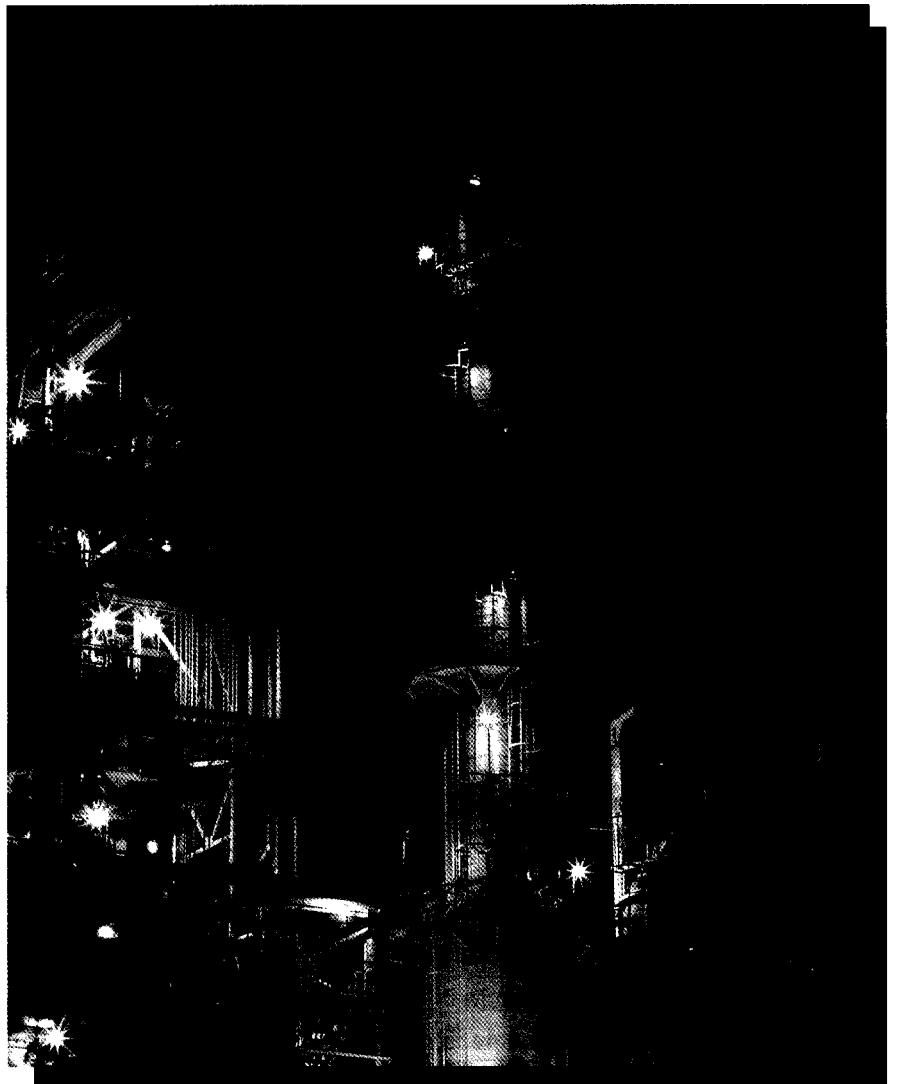


Principes fondamentaux de mesure du débit



INTRODUCTION

La mesure du débit de liquide est un des aspects les plus importants de la régulation de procédé. Il se peut même, en fait, qu'elle constitue la variable du procédé la plus souvent mesurée. Cette brochure décrit la nature du débit et les facteurs influant sur celle-ci. Elle présente les appareils couramment utilisés pour mesurer le débit et étudie l'incertitude et la manière dont on la définit habituellement. Aux fins de consultation rapide, elle comprend également un tableau indiquant les principales caractéristiques des appareils de mesure du débit et un tableau de conversion des différentes unités de mesure utilisées en rapport avec le débit.

Le débit est habituellement mesuré par déduction, en mesurant la vitesse à travers une section connue. Le débit mesuré par cette méthode indirecte est le débit volumique, Q_v , défini dans les termes les plus simples sous la forme :

$$Q_v = S \times V$$

Dans cette équation, S est la surface de section de la conduite et V la vitesse du fluide.

Une indication fiable du débit dépend de la mesure correcte de S et de V . Si, par exemple, des bulles d'air sont présentes dans le fluide, le terme " S " de l'équation relatif à la surface sera artificiellement élevé. De même, si la vitesse est mesurée sous forme de vitesse ponctuelle au centre de la conduite et utilisée comme terme " V " de l'équation relatif à la vitesse, le Q_v calculé sera supérieur à sa valeur réelle, car V doit refléter la vitesse moyenne de l'écoulement lorsqu'il traverse une section transversale de la conduite.

FACTEURS INFLUANT SUR L'ÉCOULEMENT DES FLUIDES DANS LES CONDUITES

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

- Vitesse du fluide
- Frottement du fluide en contact avec la conduite
- Viscosité du fluide
- Masse volumique du fluide

La vitesse du fluide dépend de la charge qui force le fluide à traverser la conduite. Plus la charge est élevée, plus le débit de fluide est rapide (tous les autres facteurs restant constants) et, par conséquent, plus le volume d'écoulement est important. Le diamètre de la conduite influence également sur le débit. Si l'on double le diamètre de la conduite, par exemple, le débit potentiel augmentera selon un coefficient quatre.

Le frottement de la conduite réduit le débit des fluides dans les tuyaux et est donc considéré comme un facteur négatif. Du fait du frottement du fluide en contact avec la conduite, la vitesse de fluide est plus lente près des parois de la conduite qu'au centre de cette dernière. 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.

La viscosité (μ), ou friction moléculaire à l'intérieur d'un fluide, a un effet négatif sur le débit des fluides. La viscosité et le frottement de la conduite réduisent le débit du fluide près des parois de la conduite. La viscosité augmente ou diminue en fonction des variations de température, mais pas toujours comme on pourrait s'y attendre. La viscosité des liquides diminue habituellement à mesure que la température augmente. Dans certains fluides, cependant, la viscosité peut se mettre à augmenter au-dessus de certaines températures. En général, plus la viscosité d'un fluide est élevée et plus le débit est faible (les autres facteurs restant constants). La viscosité se mesure en centipoises⁽¹⁾. Un autre type de viscosité, appelé viscosité cinématique, se mesure en centistokes⁽²⁾. On l'obtient en divisant les centipoises par la masse volumique du fluide.

La masse volumique (ρ) d'un fluide influence sur le débit, car un fluide plus dense exige une charge supérieure pour maintenir le débit désiré. Le fait que les gaz soient compressibles, alors que les liquides ne le sont pas par essence, exige en outre souvent l'utilisation de méthodes différentes pour mesurer des débits de liquides, de gaz ou de liquides contenant des gaz.

Il s'avère que les facteurs d'écoulement les plus importants peuvent être mis en corrélation dans un paramètre caractéristique appelé nombre de Reynolds, figurant le débit à toutes les vitesses, viscosités et diamètres de canalisations. Il définit, en général, le rapport des forces de vitesse entraînant le fluide sur les forces visqueuses qui le retiennent, soit :

$$R_D = \frac{VD\rho}{\mu}$$

(1) 1 cP = 1 mPa.s (millipascal seconde)

(2) 1 cSt = 1 mm².S⁻¹ (1 mm² par seconde)

Lorsque les vitesses sont très faibles et les viscosités élevées, R_D est faible et le fluide s'écoule en couches concentriques, la vitesse la plus élevée se situant au centre de la conduite et les faibles vitesses au niveau des parois de la conduite, où les forces visqueuses le retiennent. Ce type d'écoulement est appelé écoulement laminaire et est représenté par des nombres de Reynolds inférieurs à 2000. La forme parabolique de son profil de vitesse (Figure 1) constitue une caractéristique importante de l'écoulement laminaire. Aux vitesses plus élevées ou faibles viscosités, l'écoulement se fractionne en tourbillons turbulents, la plus grande partie de l'écoulement dans la conduite ayant la même vitesse moyenne. Dans l'écoulement "turbulent", la viscosité du fluide est moins importante, et le profil de vitesse adopte une forme beaucoup plus uniforme. L'écoulement turbulent est représenté par des nombres de Reynolds supérieurs à 4,000. Entre des nombres de Reynolds de 2,000 et 4,000, l'écoulement est dit intermédiaire.

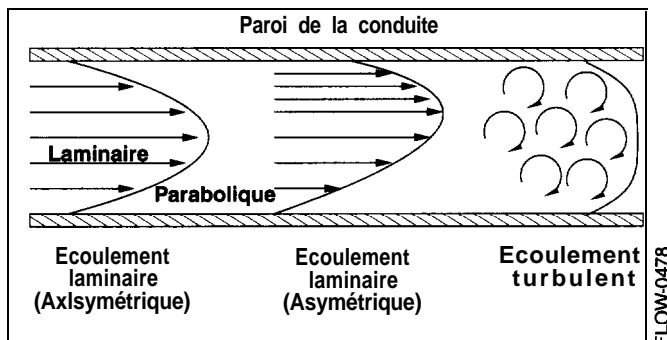


FIGURE 1 .Vitesse

MESURE DU DÉBIT DANS LES CONDUITES

Le type d'appareil utilisé, parmi les nombreux appareils disponibles pour la mesure du débit de fluides, dépend souvent de la nature du fluide et des conditions du procédé dans lesquelles on le mesure. On mesure habituellement le débit de manière indirecte, en mesurant tout d'abord la pression différentielle ou la vitesse du fluide. Cette mesure est ensuite convertie en débit volumique par des moyens électroniques. Les débitmètres peuvent être groupés en quatre types génériques : compteurs volumétriques, débitmètres manométriques, débitmètres tachymétriques et débitmètres massiques.

Compteurs volumétriques

Les compteurs volumétriques mesurent le volume écoulé (Q_v) directement, en emprisonnant de façon répétée un volume élémentaire 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. Les

compteurs volumétriques totalisent souvent le volume directement sur un compteur intégré, mais ils peuvent également délivrer une sortie à impulsions qui peut être affichée sur un compteur à affichage local ou transmis à une salle de commande. Chaque impulsion représentant un volume de fluide distinct, ils conviennent parfaitement au comptage par lots automatique. Les compteurs volumétriques sont parfois moins précis que les autres débitmètres, du fait des fuites par les surfaces d'étanchéité internes. Il existe quatre types de compteurs volumétriques courants : à piston, à roues ovales, à disque oscillant, à rotors à lobes.

Débitmètres manométriques

Les débitmètres manométriques sont les types de débitmètres les plus fréquemment utilisés pour la mesure des débits de fluide. Ils mesurent le débit de fluide indirectement en engendrant et en mesurant une pression différentielle, en opposant un obstacle à l'écoulement du fluide. La mesure de la pression différentielle peut être convertie en débit volumique, à l'aide de coefficients de conversion reconnus, dépendant du type de débitmètre manométrique utilisé et du diamètre de la conduite.

A partir de l'Equation de continuité, et en supposant une masse volumique constante (fluide incompressible), on constate que :

$$Q_v = V_1 S_1 = V_2 S_2$$

Cette équation constitue une des relations les plus importantes de la mécanique des fluides. Elle démontre qu'avec un écoulement régulier et uniforme, une réduction du diamètre de la conduite entraîne une augmentation de la vitesse du fluide. On constate en outre, à partir de l'équation de conservation de l'énergie de Bernoulli, que la charge totale (H) doit rester constante en tout point de l'écoulement, soit •

$$\left[\frac{P}{\rho} \right] + \left[\frac{V^2}{2} \right] = H = \text{Constante}$$

Le premier terme de l'équation est appelé "charge potentielle" ou "énergie potentielle". Le second terme est appelé "charge de vitesse" ou "énergie cinétique". Les énergies potentielle et cinétique conjointes étant constantes, il est évident qu'une augmentation de la vitesse telle que la décrit l'Equation de continuité doit aller de pair avec une réduction de l'énergie potentielle ou de la pression de la canalisation. C'est cette relation entre la vitesse et la pression qui est à la base du fonctionnement de tous les débitmètres de type manométrique.

Les débitmètres manométriques sont en général simples et fiables et leur souplesse d'emploi est supérieure à celle des autres méthodes de mesure du débit. Le débitmètre manométrique comprend

presque toujours deux éléments : l'élément primaire et l'élément secondaire. L'élément primaire est placé dans la canalisation pour limiter l'écoulement et engendrer une pression différentielle. L'élément secondaire mesure la pression différentielle et délivre un affichage ou un signal transmis à un système de commande. Les débitmètres manométriques n'exigent aucun étalonnage en site de l'élément primaire de mesure. L'élément primaire peut être choisi en fonction de sa compatibilité avec le fluide ou l'utilisation spécifique et l'élément secondaire en fonction du type d'affichage ou de transmission des signaux désiré.

Diaphragmes

Un diaphragme concentrique constitue le plus simple et le moins coûteux des débitmètres manométriques (Figure 2). Faisant fonction d'élément primaire, le diaphragme comprime l'écoulement du fluide, ce qui engendre une pression différentielle de part et d'autre du diaphragme. Il en résulte une haute pression en amont et une basse pression en aval, proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement. Un diaphragme engendre habituellement une perte de charge générale supérieure à celle des autres éléments primaires. Ce dispositif a pour avantage pratique de ne pas entraîner une augmentation importante du prix en fonction du diamètre de la conduite.

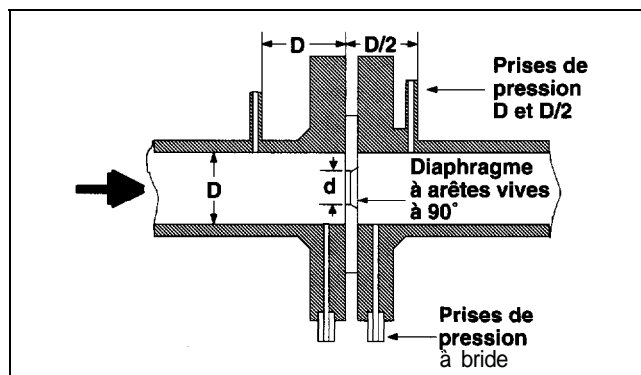


FIGURE 2. Diaphragme mince.

Tubes de Venturi

Les tubes de Venturi engendrent une perte de charge très réduite par rapport aux autres débitmètres manométriques à pression différentielle, mais ils sont également les plus gros et les plus coûteux. Ils fonctionnent en réduisant progressivement le diamètre de la conduite (Figure 3) et en mesurant la perte de charge résultante. Une section évasée du débitmètre rétablit ensuite à peu près la pression d'origine de l'écoulement. Comme avec le diaphragme, les mesures de pression différentielle sont converties en un débit correspondant. Les applications du tube de Venturi se limitent en général à celles exigeant une perte de charge réduite et un relevé de haute incertitude. On les utilise beaucoup sur les conduites de grand

diamètre, tels ceux utilisés dans les usines de traitement des eaux usées, car leur forme à pente progressive permet aux solides de les traverser.

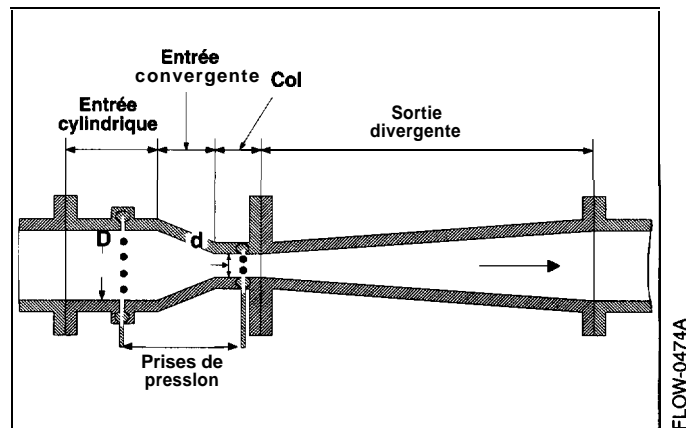


FIGURE 3. Venturi.

Tuyère

Les tuyères peuvent être considérées comme une variante du tube de Venturi. L'orifice de la tuyère constitue un étranglement elliptique de l'écoulement, mais sans section de sortie rétablissant la pression d'origine (Figure 4). Les prises de pression sont situées environ 1/2 diamètre de la conduite en aval et 1 diamètre la conduite en amont. La tuyère constitue un débitmètre à haute vitesse utilisé lorsque les turbulences sont importantes (Nombres de Reynolds supérieurs à 50 000), par exemple dans les écoulements de vapeur à haute température. La perte de charge d'une tuyère se situe entre celle d'un tube de Venturi et celle d'un diaphragme (30 à 95 pour-cent).

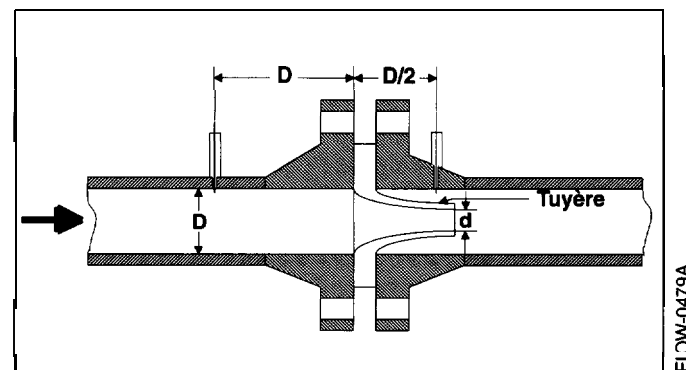


FIGURE 4. Tuyère montée sur la paroi d'une conduite.

Tubes de Pitot

En général, un tube de Pitot d'indication du débit est constitué de deux tubes qui mesurent la pression en des endroits différents à l'intérieur de la conduite. Ces tubes peuvent être montés séparément dans la conduite ou ensemble dans un seul boîtier, constituant un appareil monobloc. L'un des tubes mesure la pression d'arrêt ou pression dynamique (charge de vitesse plus charge potentielle) en un point de l'écoulement. Le second tube mesure uniquement la pression statique (charge potentielle), habituellement sur la paroi de la conduite. La pression différentielle mesurée de part et d'autre du tube de Pitot est proportionnelle au carré de la vitesse. Pour monter un tube de Pitot, il faut déterminer le point de vitesse maximum à travers la conduite. Bien qu'un tube de Pitot puisse être étalonné de manière à mesurer le débit de fluide à partir des profils de vitesse peut engendrer des erreurs importantes. Les tubes de Pitot sont surtout utilisés pour la mesure des gaz, la variation de la vitesse d'écoulement entre la moyenne et le centre n'étant pas aussi importante qu'avec les autres fluides. Les tubes de Pitot connaissent des utilisations limitées sur les marchés industriels, car ils sont facilement bouchés par les corps étrangers présents dans le fluide. Leur incertitude dépend du profil de vitesse, dont la mesure est difficile.

Débitmètres à cible

Un débitmètre à cible comprend un disque ou "cible", centré dans une conduite (Figure 5). La surface de la cible est placée à 90° par rapport à l'écoulement du fluide. La force exercée par le fluide sur la cible permet une mesure directe du débit de fluide. Utilisés avec les fluides chargés ou corrosifs, les débitmètres à cible n'exigent aucun raccordement extérieur, joint ou système de purge. De nombreux paramètres sont cependant nécessaires pour déterminer la taille optimale de la cible et un étalonnage est essentiel au bon fonctionnement.

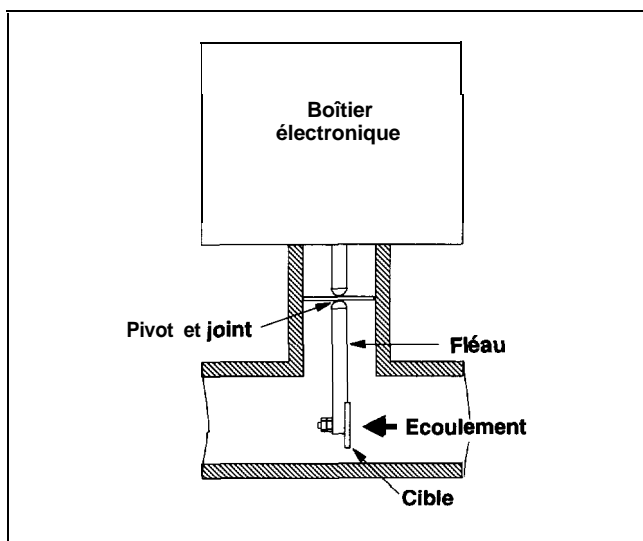


FIGURE 5. Débitmètre à cible.

Débitmètres à prise coudée

Une prise coudée se réalise en introduisant un tube coudé à 45° dans l'écoulement du fluide. Une prise haute pression est ménagée à l'extérieur du coude et une prise basse pression à l'intérieur du coude. Ceci permet d'obtenir une pression différentielle, proportionnelle au débit. La mesure de la pression différentielle dépend de la force centrifuge du fluide traversant le coude. Il est donc déconseillé d'utiliser les prises coudées avec des gaz, dont la masse volumique est faible. Ceci explique également pourquoi un coude à forte courbure engendre une pression différentielle beaucoup plus élevée qu'un coude à faible courbure. La perte de charge d'une prise coudée n'est pas supérieure à celle du coude. Bien que répétable, l'incertitude d'un débitmètre à prise coudée n'est que de ± 5 pourcent.

Débitmètres à section variable

Les débitmètres à section variable (également appelés rotamètres) sont habituellement constitués d'un tube en verre conique, disposé verticalement dans l'écoulement du fluide (Figure 6). Un flotteur de même diamètre que la base du tube en verre s'élève en fonction de l'ampleur du débit. Le diamètre du tube en verre étant plus important en haut qu'en bas, le flotteur reste en suspension au point où la différence de pression entre les surfaces supérieure et inférieure en équilibre le poids. Dans la plupart des utilisations des rotamètres, le débit est affiché directement sur une échelle graduée, sur le verre. Dans certains cas, un système de détection automatique mesure le niveau du flotteur et transmet un signal de débit. Ces "rotamètres transmetteurs" sont souvent réalisés en acier inoxydable ou autres matériaux permettant de les utiliser avec différents fluides et à des pressions plus élevées. Le diamètre des rotamètres peut aller de 6 mm à plus de 15 cm. Ils mesurent une gamme de débits plus importante (10 à 1) qu'un diaphragme, avec une incertitude de ± 2 pourcent et une pression de service maximale de 20 bar, pour les modèles en verre. On utilise souvent des rotamètres pour les niveaux et débits de purge.

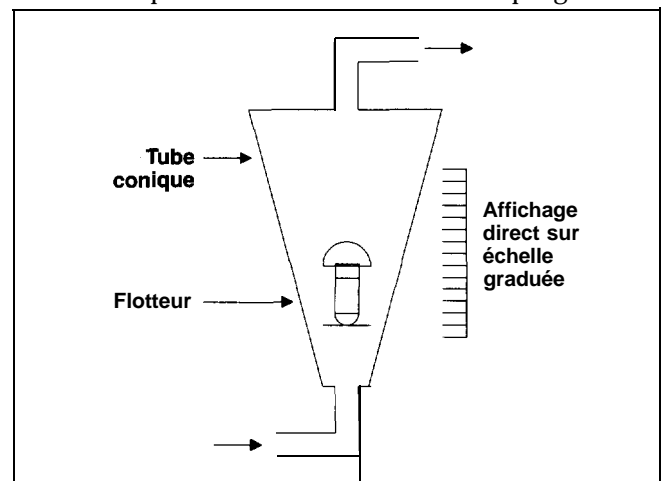


FIGURE 6. Rotamètre.

Débitmètres tachymétriques

Lorsqu'on utilise la vitesse pour mesurer le débit d'un fluide, l'élément primaire délivre un signal proportionnel à la vitesse du fluide. L'équation $Q_v = S \times V$ illustre la linéarité du signal produit par rapport au débit volumique. Les débitmètres tachymétriques sont habituellement moins sensibles au profil de vitesse que les débitmètres manométriques, certains n'utilisent pas d'obstacle dans la conduite et, comme ils délivrent une sortie linéaire en fonction du débit, il n'existe pas de rapport quadratique comme sur les débitmètres à pression différentielle. Ceci supprime les imprécisions potentielles liées à l'extraction de racines carrées et explique l'étendue relative de mesure plus importante des débitmètres tachymétriques, par rapport à la plupart des débitmètres manométriques.

Débitmètres à turbine

Un débitmètre à turbine utilise un rotor à plusieurs ailettes, reposant sur des paliers, dans une section d'une conduite perpendiculaire à l'écoulement (Figure 7). Le fluide entraîne le rotor à une vitesse proportionnelle à celle du fluide et, par conséquent, au débit volumique total. Un bobinage magnétique extérieur au débitmètre engendre une tension alternative à chaque fois qu'une des ailettes coupe les lignes de flux magnétique du bobinage. Chaque impulsion représente donc un volume de liquide distinct. Le rotor étant habituellement réalisé en acier inoxydable, il est compatible avec de nombreux fluides. Les paliers nécessaires au soutien du rotor, qui doivent lui permettre de tourner librement à haute vitesse, exigent cependant une grande propreté du fluide du procédé. Les débitmètres à turbine sont habituellement disponibles en des diamètres allant de moins de 12 mm à 30 cm. Ils réagissent vite et sont précis. Leur principe les réserve aux fluides peu visqueux.

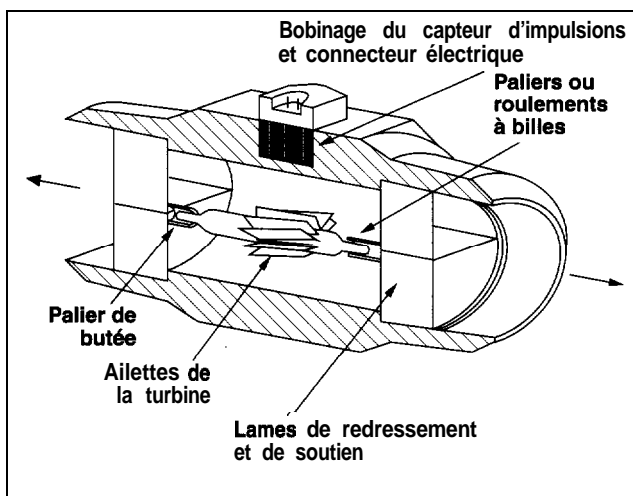


FIGURE 7. Turbine à écoulement axial.

Débitmètres électromagnétiques

Le principe de fonctionnement du débitmètre électromagnétique repose sur la loi d'induction électromagnétique de Faraday, selon laquelle une tension sera induite dans un conducteur traversant un champ magnétique.

$$\text{Loi de Faraday : } E = kBDV$$

L'ampleur de la tension induite E est directement proportionnelle à la vitesse du conducteur V , à la largeur du conducteur D et à l'intensité du champ magnétique B . La Figure 8 illustre le rapport entre les composants physiques du débitmètre magnétique et la loi de Faraday. Les bobines d'induction disposées de part et d'autre de la conduite engendrent un champ magnétique. Lorsque le liquide conducteur du procédé traverse le champ à une vitesse moyenne V , des électrodes détectent la tension induite. La largeur du conducteur est constituée par la distance entre les électrodes. Un revêtement isolant évite tout court-circuit du signal à la paroi du tube. La seule variable de cette application de la loi de Faraday est la vitesse du liquide conducteur V , car l'intensité de champ est maintenue constante et l'écartement des électrodes est fixe. La tension de sortie E est donc directement proportionnelle à la vitesse du liquide, permettant au débitmètre magnétique de délivrer une sortie linéaire.

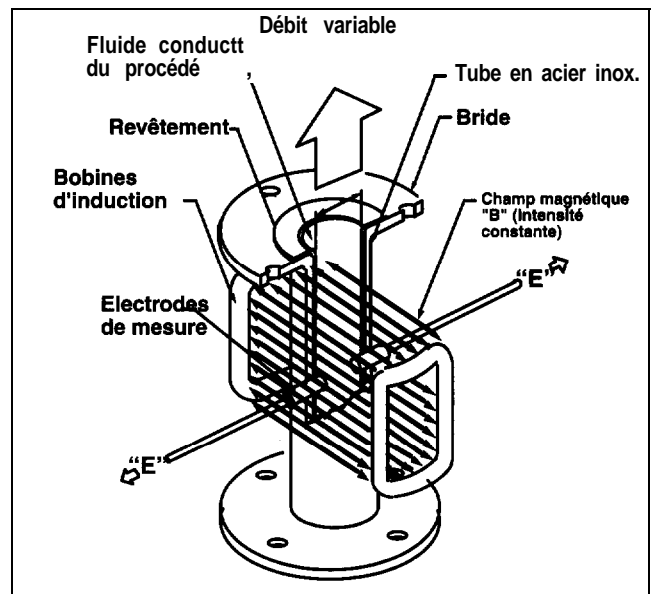


FIGURE 8. Vue en coupe d'un débitmètre magnétique.

Débitmètres à effet vortex

Le principe de fonctionnement d'un débitmètre à effet vortex est basé sur le phénomène de génération de tourbillons, appelé effet de Karman. Lorsqu'un fluide rencontre un corps non profilé, il se divise et engendre de petits tourbillons ou vortex alternés, de part et d'autre et en aval du corps non profilé (Figure 9). Ces tourbillons engendrent des zones de pression variable, détectées par un capteur. La fréquence de génération des tourbillons est directement proportionnelle à la vitesse du fluide.

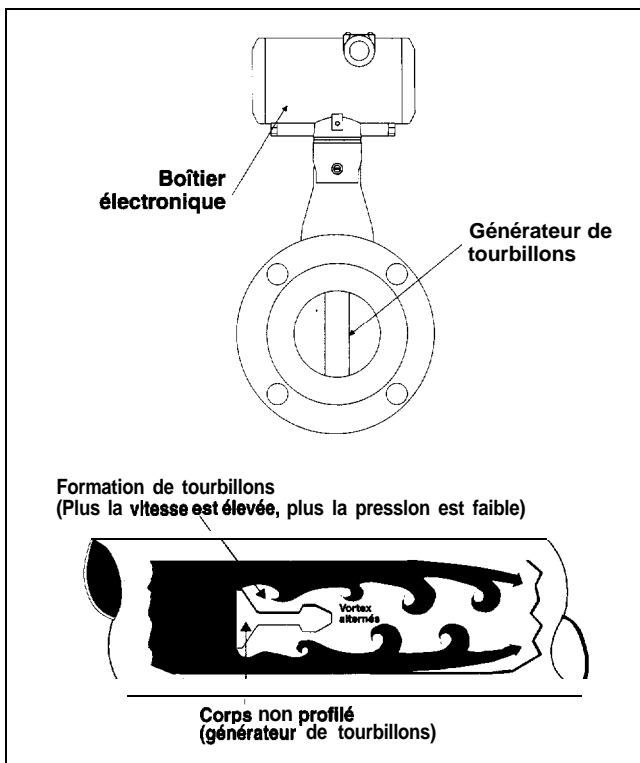


FIGURE 9. Génération de tourbillons.

La sortie d'un débitmètre à effet vortex dépend du facteur K. Le facteur K est lié à la fréquence de génération des tourbillons par rapport à la vitesse du fluide. La formule de vitesse du fluide est la suivante :

$$\text{Vitesse du fluide} = \frac{\text{Fréquence des tourbillons}}{\text{Facteur K}}$$

Le facteur K varie en fonction du nombre de Reynolds, mais est pratiquement constant sur une vaste plage de débit (Figure 10). Les débitmètres à effet vortex mesurent des débits extrêmement précis si on les utilise sur cette plage linéaire.

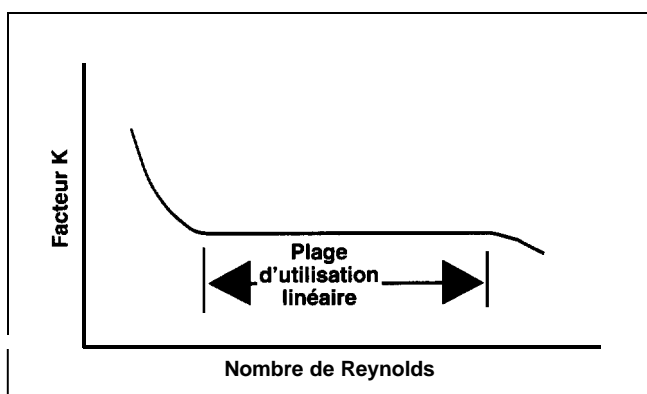


FIGURE 10. Rapport entre le facteur K et le nombre de Reynolds.

Débitmètres à ultrasons

Les débitmètres à ultrasons utilisent les ondes acoustiques pour déterminer le débit des fluides. Les impulsions délivrées par un transducteur piézo-électrique traversent le fluide en mouvement à la vitesse du son et fournissent une indication de la vitesse du fluide. Deux méthodes différentes sont actuellement utilisées pour assurer cette mesure de la vitesse.

Les premiers débitmètres à ultrasons utilisaient la méthode du temps de propagation, où deux transducteurs opposés sont montés de manière à ce que les ondes acoustiques allant de l'un à l'autre soient à 45 degrés par rapport au sens d'écoulement dans une conduite. La vitesse du son allant du transducteur amont au transducteur aval constitue la vitesse intrinsèque du son, plus un apport dû à la vitesse du fluide. La valeur d'une mesure simultanée dans le sens opposé (déterminée électroniquement) représente la vitesse du fluide, proportionnelle au débit de façon linéaire. La méthode du temps de propagation fonctionne correctement dans la plupart des fluides, mais il est primordial que ces derniers ne véhiculent pas de gaz ou de solides, pour éviter la dispersion des ondes acoustiques entre les deux transducteurs.

Un autre type de débitmètre à ultrasons utilise l'effet Doppler. Ce type de débitmètre à ultrasons utilise lui-aussi deux éléments transducteurs, mais montés tous deux dans le même boîtier d'un des côtés de la conduite. Une onde ultrasonore de fréquence constante est émise dans le fluide par un des transducteurs. Les solides ou bulles présents dans le fluide réfléchissent le son, le renvoyant à l'élément récepteur. Selon le principe du Doppler, tout mouvement relatif de l'émetteur et du récepteur engendre un décalage de la longueur d'onde ou fréquence apparente. Dans le débitmètre à effet Doppler, le mouvement relatif des corps réfléchissants en suspension dans le fluide a tendance à comprimer le son en une longueur d'onde plus courte (haute fréquence). Cette nouvelle fréquence mesurée au niveau de l'élément récepteur est comparée électroniquement à la fréquence émise, de manière à obtenir une différence de fréquence directement proportionnelle à la vitesse d'écoulement dans la conduite. Au contraire de la méthode du temps de propagation, les débitmètres à ultrasons à effet Doppler exigent la présence de gaz ou de solides en suspension dans l'écoulement pour fonctionner correctement.

Bien que les débitmètres à ultrasons présentent plusieurs avantages, y compris l'absence d'obstacle dans la conduite et une influence négligeable du diamètre de la conduite sur le prix, leur fonctionnement dépend pour beaucoup des conditions d'écoulement. On peut obtenir des débitmètres à ultrasons une incertitude passable en les utilisant correctement avec des fluides appropriés.

8800-0317E, 0002A04A

8800-0073A

Débitmètres de masse

Les véritables débitmètres de masse mesurent le débit massique directement, par opposition au débit volumétrique. Bon nombre de débitmètres prétendent "massiques" déduisent cependant le débit massique à l'aide de l'équation :

$$Q_M = Q_V \times \rho$$

Dans cette équation, Q_M est le débit massique, Q_V le débit volumique et ρ la masse volumique du fluide. Ces débitmètres de masse combinent essentiellement deux appareils, l'un pour mesurer la vitesse du fluide et l'autre pour mesurer la masse volumique. Ces mesures sont habituellement combinées dans un microprocesseur, ainsi que des paramètres supplémentaires, de manière à obtenir une sortie indiquant le débit massique. Les débitmètres ci-dessous mesurent par contre le débit massique directement, sans calcul intermédiaire à partir du volume et de la masse volumique.

Débitmètres thermiques

Les débitmètres thermiques ne sont utilisés habituellement que sur des écoulements gazeux ; en fait, sur des écoulements gazeux où la transmission de chaleur vers l'écoulement et à partir de celui-ci constitue un élément habituel du procédé de mesure. La mesure de cette transmission de chaleur fournit des données permettant de calculer un débit massique. Comme sur les débitmètres massiques, le fonctionnement des débitmètres thermiques est indépendant de la masse volumique, de la pression et de la viscosité. Il dépend de la capacité calorifique à pression constante (C_p) du fluide mesuré.

Débitmètres à effet Coriolis

Le débitmètre de Coriolis utilise comme détecteur un tube en U sans obstacle et utilise la seconde loi de mouvement de Newton pour déterminer le débit. Le tube de mesure vibre à sa fréquence naturelle à l'intérieur du boîtier du capteur (Figure 11). Le tube de mesure est actionné par un bobinage électromagnétique situé au centre de la courbure du tube et vibre comme un diapason.

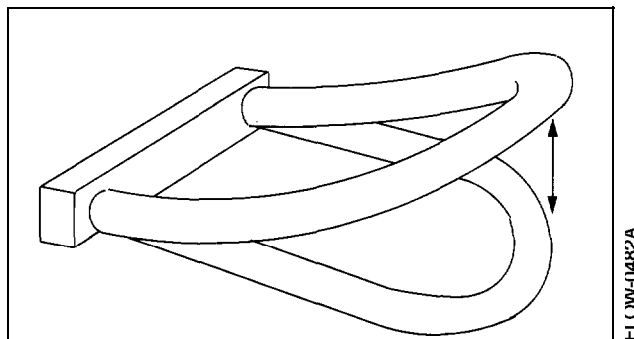


FIGURE 11. Détecteur vibrant de Coriolis.

Le fluide s'écoule dans le tube de mesure et est contraint de suivre le mouvement vertical du tube vibrant. Lorsque le tube monte pendant une moitié de sa période vibratoire (Figure 12), le fluide traversant le détecteur résiste à son entraînement vers le haut en repoussant le tube vers le bas.

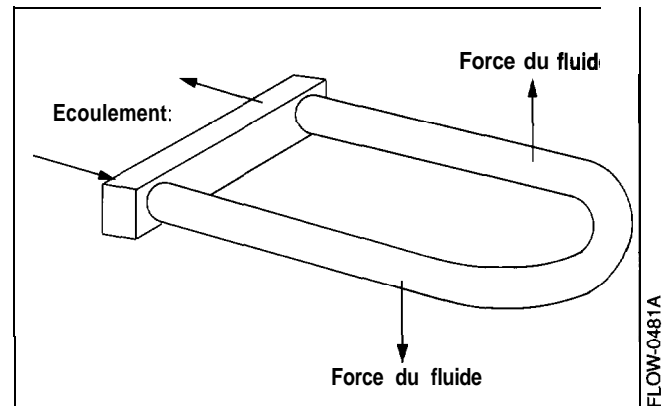


FIGURE 12. Forces du fluide dans un tube de mesure de Coriolis.

A sa sortie du détecteur, le fluide a un mouvement ascendant, induit par le mouvement du tube. Lorsqu'il franchit le coude du tube, le fluide résiste aux modifications de son mouvement vertical en repoussant le tube vers le haut (Figure 12). La différence de forces entraîne une torsion du tube de mesure (Figure 13). Lorsque le tube descend pendant la seconde moitié de sa période vibratoire, il se tord dans le sens opposé. Cette caractéristique de torsion est appelée effet Coriolis.

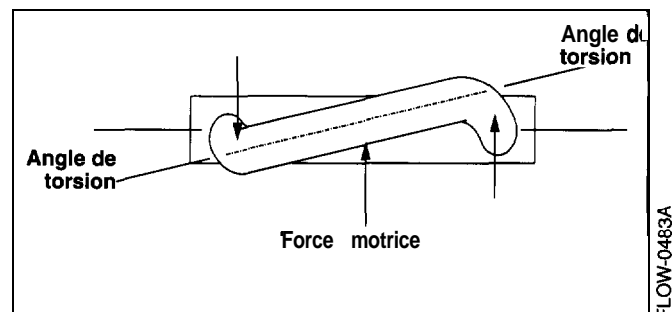


FIGURE 13. Effet Coriolis

Du fait de la seconde loi de mouvement de Newton, l'amplitude de la torsion du tube de mesure est directement proportionnelle au débit massique du fluide traversant le tube. Les détecteurs de vitesse électromagnétiques situés de part et d'autre du tube de mesure mesurent la vitesse du tube vibrant. Le débit massique se détermine en mesurant la différence de temps entre les signaux des détecteurs de vitesse. Dans des conditions d'écoulement nul, il n'y a aucune torsion du tube, d'où une différence de temps nulle entre les deux signaux de vitesse. En cas d'écoulement, il se produit une torsion entraînant une différence de temps entre les deux signaux de vitesse. Cette différence de temps est directement proportionnelle au débit massique.

INCERTITUDE DE MESURE DU DÉBIT DES FLUIDES

Les systèmes de mesure du débit comprennent un certain nombre de composants, ayant chacun leur incertitude nominale. Pour comprendre l'incertitude d'un système de mesure du débit, il importe de prendre en compte l'incertitude nominale de ses différents composants et de comprendre comment ces différentes incertitudes nominales se combinent en une définition de l'incertitude correspondant à l'ensemble du système. Cette définition de l'incertitude devra s'accompagner de la plage de débits à laquelle elle s'applique. La définition de l'incertitude pourra s'énoncer, par exemple, de la manière suivante : "Le système a une incertitude de mesure de **pourcent** du débit sur une plage de **10 à 90 pourcent** du débit maximum". On trouvera ci-après le détail des types de définition de l'incertitude relatifs aux systèmes de mesure du débit. On s'attend en général à ce qu'une **spécification** de l'incertitude inclut les effets de la linéarité, de l'hystérésis et de la répétabilité.

Pourcentage de débit

L'incertitude en pourcentage du débit indique que, sur une plage donnée, l'incertitude du débit en gallons en plus ou en moins par minute (gpm) diminue à mesure que le débit se réduit. Par exemple, un débit maximum de 100 m³/h à 3/h au débit maximum, une incertitude de 3/h à la moitié du débit (49 à 51 m³/h) et une incertitude de 3/h à un débit de 20 m³/h (19,6 à 20,4 m³/h). On utilise habituellement une définition de l'incertitude en pourcentage du débit pour les débitmètres qui déterminent le débit en mesurant la vitesse du fluide. Les débitmètres électromagnétiques, les débitmètres à turbine et les débitmètres à effet vortex constituent des exemples de débitmètres utilisant une incertitude exprimée en pourcentage du débit.

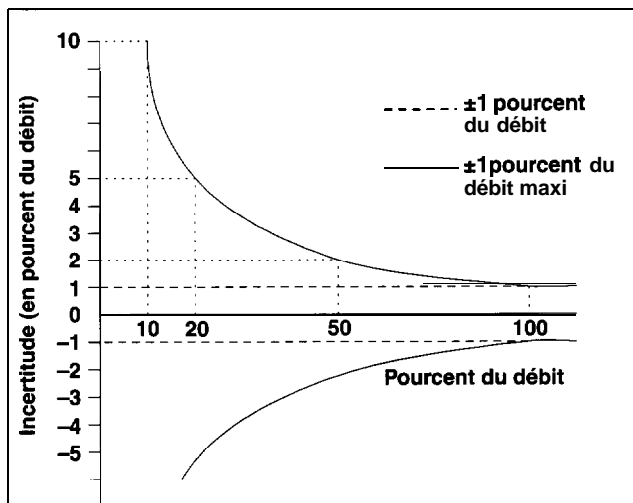


FIGURE 14. Comparaison de l'incertitude.

Pourcentage de l'échelle maximum

Lorsque l'on indique l'incertitude du débit en pourcentage de l'échelle maximum, l'incertitude reste constante sur la plage spécifiée (Figure 14). Dans l'exemple à 100 m³/h ci-dessus, mais avec une incertitude de l'incertitude à plein débit est de 98 à 102 m³/h. A la moitié du débit, elle est de 48 à 52 m³/h, et à 20 m³/h, l'incertitude peut varier de 18 à 22 m³/h. L'ampleur de l'incertitude reste constante sur la plage de débit. L'incertitude représente donc un pourcentage plus important du débit réel aux faibles débits qu'aux débits élevés. Le pourcentage de l'échelle maximum permet d'indiquer l'incertitude des systèmes de mesure du débit manométriques.

Répétabilité

Dans de nombreuses applications aux écoulements industriels, la répétabilité du débitmètre est plus importante que son incertitude. Dans une boucle de régulation du débit, par exemple, si le débitmètre assure un relevé stable et répété, l'incertitude réelle de la mesure n'est pas habituellement aussi significative. La répétabilité ne signifie pas qu'une mesure de débit est précise ou correcte, mais qu'elle est identique à chaque fois.

Incertitude du système

Pour mieux déterminer l'incertitude de l'ensemble du système de mesure du débit, il convient d'évaluer tous les composants à partir du même type de définition de l'incertitude (pourcentage du débit ou pourcentage du débit maximum). Si l'incertitude du système varie à des débits différents, on devra calculer l'incertitude de l'ensemble du système à différents débits. La méthode habituelle d'obtention d'une définition utilisable de l'incertitude du système consiste à calculer la racine carrée de la somme des carrés des incertitudes nominales des différents composants, soit :

$$\pm \sqrt{(\text{Incertainde de A})^2 + (\text{Incertainde de B})^2 \dots (\text{Incertainde de n})^2}$$

Cette équation tient compte en partie du fait que les erreurs ne seront probablement pas toutes positives ou négatives en même temps et que, donc, l'incertitude nominale de l'ensemble ne reflétera pas la "pire éventualité".

CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITMÈTRES

DÉBITMÈTRES	Liquides propres	Liquides chargés	Liquides visqueux	Boues	Gaz ou vapeur	Vapeur	TEMP. MAXI (C)	PRESSION MAXI* (PSI)	PÉRTE DE CHARGE	DIAMÈTRE DE TUYAU NECESSAIRE EN AMONT	ÉTENDUE RELATIVE DE MESURE	DIAMÈTRES DISPONIBLES (POUCES)	ÉTALONNAGE PAR LE CLIENT	INCERTITUDE CARACTÉRISTIQUE
•Débitmètres volumétriques	A	C	A	C	A	C	300	1500	Haute	Aucun	15:1	1-16	Nécessaire	0.25-0.5% R
•Débitmètres manométriques	A	B	B	B	A	B	>300	1500	Moyenne	10-30D	4:1	All	Transmetteur uniquement	2-4% URV
A diaphragme concentrique	A	C	C	C	A	B	Per Transmitter	1500	Haute	10-30D	4:1	≤1.5	Transmetteur uniquement	2-5% URV
A Venturi	A	B	B	B	A	A	>300	1500	Basse	5-30D	4:1	3-72	Transmetteur uniquement	2-4% URV
A tuyère	A	B	B	C	A	A	>300	1500	Moyenne	10-30D	4:1	3-48	Transmetteur uniquement	2-4% URV
Coudés	A	B	C	c	B	B	>300	1500	Basse	30D	3:1	All	Transmetteur uniquement	5-10% URV
A tubes de Pitot	A	C	C	c	A	A	>300	1500	Basse	20-30D	3:1	All	Transmetteur uniquement	3-5% URV
A cible	A	B	A	B	B	B	400	10,000	Moyenne	10-30D	4:1	≤8	Aucun	2-4% URV
Rotamètre	A	B	B	C	A	B	200	300	Moyenne	Aucun	10:1	≤3	Aucun	Varie selon type
Verre	A	B	B	C	A	B	500	1000	Moyenne	Aucun	10:1	≤3	Aucun	Varie selon type
Métal	A	B	B	C	A	B	500	1000	Moyenne	Aucun	10:1	≤3	Aucun	Varie selon type
•Débitmètres tachymétriques	A	B	B	C	A	C	400	3000	Haute	5-10D	10:1	3/16-24	Aucun	0.25-1% R
A turbine	A	B	B	C	A	C	400	3000	Haute	5-10D	10:1	3/16-24	Aucun	0.25-1% R
Electromagnétiques	A	A	A	A	C	C	180	1500	Aucune	5D	30:1	1/10-104	Aucun	0.25-1% R
A effet vortex	A	B	B	C	A	A	>400	1500	Moyenne	10-40D	40:1	1/2-12	Aucun	1% R
A ultrasons	A	C	B	C	C	C	250	Pipe	Aucune	5-30D	10:1	≥1/2	Nécessaire	1% R
A temps de propagation	A	C	B	C	C	C	150	Pipe	Aucune	5-30D	10:1	≥1/2	Nécessaire	3% R
A effet Doppler	C	A	B	C	C	C	150	Pipe	Aucune	5-30D	10:1	≥1/2	Nécessaire	3% R
•Débitmètres de masse	A	B	C	C	A	A	100	Pipe	Basse	Aucun	10:1	All	Aucun	2% URV
Thermiques	A	B	C	C	A	A	100	Pipe	Basse	Aucun	10:1	All	Aucun	2% URV
De Coriolis	A	B	A	B	B	C	300	1500	Basse	Aucun	40:1	≤6	Aucun	<0,25% R

REMARQUES :

A = Destiné à ce type d'utilisation
 B = Utilisable éventuellement - consulter le fabricant
 C = Non utilisable

*La pression maximale suppose des brides de capacité nominale appropriée
 ES. = Pleine échelle
 R = Débit

FACTEURS DE CONVERSION

DÉBIT VOLUMÉTRIQUE

Pieds cubes/sec.	Pieds cubes/min.	Litres/min.	Mètres cubes/min.	Mètres cubes/heure	gal/min.
1	60	1699	1,699	101,95	448,83
0,01667	1	28,32	0,02832	1,699	7,461
5,655 3 10 ⁻⁴	0,03531		0,001	0,06	0,2642
0,5885	35,31	1000	1	60	264,2
0,00981	0,5885	16,667	0,01667	1	4,403
0,002226	0,1337	3,766	0,003766	0,2271	1

DÉBIT MASSIQUE

Livres/sec.	Livres/min.	Livres/h.	g/sec.	g/min.	Kg/h.
1	60	3600	435,6	27220	1633
0,01667	1	60	7,560	453,6	27,22
0,0002778	0,01667	1	0,1260	7,560	0,4536
0,002205	0,1323	7,936	1	60	3,600
3,675 3 10 ⁻⁵	0,002205	0,1323	0,01667	1	0,600
6,125 3 10 ⁻⁴	0,03675	2,205	0,2776	16,67	1

VOLUME

Gallons (U.S.)	Pieds cubes	Pouces cubes	Barrels (pétrole)	Centimètres cubes	Litres	Gallons (GB)
1	0,1337	231	0,02381	3785	3,785	0,8327
7,481	1	1726	0,1761	28320	26,32	6,229
0,004329	0,0005787	1	0,0001031	16,39	0,01639	0,003605
42	5,615	9702	1	159000	15,694	34,97
0,000264	0,0000353	0,06102	6,29 3 10 ⁻⁶	1	0,001	0,000220
1,201	0,1606	277,4	0,02660	454,6	4,546	
0,264	0,0353	61,03	0,0629	1000	1	0,220

VITESSE

Mètres/sec.	Mètres/min.	cm/sec.	Mètres/sec.	Mètres/min.
1	60	30,48	0,3048	18,29
0,01667	1	0,5080	0,005080	0,3048
0,03281	1,9685	1	0,01	0,600
3,261	196,85	100	1	60
0,0547	3,281	1,667	0,01667	1

INFORMATIONS À FOURNIR À LA COMMANDE POUR LES MESURES DE DÉBIT

Repère	
Fluide	Gaz <input type="checkbox"/> Gaz naturel (1) <input type="checkbox"/> Liquide <input type="checkbox"/> Vapeur saturée <input type="checkbox"/> Vapeur surchauffée <input type="checkbox"/>
Nom du fluide	
Composition du fluide (2)	
Masse volumique (3)	Unité : BP= et T=
Densité (sans unité)	
Masse molaire	
Viscosité	Unité :
Facteur de compressibilité (gaz uniquement)	z = (par défaut Z = 1)
Pression de service	Absolue <input type="checkbox"/> Relative <input type="checkbox"/> min : nom : max : Unité :
Température de service	min : nom : max : Unité :
Valeur de débit	min : nom : max : Unité :
Diamètre Nominal de la tuyauterie	
Diamètre intérieur exact de la tuyauterie	Unité :
Diamètre extérieur exact de la tuyauterie	Unité :
Épaisseur	Unité :
Orientation de la tuyauterie	Horizontal <input type="checkbox"/> Verticale <input type="checkbox"/>

(1) Si le fluide mesure est du gaz naturel, il convient de compléter l'une des deux cases suivantes :

- case "Composition du fluide", indiquer la composition moyenne du gaz naturel (% en mole CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀ i-n, N₂...)
- case "Masse volumique" ou "densité" ou "masse molaire".

(2) Cette case est à renseigner si le fluide mesure est un mélange de plusieurs fluides (mélange de gaz, mélange de liquideq ou mesure sur gaz naturel).

(3) Si la masse volumique est exprimée aux conditions de service, merci d'indiquer les valeurs de pression et de température correspondantes.

