

Chapitre 3

REVUE DE LA BIBLIOGRAPHIE

Chapitre 3 - Revue de la Bibliographie

3.1 - Introduction

La mesure du débit de fluides industriels tels que le pétrole, le gaz naturel et l'eau est une opération d'importance stratégique. Ceci a suscité les pays développés à se pencher sérieusement sur l'étude des aspects relatifs à la précision de mesure du débit de ces fluides. De vastes programmes de recherche menés dans des laboratoires de renommée internationale, tels que le 'National Institute of Standards and Technology (NIST)' et le 'Gas Research Institute (GRI)' aux états unis, le 'National Engineering Laboratory NEL' en grande Bretagne et le 'Centre d'Etude et de recherche de Toulouse CERT-ONERA' en France, sont lancés pour étudier tous les aspects métrologiques des différents types de débitmètres industriels. Ces programmes de recherche sont financés essentiellement par les grandes multinationales pétrolières et les fournisseurs d'équipements débitmétriques les plus reconnus, tels que Elf, Texaco, British Petroleum, Gaz de France, Daniel etc... Un programme de recherche en débitmétrie industrielle qui mérite une mention particulière est celui dit 'Flow Programme' du 'Département of Trade and Industry, DTI' ou Ministère du Commerce et de l'industrie, en Grande Bretagne. Toutes les informations relatives à ce programme peuvent être obtenue à partir du site internet (www.flowprogramme.co.uk). Des informations intéressantes sur la métrologie des fluides et la débitmétrie industrielle sont exposées dans le cadre du Programme Européen de Métrologie, section débitmétrie. Le site internet de ce programme est (www.euromet.org).

3.2 – Sources d'erreur dans la mesure des débits

D'après Bowles (1999), les principales sources d'erreur des débitmètres peuvent être classées comme suit :

- Leurs conditions d'installation dans la conduite;
- Les conditions géométriques du débitmètre et l'état de surface interne de la conduite;
- Les débits pulsés ;
- Les variations de pression et de températures dans l'écoulement;
- Les variations des propriétés physiques et chimiques du fluide à mesurer.

Tous ces aspects ont été largement couverts par les études dans la littérature technique pour les différents types de débitmètres. Dans ce chapitre, on se contente de présenter uniquement les études portant sur les conditions d'installations des débitmètres.

3.3 - Revue sur les études portant sur les effets de conditions d'écoulement sur les performances des débitmètres :

La majorité des débitmètres industriels sont sensibles aux conditions d'installation ; Les principes des débitmètres sont basés sur leur utilisation dans la condition d'écoulement établi où leurs coefficients caractéristiques sont déterminés. La notion d'écoulement établi, signifie un état du développement de l'écoulement à partir duquel aucun changement spatial du profil de la vitesse ne se fait dans la direction axiale. Les études de recherche récente montrent que ce type d'écoulement qu'on pensait obtenir après une longueur de développement rectiligne de l'ordre de 40 à 50 fois le diamètre (Laufer (1954)), ne peut effectivement être atteint qu'après 80 à 100 diamètres de développement, dans les situations industrielles (Lawn (1971), Lim (1980), Aichouni (1992) et Messoul (2000)).

Pour une meilleure précision de mesure de débit, le débitmètre doit être placé dans la conduite à un emplacement où l'écoulement est parfaitement établi. Dans la plupart des situations industrielles, des distances rectilignes de 80 à 100 fois le diamètre ne peuvent pas être assurées vu la présence d'éléments nécessaires au contrôle de l'écoulement (vannes, coudes, clapets etc..) dans les conduites. Donc en pratique, le débitmètre fonctionne dans des conditions non standards qui diffèrent des conditions de son étalonnage. Il est évident que des erreurs de mesure du débit seront enregistrées. Les études réalisées dans les grands laboratoires de recherche (NIST, NEL, CERT etc..) ont investis le développement des écoulements à travers les débitmètres industriels installés dans les conduites circulaires et l'effet de conditions non standards sur leur précision de mesure.

Irving (1979) a examiné l'effet des conditions perturbées de l'écoulement sur la précision de mesure d'un débitmètre à plaque à orifice. Il a effectué une étude expérimentale sur le développement de l'écoulement à travers le diaphragme. Ses résultats montrent que les longueurs de développement préconisées par les normes internationales sont insuffisantes pour garantir la précision de mesure requise par les normes.

Shen (1988) analysa l'effet de l'écoulement giratoire (swirl) sur le débitmètre à diaphragme. Ses résultats montrent que pour le rapport de diamètres $\beta=0.70$ avec un sévère tourbillonnement, le coefficient de débit présentait des erreurs de ± 10 à ± 25 % comparé aux normes.

Heritage (1990) a montré expérimentalement que certaines perturbations de l'écoulement, notamment les coudes perpendiculaires placés dans des plans différents, peuvent causer des erreurs sur le coefficient de débit pouvant aller de $\pm 5\%$ pour les diaphragmes et les turbines jusqu'à $\pm 11\%$ pour les débitmètres à ultrasons.

Mattingly et Yeh (1991) et Paik(1994) ont investi expérimentalement l'effet de perturbations des vitesses causées par des éléments de conduites tels que les coudes simples, les coudes doubles et des élargissements, sur les performances de plusieurs débitmètres. Ils ont montré que les débitmètres à ultrasons enregistrent des erreurs de l'ordre de ± 5 % si le profil de la vitesse en amont du débitmètre est uniforme. Un coude simple, placé en amont du débitmètre peut créer des erreurs de l'ordre de ± 15 %.

Mous (1998) et Aichouni et al. (1996-2001) ont étudié expérimentalement et numériquement l'effet de condition d'écoulements perturbés (écoulement uniforme, écoulement en jets, écoulement en sillage), sur la précision de mesure d'un débitmètre Venturi. Les résultats montrent que les erreurs sur le coefficient de débit de l'ordre de ± 7 % peuvent être enregistrées.

Les études expérimentales présentées par Morrow (1995, 1997), réalisées au Gas Research Institute (GRI, USA), montrent que les coudes simples, les coudes doubles, les élargissement brusques et les tès engendrent des perturbations sévères dans l'écoulement en conduite. Ces perturbations, placées en amont de diaphragme, causent des erreurs importantes qui dépassent largement les limites d'erreurs tolérées par les normes internationales (de l'ordre de ± 0.5 à $\pm 2\%$).

Dans une étude expérimentale Zimmerman (1999) examine le développement du profil de vitesse après deux perturbations différentes : un coude simple et un coude double. Des débitmètres à diaphragmes de rapport β allant de 0.30 à 0.80 ont été étudiés. Des corrélations entre le rapport de diamètres β et la variation du coefficient de débit du

débitmètre ont été déduites. Les principales conclusions montrent que les longueurs de développement préconisées par les normes ISO 5167 doivent être revue dans le cas où des coudes simples ou doubles sont placées en amont du débitmètre.

Les études numériques de Morrison et al. (1992), Barry et al. (1992), Hilgenstock et Ernest (1996), Erdal et Andersson (1999) et Barton (1999) ont été consacrées à l'étude des effets d'installations sur les diaphragmes. Les simulations numériques de l'écoulement à travers le débitmètres sujets à des perturbations sévères ont été réalisées en utilisant l'approche C.F.D. Les simulations numériques qui étaient en bonne concordance avec les observations expérimentales montrent que l'effet des perturbations sur le développement du champs moyen et turbulent de l'écoulement dans le débitmètre est important.

La synthèse de la littérature technique portant sur les effets d'installations des débitmètres industriels a été présentée par Feener (1999) et Laribi et al. (2001, 2003). Ces études montrent que les écarts (ou erreurs) enregistrées par différents débitmètres sujets à des conditions non-standards peuvent dépasser largement les limites tolérées par les normes internationales et que les longueurs de développement après les éléments de conduites doivent être revue à la hausse. Feener (1999) reporte que les erreurs de mesure sur le débit peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de $\pm 3\%$ sur les débitmètres à effet vortex, $\pm 8\%$ sur les débitmètres massiques et $\pm 15\%$ sur les débitmètres turbines opérant sous des conditions industrielles. De même, il a été conclu que l'installation de conditionneurs d'écoulement entre la source de perturbation et le débitmètre sert à réduire l'effet de la perturbation et à améliorer les performances métrologiques du débitmètre. Ces conclusions sont en accord avec les résultats de Botros (1994), Yeh et Mattingly (1996), Morrow (1997), Merzkirch (2001) et Mah and Paterson (2001).

3.4 - Revue des études portant sur les performances des conditionneurs d'écoulement :

Le second aspect de la débitmétrie industrielle réside dans la production de l'écoulement établi juste en amont du débitmètre. Ce qui permet d'assurer une meilleure précision de mesure du débit. Les programmes de recherche menés dans ce sens concernent l'étude expérimentale ou numérique du comportement aérodynamique des dispositifs de conditionneurs et de redresseurs d'écoulements. Ces études ciblent principalement la

conception de dispositifs redresseurs capables de produire la condition d'écoulement établi dans une marge normalisée, tout en assurant les critères suivantes :

- Distances de développement courtes (inférieure ou égale à 30 Diamètres) ;
- Profile de vitesse axiale dans une marge de $\pm 5\%$ du profile obtenue après une longueur de développement de 100 Diamètres selon les normes ISO 5167;
- Minimum de perte de charge engendrée sur l'écoulement ;
- Minimum d'encombrement à l'installation de conduite.

Les études faites au National Engineering Laboratory (Grande Bretagne) présentées par Reader Harris et Keegans (1986), Reader Harris (1997), Barton (1999, 2002) et au Centre d'Etude et de Recherche de Toulouse (France) présentées par Gajan et Hebrard (1986, 1991 et 1997) et aux Etats Unis faites par Breanan (1991), Karnik et al. (1995), Sawchuk et peck (1998), Barg et al. (2000), considèrent l'étude du développement des écoulements après une variétés de conditionneurs d'écoulement tels que le conditionneur à faisceaux de tubes, l'étoile, le Zanker, décrits dans les normes, et les disques perforés (Laws, Spearman, Gallagher, le CPACL et le Mitsubishi). La plupart de ces études visaient l'étude de l'effet de ces dispositifs sur la précision des débitmètres installés en aval de ces éléments. Peux de travaux considèrent l'étude de l'efficacité des conditionneurs dans la production de la condition d'écoulement parfaitement établi en terme du profile de la vitesse moyenne et la structure de la turbulence. Une contribution particulièrement importante à cet aspect est faite par Laws et Ouazzane dans une série de travaux de recherche (Laws et Ouazzane 1990 – 1997) et Ouazzane et Barrigou (1999).

Les travaux récents présentés par Sattary (1998), Sawchuk et Peck (1998), Bowles (1999), Barg et al. (2000, 2001) et Mah and Paterson (2001) ont été consacrés à la revue des performances de la majorité de dispositifs redresseurs d'écoulements traités dans la littérature technique. Les principales caractéristiques techniques des conditionneurs d'écoulement ont été exhaustivement exposées dans ces articles. Ces travaux montrent clairement que les conditionneurs d'écoulement type plat perforé (Laws, CPACL, le Gallagher, K-Lab, NOVA, Sprenkle, le Mitsubishi et le Spearman) commence a gagner du mérite vis a vis des conditionneurs d'écoulement standards (à faisceaux de tube, étoile, AMCA et le Zanker etc...). Ces dispositifs sont actuellement utilisées par l'industrie gazière (Mah and Patterson (2001)) et sont inclus dans les versions révisées des normes

internationales ISO 5167 (2001) et AGA3/API (2000). Ces conditionneurs d'écoulement commencent à avoir un vaste domaine d'application dans la débitmétrie du gaz utilisant les débitmètres à diaphragme, à ultrasons, la turbine et l'effet votrex (Barg et al. (2001)).

Les majeurs contributions expérimentales et numériques dans l'étude des conditionneurs d'écoulements peuvent être classées en trois catégories principales :

- a) Etude des conditionneurs d'écoulements standards (recommandés dans les normes ISO 5167 version 1982, 1991) ;
- b) Etude des conditionneurs type plats perforés ;
- c) Etude des conditionneurs type hybrides.

3.4.1 – Etude des conditionneurs d'écoulements standards :

Cette catégorie de conditionneurs d'écoulements regroupe le conditionneur à faisceaux de tubes (version ISO 5167, AGA 3 et le Stuart), le Zanker (ou nid d'abeilles), et l'Etoile (figures 2.2. a, b, c).

Les études concernant ces dispositifs ont débuté depuis Zanker (1962) qui a développé son conditionneur qui fut adopté par les normes internationales ISO 5167 (1982) ; Les performances de ce conditionneur d'écoulement ont été étudiées par Laws et al. (1992, 1995) et par Barton (2002) ; Les mesures expérimentales des profils de vitesse axiale, de l'intensité de la turbulence et du nombre de swirl (caractéristique de l'écoulement giratoire), montrent que ce conditionneur satisfait les exigences des normes ISO 5167 en matière de production de l'écoulement établi (profil de vitesse dans les limites de $\pm 5\%$ et le nombre de swirl dans les limites de $\pm 2^\circ$) dans des distances de développement comprises entre 6 et 9 diamètres. Les simulations numériques de Barton (2002) en utilisant le code Phoenics 3D, montrent que le conditionneur Zanker produit le profil de vitesse requis par les normes dans des distances de 9 diamètres tandis que l'angle de giration (swirl) n'était pas conforme aux spécifications des normes .

Le conditionneur d'écoulement Etoile a fait l'objet de plusieurs études, depuis Waters et al. (1976), McHugh et al. (1984), Laws et Ouazzane (1995), jusqu'à Laribi et al. (2003). Les tests expérimentaux du champ de vitesse moyenne et de la turbulence en présence de perturbation créée par une vanne ouverte (à 50%, 70% et 100%) ou des coudes simples ou

double en des plans perpendiculaires ont été faits. Les résultats montrent que le conditionneur Etoile crée un profil de vitesse uniforme associé à un niveau de turbulence variable. L'efficacité de ce conditionneur à réduire l'écoulement giratoire (swirl) est mise en évidence. Les résultats montrent de même que la longueur du conditionneur Etoile (Standards de 2 Diamètres) n'a pas d'influence notable sur ces performances dans la production de la condition d'écoulement établi.

Le conditionneur d'écoulement à faisceaux de tubes décrit dans toutes les normes (ISO 5167, AGA 3 et API 14.3) fut le plus testé dans la littérature technique. Les performances de ce conditionneur d'écoulement à réduire les effets de perturbations sévères générées par des coudes simples, des coudes doubles en deux plans perpendiculaires, des vannes ouvertes ou semi ouvertes, et les tès et à produire la condition de l'écoulement établi. Les travaux de McFaddin et al. (1990), Karnik et al. (1993, 1999), Morrow (1995, 1997), Reader Harris (1997), Merzkirch (2001), Barg et al. (2000) et Laribi et al. (2002, 2003) montrent que le conditionneur d'écoulement à faisceaux de tubes présente de meilleures performances en matière de réduction de l'erreur de mesure du débit à des distances axiales comprises entre 11 et 13 diamètres. Sa performance à réduire l'effet de l'écoulement giratoire est importante tandis qu'il n'est pas très efficace à réduire les effets des asymétries du profil de vitesse axiale.

3.4.2 – Etude des conditionneurs types plats perforés :

Les performances médiocres de conditionneurs standards dans la production de la condition d'écoulement établi et dans la réduction des effets des perturbations dans l'écoulement, associés à des chutes de pressions importantes ont tous poussés les chercheurs à proposer de nouvelles formes de conditionneurs d'écoulement type plats perforés. Akashi et al. (1978) fut le premier qui propose son conditionneur dis (Akashi ou Mitsubishi MHI). Il s'agit d'un plat d'épaisseur de $0.13 D$ et percé de 30 trous uniformes réparties d'une manière hexagonale sur la section de la conduite. Humphreys et al. (1986), Reader Harris et Keegans (1986) Spearman et al. (1996), Morrison et al. (1997) ont testés les performances de ce conditionneur à éliminer des perturbations créées par un triple coude puis par un coude simple. Ces études montrent que ce conditionneur est efficace pour l'élimination de l'écoulement giratoire mais pas autant pour les distortions asymétriques du profil de vitesse. Ceci a été attribué principalement à la répartition uniforme des trous sur la section.

D'autres conditionneurs d'écoulement type plats perforés fut développés et testés sous différentes conditions d'écoulements. Les conditionneurs les plus importants sont le conditionneur Laws (1990), le Spearman ou NEL (1995), le Ghallagher (1995), CPA 50E (Karnik et al.(1995)) . Ces conditionneurs sont caractérisés par leur porosité graduée, c'est à dire un arrangement graduée des trous, sur la section de la conduite (figures 2.2, d, e, f).

3.4.3 – Etude des conditionneurs types hybrides :

Des conditionneurs types hybrides fut proposés par Ghallagher (1995), Laws (1995) ; Il s'agit d'une combinaison de plat perforé avec un dispositif à action vortex (faisceaux de tubes, Etoile ou nid d'abeilles).

Plusieurs études expérimentales et numériques ont été consacrées à l'investigation des performances des conditionneurs types plats perforés et hybrides vis a vis des conditionneurs standards tel que le faisceaux de tubes (Morrow (1995, 1997), Morrison et al. (1997), Reader Harris (1997), Merzkirch et al. (1998, 2001), Ouazzane et Barrigou (1999), Barg et al. (2001), Ghallagher (2001), Barton (2002), Laribi et al. (2002, 2003) et Chirigui (2003)).

Morrow (1995, 1997) entame une série de mesures expérimentales sur les performances de conditionneurs (à faisceaux de tubes, Stuart, Ghallagher, le CPA50E) a éliminer les perturbations créés par deux coudes dans des plans perpendiculaires et une vanne semi ouverte. Les performances ont été évalués par rapport à un débitmètre à diaphragme placé à des distances différentes par rapport au conditionneur d'écoulement. Les résultats montrent que le faisceaux de tubes permet une réduction de l'erreur de mesure du débit à des niveaux acceptables à des positions axiales $Z/D = 11$ à 13 . Il est plus efficace à réduire les mouvements de tourbillonnement (swirl) que les assymétries du profile de vitesse. Les deux plats perforés (Ghallagher et le CPA50E) testés permettent la réduction de l'erreur de mesure à 0.1% à des distances $Z/D=7$. D'après l'étude expérimentale de Chirigui (2003) le conditionneur CPA50E présente de meilleurs performances à $Z/D=7$ que le conditionneur hybride Laws.

Ouazzane et Barrigou (1999) ont procédé à une comparaison entre le plat perforé NEL et le conditionneur hybride Laws ; Les conditionneurs ont été testés devant une perturbation de

vanne ouverte à 50%, 70% et 100% et un débitmètre à diaphragme. Les résultats montrent que les meilleures performances ont été obtenues par le conditionneur hybride Laws à des distances de 10 diamètres, tandis que le conditionneur NEL (quoiqu'il élimine l'écoulement giratoire) nécessite des longueurs beaucoup plus importantes pour rétablir les distortions du profile de vitesse.

Barton (2002) présente une étude numérique en utilisant le code commercial Phoenics pour étudier les performances des conditionneurs Zanker et le plat perforé Mitsubishi ; Les résultats montrent que le Zanker peut produire à $Z/D = 9$ le profile de la vitesse dans la marge des limites spécifiées par les normes ISO5167 ; Tandis que la condition du tourbillons (swirl) n'était pas vérifiée. Le plat perforé Mitsubishi présente en revanche de meilleurs performances en matière de production de l'écoulement établi.

3.5 - Conclusions

Les travaux expérimentaux et numériques concernant le problème de la débitmétrie industrielle sont très variés et très nombreux ; Les travaux de recherche cités dans ce chapitre permet de conclure ce qui suit :

- Les conditions d'écoulement perturbés (causées par des coudes, les vannes etc...) peuvent causer des erreurs importantes qui dépassent largement les marges tolérées par les normes internationales ;
- Les longueurs de développement spécifiées par les normes standards sont insuffisantes pour produire la condition de l'écoulement établi en amont de débitmètres ; Ceci représente une source d'erreur dans la mesure du débit ;
- Les conditionneurs standards tels que le faisceaux de tube et l'Etoile ne sont pas capable de produire la condition d'écoulement établi dans des distances de développement telles que celles prescrites par les normes internationales (en général de l'ordre de 10 à 20 Diamètres) ;

- Les conditionneurs standards causent des erreurs de mesure du débit supérieures à $\pm 1.5\%$ lorsque le débitmètre est installé à une position axiale $Z/D \leq 11$ en aval du conditionneur ; Ceci est attribué principalement au profile uniforme de la vitesse créée par le conditionneur ; Ces conditionneurs ont été montrés efficace à atténuer l'assymétrie dans l'écoulement mais tout en générant un profile de vitesse uniforme qui nécessitera une longueur de développement importante (Aichouni et Laribi (2000) et Messoul (2000)) ;
- Les conditionneurs types plats perforés ont été montrés capables de mieux corriger les perturbations du champs de l'écoulement et à produire la condition de l'écoulement établi ; Ces conditionneurs présentent de meilleures performances dans la réduction des erreurs de mesure du débit et dans l'amélioration des caractéristiques métrologiques des débitmètres ;
- Toute fois, les résultats restent relativement controversés dans les distances de développement nécessaires pour la production de l'écoulement parfaitement établi (écoulement moyen et champs turbulent) ;
- Les conditionneurs d'écoulement type hybrides (Laws et le Gallagher) présentent les meilleurs performances dans la production de l'écoulement établi en raison de la combinaison de l'action du mixage turbulent (caractéristique des plats perforés) et de l'action de l'effet vortex (caractéristique des conditionneurs Etoile, Zanker). Ces dispositifs ont été montrés efficace à la réduction des erreurs de mesures du débit (Laws et Ouazzane (1996), Ouazzane et Barrigou (1999), Gallagher et Saunders (2001), Merzkirch(2001) et Laribi et al. (2002, 2003)) .