

Chapitre 5

DISCUSSION DES RESULTATS

Chapitre 5 - DISCUSSION DES RESULTATS

5.1 - Introduction

Les recommandations des normes internationales pour l'utilisation de conditionneur d'écoulement avec le débitmètre sont, dans certain cas, controversées et même contradictoires. Ceci a ramené les chercheurs à conclure que le développement des écoulements générés par ces dispositifs n'est pas tout à fait clairs (Xiong et Merzkirch 1998). L'objectif de la présente étude est de contribuer à examiner numériquement le développement des écoulements après les conditionneurs d'écoulement décrits dans les normes, type Etoile et à faisceaux de tube et le conditionneur hybride Laws. Le développement de l'écoulement après ces dispositifs sera étudié en détail afin de vérifier leur capacité et leur efficacité à produire la condition de l'écoulement établi nécessaire aux mesures précises des débitmètres dans des distances de développement raisonnables.

Deux parties principales sont réalisées :

- Etude du développement naturel des écoulements turbulents dans les conduites lisses et examen de la condition de l'écoulement établi.
- Etude du développement des écoulements après les conditionneurs d'écoulement.

La méthode numérique décrite dans le chapitre 4 a été utilisée pour mener les prévisions numériques ; Les conditions initiales nécessaires pour commencer les calculs seront spécifier lors de la discussion de chaque cas. La grille numérique utilisée dans les calculs est non-uniforme dans la direction radiale de la conduite. Un grand nombre de nœuds numériques est placé dans les zones caractérisées par des gradients de vitesses importants, tel que la zone près de la paroi de la conduite et les zones de cisaillement. Plusieurs grilles ont été testées afin d'obtenir une solution numérique indépendante de la grille ; La figure (5.1) montre le profil de vitesse axiale obtenu numériquement après 22 diamètres de développement dans une conduite lisse en utilisant trois grilles numériques comportant $N_r = 30, 46$ et 60 nœuds dans la direction radiale. La grille axiale est choisie de telle manière que le pas dans ce sens soit maintenu constant et égale à 4% du domaine de calcul (Rayon de la conduite). D'après la figure (5.1), il est clair que la grille numérique comportant 30 nœuds donne une solution différente des grilles comportant 46 et 60 et que les solutions de ces deux dernières grilles sont identiques. Donc la grille de 46 nœuds a été utilisée pour réaliser les simulations du cas de l'écoulement en développement naturel dans la conduite. Des tests similaires ont été effectués pour tous les autres cas traités dans le présent travail.

Afin de valider les prévisions numériques obtenues, les profils de la vitesse moyenne U/U_m , l'énergie de la turbulence $K/U\tau^2$, et la contrainte de Reynolds de cisaillement $-uv/U\tau^2$, obtenus

après 100 diamètres de l'entrée de la conduite sont comparés aux mesures expérimentales faites par Lawn (1971). La figure (5.2) montre bien que les prévisions numériques sont en parfaite concordance avec les mesures expérimentales ; Ceci montre bien que la procédure numérique utilisée dans la présente étude est adéquate pour ce genre d'écoulement.

Les prévisions numériques reportées dans ce chapitre ont été effectuées pour des nombres de Reynolds compris entre 10^5 et 2.5×10^5 selon les tests expérimentaux utilisés pour spécifier les conditions initiales.

5.2 - Etude du développement naturel des écoulements turbulents dans les conduites lisses et examen de la condition de l'écoulement établi

5.2.1 – Conditions Initiales

Pour le cas de l'écoulement axisymétrique en développement naturel dans une conduite, le profile de la vitesse initiale, est spécifié uniforme sur toute la section de la conduite à l'exception de la couche limite à proximité de la paroi solide où la distribution de la vitesse a été supposée suivre la loi en puissance $(1/7)^e$.

Le niveau initial de la turbulence K est spécifié selon Aichouni (1992) et Morrison et al. (1994) par la relation :

$$K = 0.05 U^2 \quad (5.1)$$

Le taux de dissipation initial est déterminé à partir de la relation :

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} K^{3/2} / l_m \quad (5.2)$$

Où $C_\mu = 0.09$ est une constante et l_m est une longueur de mélange caractéristique ; Dans cette étude la valeur de l_m a été spécifiée comme étant une fonction du rayon de la conduite R :

$$l_m = 0.07 R \quad (5.3)$$

Cette fonction a été utilisée par Aichouni (1992), Morisson et al. (1994) et plus récemment par Barton (2002).

5.2.2 – Développement des champs moyen et turbulent de l'écoulement dans une conduite circulaire lisse

Les simulations numériques obtenues sont représentées dans les figures (5.3), (5.4) et (5.5) ; Les figures (5.3–a, b, c) montrent le développement de l'écoulement à partir d'une vitesse initiale uniforme sur la majorité de la section de la conduite; Sous l'effet des frottements visqueux, il y'a

une diminution de la vitesse proche de la paroi solide et une accélération à proximité de la ligne de centre ; Ceci s'accompagne avec l'élargissement de la couche limite qui doit envahir toute la section de la conduite vers 25 diamètres de développement. A ce point la vitesse à la ligne de centre atteint son maximum puis se développe pour atteindre des valeurs stables vers 75 à 80 diamètres où l'écoulement est supposé parfaitement établi.

La structure turbulente de l'écoulement est représentée par les profils de l'énergie de la turbulence ($K/U\tau^2$), et la contrainte de Reynolds ($-uv/U\tau^2$), sur les figures (5.4) et (5.5). Ces figures montrent que la distribution uniforme du profil de la vitesse à l'entrée de la conduite est associée à un niveau uniforme élevé de la turbulence ($K/U\tau^2$), et par un niveau nul des contraintes de Reynolds de cisaillement ($-uv/U\tau^2$), sauf au niveau de la paroi solide où il y'a un gradient de vitesse important générant des niveaux de turbulence élevés. Avec le développement de l'écoulement dans le sens axial (z/D), il y'a une redistribution des niveaux énergétiques turbulents entre les différentes zones de l'écoulement. Ce mouvement turbulent reste visible même à des distances de développement de l'ordre de 50 à 60 diamètres de l'entrée de la conduite.

5.2.3 – Examen de la condition de l'écoulement établi

La notion d'écoulement établi, signifie un état du développement de l'écoulement à partir duquel aucun changement spatial des champs de la vitesse ou des paramètres turbulents ne se fait dans la direction axiale ; C'est à dire que toute variation dans cette direction est nulle. Les figures (5.3), (5.4) et (5.5) qui montrent le développement de l'écoulement le long de la conduite montrent que cette condition ne peut réellement être atteinte que si on dispose de plus de 80 diamètres de développement rectilignes.

Il est à signaler ici que la longueur de développement nécessaire à l'établissement complet de l'écoulement reste toujours en débat entre les différents chercheurs ; Laufer (1954) en se basant sur les mesures expérimentales suggère que l'écoulement est établi après 50 diamètres, tandis que Barbin et Jones (1963), Lawn (1971), Lim (1980) et Aichouni (1992) proposent des longueurs de développement de l'ordre de 80 à 100 diamètres. Plus récemment, Morisson et al. (1994) en se basant sur des simulations numériques obtenues en utilisant le code commercial Fluent a montré qu'un profil uniforme à l'entrée de la conduite produit la condition de l'écoulement établi après 40 diamètres de développement rectiligne. Messoul (2000) a montré numériquement que la longueur de développement et d'établissement de l'écoulement dépend principalement du niveau initial de la turbulence à l'entrée de la conduite ; Des niveaux de turbulence élevés à l'entrée de la conduite tendent à réduire la longueur nécessaire à l'établissement de l'écoulement.

5.3 - Etude du développement des écoulements après les conditionneurs d'écoulement

Dans cette section, les prévisions numériques du développement de l'écoulement après trois conditionneurs d'écoulement seront présentées et discutées ; Les conditionneurs d'écoulement étudiés sont les conditionneurs Etoile et à faisceaux de tubes (décrits dans les normes ISO5167) et le conditionneur hybride (plat perforé / Etoile) de Laws. La figure (5.6) schématise le domaine de calcul de l'écoulement après le conditionneur d'écoulement. Les conditions initiales sont spécifiées à partir des mesures expérimentales tirées de la littérature technique. Les simulations sont faites jusqu'à la station axiale $Z/D=100$ après le conditionneur d'écoulement.

5.3.1 – Etude du développement de l'écoulement après le conditionneur d'écoulement Etoile

5.3.1.1 - Conditions Initiales

Les conditions initiales sont spécifiées à partir des mesures expérimentales faites par Laws et Ouazzane (1994). Le conditionneur d'écoulement Etoile était testé pour éliminer une perturbation créée par une vanne ouverte à trois niveaux différents (100%, 70% et 50% ouverte). Les profils de la vitesse moyenne et de l'intensité de la turbulence mesurés à 0.5 diamètres après le conditionneur sont utilisés dans la présente étude pour spécifier les conditions initiales à la procédure de simulation. Le niveau initial de la turbulence K est spécifié à partir des mesure de l'intensité de la turbulence axiale en supposant une turbulence isotropique $\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2}$ c'est à dire :

$$K = 3/2 \overline{u'^2} \quad (5.4)$$

Le niveau initial du taux de dissipation ε est déterminé par la relation (5.2).

5.3.1.2 – Validation des simulations numériques

Afin de vérifier l'efficacité de la procédure numérique à prédire le développement des écoulements après les conditionneurs d'écoulement en présence d'écoulement fortement perturbé (assymétrie, cisaillement etc..) les prévisions numériques obtenues dans la présente étude sont comparées aux mesures expérimentales faites par Laws et Ouazzane (1994). Les figures (5.7), (5.8) et (5.9) montrent la comparaisons entre les simulations numériques et les observations expérimentales pour les trois cas de perturbations (vanne ouverte à 100%, à 70% et 50%) respectivement. Les paramètres comparés sont les profils de la vitesse moyenne U/U_m et l'intensité de la turbulence axiale $Tu(\%)$ obtenus à des stations axiales $z/D=0.5, 1.5, 2.5$ et 3.5 . A partir de ces figures, il est clair que l'accord entre les prévisions numériques et les mesures expérimentales est parfait pour les profils de la vitesse moyenne (U/U_m) et acceptable pour les

profils de l'intensité axiale de la turbulence et ceci pour tous les cas étudiés. Ceci montre bien que la procédure numérique prédit avec une bonne précision le développement des écoulements après les conditionneurs d'écoulement. Ceci est en accord avec les résultats de Morrison e al. (1994), Erdal (1997), Aichouni et Laribi (2000) et de Barton (2002) qui ont montré que les techniques numériques de la dynamique des fluides (CFD) constituent une approche excellente pour étudier le comportement aérodynamique des conditionneurs d'écoulement.

5.3.1.3 – Développement des champs de l'écoulement moyen et turbulent après le conditionneur d'écoulement Etoile

Les prévisions numériques de l'écoulement après le conditionneur Etoile sujet à une perturbation créée par une vanne ouverte sont présentées dans les figures (5.10) à (5.13).

Les simulations du cas de la vanne ouverte à 100% sont présentées sur les figures (5.10) et (5.11). La figure (5.10, a) qui représente la distribution radiale de la vitesse moyenne (U/U_m) montre que la vanne ouverte à 100% avec le conditionneur d'écoulement Etoile créent un profil de vitesse en sillage symétrique, présentant un déficit à la ligne de centre de la conduite juste à la sortie du conditionneur ($Z/D=0.54$). Ce sillage est causé par la partie solide au centre du conditionneur Etoile ; Ce profil se développe avec la distance axiale (Z/D) tout en augmentant au centre de la conduite et en diminuant dans les zones près de la paroi solide sous l'effet des frottements visqueux. Le profil de la vitesse devient uniforme après 20.5 diamètres associé à un niveau de turbulence faible sur toute la section de l'écoulement (Figure 5.11, a). Cet état de l'écoulement nécessite plus de longueur pour se développer et atteindre la condition de l'écoulement établi. Cette observation est en accord avec les résultats de Messoul (2000) qui a mis en évidence l'effet du niveau de turbulence sur le développement de l'écoulement uniforme dans une conduite lisse. Le contour de la vitesse U/U_m , présenté dans la figure (5.10, b) montre clairement que la vitesse continue à se développer même à des distances de développement de l'ordre de 70 diamètres. Après cette longueur la vitesse ne subit aucune variation dans la direction axiale et l'écoulement est supposé établi.

Les prévisions du champs turbulent dans le cas de la vanne ouverte à 100% après le conditionneur Etoile sont montrées dans les figures (5.11, a et b). Ces figures montrent que les niveaux énergétiques turbulents sont élevés juste après le conditionneur puis commencent à se développer avec la distance axiale pour atteindre des valeurs inférieures aux valeurs obtenues à la condition d'écoulement établi. Ce qui propose que l'énergie turbulente continue à se redistribuer entre les différentes zones de l'écoulement avec la distance axiale. Les contours de l'énergie de la turbulence $K/U\tau^2$ et de la contrainte de Reynolds $-uv/U\tau^2$ montrent clairement que ces paramètres continuent à subir des variations même à des distances de développement de l'ordre de 55 diamètres après le conditionneur. Des niveaux stables de ces paramètres sont

obtenus après les stations $z/D=60$ où le champs de l'écoulement turbulent atteint sa condition d'écoulement établi.

Les prévisions dans le cas de la vanne ouverte à 50% sont montrées respectivement dans les figures (5.12) et (5.13). La vanne et le conditionneur créent une sévère perturbation assymétrique de la vitesse moyenne accompagnée par une forte turbulence. Cette perturbation assymétrique persiste le long de la conduite jusqu'à des distances de développement de l'ordre de 75 diamètres après le conditionneur Etoile. Après cette distance les paramètres de l'écoulement (U/U_m , $K/U\tau^2$ et $-uv/U\tau^2$) ne subissent pas de variations axiales et l'écoulement est supposé dans sa condition établie.

5.3.2 – Etude du développement de l'écoulement après le conditionneur d'écoulement à faisceaux de tubes

5.3.2.1 - Conditions Initiales

Les conditions initiales sont spécifiées à partir des mesures expérimentales faites par Xiong et Merzkirch. (1998). Le conditionneur d'écoulement à faisceaux de tubes était testé pour éliminer une perturbation crée par un double coude dans des plans perpendiculaires à un nombre de Reynolds $Re=10^5$. Les profils de la vitesse moyenne et de l'énergie de la turbulence mesurés à 0.5 diamètres après le conditionneur sont utilisés dans la présente étude pour spécifier les conditions initiales à la procédure de simulation. Les relations (5.2) et (5.3) ont été utilisées pour déterminer le niveau initial du taux de dissipation ε .

5.3.2.2 – Développement des champs de l'écoulement moyen et turbulent après le conditionneur d'écoulement à faisceaux de tubes

Les prévisions numériques de l'écoulement après le conditionneur à faisceaux de tubes sujet à une perturbation crée par une double coude sont présentées dans les figures (5.14) et (5.15).

La figure (5.14) montre le développement de l'écoulement moyen simulé après le conditionneur à faisceaux de tubes. Cette figure montre que l'écoulement sort des passages annulaires du conditionneur sous forme de jets. Ces jets de fluides créent des interactions et favorisent le mixage de l'écoulement avec la distance axiale. La perturbation assymétrique crée par le double coude est nettement présente dans la zone juste après le conditionneur. Cette assymétrie persiste et reste présente dans l'écoulement moyen meme après des longueurs de développement de l'ordre de 60 diamètres après le conditionneur.

Les prévisions du champs turbulent après le conditionneur à faisceau de tubes sont montrées dans les figures (5.15, a et b). Ces figures montrent que les niveaux énergétiques turbulents

associés aux jets de fluides sont importants ; Ce qui favorise le transfert de l'énergie turbulente entre les différentes zones sur la section de l'écoulement. Le mixage turbulent des jets de fluides issus des petites conduites qui constituent le conditionneur sont apprenes dans les figures (a) et (b). L'effet des jets et de la perturbation initiale semblent être éliminés du champ turbulent après des distances de développement de l'ordre de 45 à 50 diamètres. Après cette distance de développement, les paramètres turbulents $K/U\tau^2$ et $-uv/U\tau^2$ ne subissent aucune variations le long de la conduite.

5.3.3 – Etude du développement de l'écoulement après le conditionneur d'écoulement type hybride Laws

5.3.3.1 - Conditions Initiales

Les conditions initiales dans ce cas sont spécifiées à partir des mesures expérimentales faites par Laws et Ouazzane (1995). Le conditionneur d'écoulement hybride (plat perforé) Laws était testé pour éliminer une perturbation créée par une vanne ouverte à 100%, 70% et 50%. Les profils de la vitesse moyenne et de l'énergie de la turbulence mesurés à 0.5 diamètres après le conditionneur Laws sont utilisés dans la présente étude pour spécifier les conditions initiales à la procédure de simulation. Les relations (5.2) et (5.3) ont été utilisées pour déterminer le niveau initial du taux de dissipation ε . Les simulations numériques sont fait au même nombre de Reynolds $Re=2.5 \times 10^5$ que les tests expérimentaux.

5.3.3.2 – Développement des champs de l'écoulement moyen et turbulent après le conditionneur Laws

Les simulations numériques de l'écoulement après le conditionneur type hybride plat perforé Laws sujet à une perturbation créée par une vanne ouverte à 100, 70 et 50% sont présentées dans les figures (5.16) et (5.17). Il est important de noter ici que le conditionneur Laws génère pratiquement le même profil de vitesse juste à la sortie et ce quelque soit le degré de l'ouverture de la vanne. Ainsi, le développement de l'écoulement après ce conditionneur reste le même. Pour cela on ne présentera que les résultats simulés pour le cas de la vanne ouverte à 70%. Les autres cas sont pratiquement identiques.

Les prévisions de la vitesse axiale sont montrées sur la figure (5.16 a, b). La distribution radiale du profil de la vitesse est représenté sur la figure (5.16-a). Cette figure montre que l'écoulement sort des petits trous du conditionneur sous forme de jets de fluides. Ces jets causent de fortes interactions dans l'écoulement et favorisent le mixage de l'écoulement avec la distance axiale. Ce mixage permet d'harmoniser l'écoulement perturbé et corrige sa perturbation dans des distances relativement courtes comparativement aux deux autres conditionneurs étudiés avant. A la station axiale $Z/D=10.5$, l'effet de la perturbation initiale n'est que minime. L'examen du

champs global de l'écoulement moyen schématisé dans la figure (5.16-b) suggère que le profile de la vitesse continue son développement jusqu'à des distances de 40 diamètres après le conditionneur.

Les prévisions du champs turbulent après le conditionneur Laws sont montrées dans les figures (5.17, a et b). Ces figures montrent que dans la zone immédiate après le conditionneur un mixage turbulent intense se produit ; ce qui favorise la redistribution des niveaux énergétiques dans l'écoulement d'une manière rapide. L'effet des jets et de la perturbation initiale semblent être éliminés du champs turbulent après des distances de développement de l'ordre de 30 diamètres. Après cette distance de développement, les paramètres turbulents $K/U\tau^2$ et $-uv/U\tau^2$ ne subissent aucune variations le long de la conduite.

5.4 – Etude comparative des performances aérodynamiques de trois conditionneurs d'écoulement (Etoile, Faisceaux de tubes et Laws)

Dans le but d'examiner l'efficacité des trois conditionneurs à corriger les perturbations de l'écoulement et à produire la condition d'écoulement établi dans des distances de développement relativement courtes, les prévisions numériques du champs moyen de l'écoulement (contour de la vitesse axiale U/U_m et vecteur vitesse) sont analysées dans la zone de développement allant jusqu'à $Z/D = 20$. Les profiles de la vitesse U/U_m obtenus à différentes stations axiales (Z/D) sont comparés au profile obtenu à la station $Z/D=100$ où l'écoulement est parfaitement établi. La marge des limites ($\pm 5\%$) des normes est ajoutée aux figures pour examiner si le profile obtenu à la station Z/D considérée se situe dans cette marge.

Les prévisions du champs moyen de l'écoulement après le conditionneur Etoile sujet à une perturbation causée par la vanne ouverte à 100% et 50% sont présentées dans la figure (5.18), (5.19) et (5.20). Ces figures montrent que dans le cas d'une perturbation symétrique (vanne ouverte à 100%), le conditionneur redresse le profile de la vitesse à un niveau acceptable selon les normes après des distances de 15 diamètres. Dans le cas de perturbations non symétriques (cas de la vanne ouverte à 50%), le conditionneur Etoile ne permet pas de corriger cette perturbations même après des distances de 20 diamètres où l'effet de la perturbation reste présent.

Les prévisions du développement du champs moyen de l'écoulement après le conditionneur à faisceaux de tubes sont représentées dans la figure (5.21). Cette figure montre clairement les jets de fluides issus des tubes du conditionneur qui se diffusent rapidement avec la longueur de développement. L'effet de la perturbation initiale crée par le double coude est toujours présent à 20 diamètres du conditionneur sous forme d'une légère assymétrie. Cette observation est visible sur la figure (5.22) qui représente les profiles de la vitesse moyenne U/U_m obtenus à différentes stations axiales Z/D et comparés au profile de l'écoulement établi. Cette figure montre que le

profile de la vitesse crée par le conditionneur à faisceaux de tubes reste loin d'être accepté dans la marge des ($\pm 5\%$) des normes et ce pour des distances de développement inférieur ou égale à 15.5 diamètres. Toutefois, le profile obtenu après 20.5 diamètre est acceptable selon les normes.

L'efficacité du conditionneur d'écoulement Laws à produire la condition d'écoulement établi dans des distances inférieures ou égales à 20 diamètres est examinée. Les prévisions numériques du champ moyen de l'écoulement après le conditionneur Laws sont représentées dans la figure (5.23). Cette figure montre que la zone immédiate après le conditionneur est caractérisée par un mixage et des interactions intenses des jets fluides issus des trous du conditionneur. Sur l'effet du mélange turbulent des jets fluides, le profile de la vitesse se redresse rapidement et atteint une distribution proche de celle de l'écoulement établi après une longueur de développement de l'ordre de 10 à 15 diamètres. Cette observation est claire sur la figure (5.24) qui représente les profiles de la vitesse moyenne U/U_m à différentes stations axiales, comparés au profile de l'écoulement établi avec la marge ($\pm 5\%$) spécifiée par les normes. Cette figure montre que tous les profiles simulés aux stations axiales $Z/D < 15$ restent loin d'être établi dans la limite des marges ($\pm 5\%$) des normes. Aux stations $Z/D=15.5$ et $Z/D=20.5$ la vitesse s'est développée à un profile acceptable selon les normes.

En vue de ces résultats concernant les trois conditionneurs d'écoulement (Etoile, Faisceaux de tubes et Laws), la supériorité du conditionneur Laws par rapport aux deux autres conditionneurs est mise en évidence. Le conditionneur Laws qui est du type hybride combine un plat perforé à action mixage turbulent et l'Etoile (à action vortrex). Les études expérimentales récentes faites par Xiong et Merzkirch (1998), Merzkirch (2001) et Laribi et al. (2002, 2003) montrent clairement la nette supériorité de ce conditionneur par rapport conditionneurs décrits dans les normes notamment le conditionneur Etoile et à faisceaux de tubes. Toutefois, la distance minimale nécessaire au conditionneur pour la production de l'écoulement établi reste controversée ; Les différents chercheurs proposent différentes valeurs comprises entre 5 à 15 diamètres. D'après une étude expérimentale détaillée sur le développement de l'écoulement après trois conditionneurs (à faisceaux de tubes, Laws et Mutsibushi) , Merzkirch (2001) conclu qu'à ce jour aucune conception de conditionneur ne permet d'obtenir la condition de l'écoulement parfaitement établi dans des distances de développement inférieur ou égale à 20 diamètres. Husain (1995) note que la condition d'écoulement établi doit être définie dans les normes comme étant le profile obtenu après 45 diamètres de développement rectiligne après un conditionneur d'écoulement tel que le Sprenkle ou le faisceaux de tubes.