

Visa du chef de département des  
Sciences et Technologies  
Signature:.....  
Date:.....

## Etude numérique de la déposition d'aérosols dans une conduite coudée 90° (partie dynamique).

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de Master académique  
en «*Installations Energétiques*»

Encadreur: *M. KAHIL Yacine.*  
Signature: .....  
Date: .....

Réalisé par :  
Étudiant : *SEDOUD*  
*Abdelghani*  
Signature : .....  
Date : .....

*Membres du jury*  
*M. SERDOUN Nadjib*  
*M. ZEBBAR Djallel*  
*M. KAHIL Yacine*

*MAA*                      *Président*  
*Professeur*            *Examineur*  
*MCB*                      *Encadreur*

## ***Remerciement***

*A*vant tout nous remercions le grand DIEU le plus miséricordieux sans lui nous n'aurons jamais pu achever ce modeste travail, et notre grand salut sur notre prophète Mohamed que le salut soit sur lui.

*N*os éternelles gratitude à nos parents, ainsi qu'à tous les enseignants qui nous ont accompagnés tout au long de notre vie scolaire et universitaire qui m'ont aidé et encouragé pendant toute la formation.

*J*e remercie aussi mes sœurs et mes frères

*N*ous tenons aussi remercier notre encadreur Dr. **Yacine KAHIL**, pour sa précieuse collaboration pour l'avancement du mémoire et l'encadrement scientifique durant toute la durée du travail.

*N*os remerciement vont aussi au :

*L*es membres de jury pour avoir accepté de participer au jury ainsi l'attention qu'ils ont porté à ce travail.

*F*inalement, je remercie tous mes collègues et tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## *Dédicace*

*J*e dédie ce mémoire a mes chers parents à qui je dois tout ce travail est le fruit de

*leur* amour, leur encouragement et sacrifices

*À* mon cher père

*À* ma chère mère

*À* mon cher grand-père

*À* ma chère grand-mère

Et ma chère sœur

*À* mes frères Ismail, Abd el Hamid, Houssam et Amdjed abd el montassir

et toute ma famille

*À* Tous qui ont participé de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail.

*À* tous nos collègues de la promotion énergétique 2016

## SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicace	
Sommaire	
Liste des figures et des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	
Chapitre 01: Synthèse bibliographique.....	10
1.1 Synthèse bibliographique.....	11
Chapitre 02 : aperçu la formulation mathématique.....	15
2.1 Généralité de la turbulence .....	16
2.2 Les méthodes principales de calcule de la turbulence .....	17
2.2.1 La simulation numérique directe (D.N.S) .....	17
2.2.2 La simulation des grandes échelles(SGE).....	17
2.2.3 La modélisation par les équations de Navier- Stocke(RANS).....	17
2.3 Les modèles de turbulence .....	18
2.3.1 Le modèle de turbulence $R_{ij} - \varepsilon$ SSG.....	19
2.3.2 Le modèle de turbulence $k-\omega$ SST .....	20
2.3.3 Le modèle de turbulence RNG $k - \varepsilon$ .....	21
2.4 Méthode numérique .....	22
2.4.1 La méthode des volumes finis .....	22
Chapitre 03 : étude de cas .....	23
3.1 Description du cas étudié .....	24
3.2 Résolution Numérique .....	28
3.2.1 Présentation GMSH .....	28
3.2.2 La géométrie .....	29
3.2.3 La génération maillage .....	30
3.2.4 Présentation de code de calcule Code _ Saturne .....	31
3.2.5 Logiciel SALOME.....	32
Chapitre 04 : résultats et discussions.....	34
4.1 Analyse et discussion des résultats.....	35
4.1.1 Les différents champs de l'écoulement .....	37
conclusion générale.....	41
Bibliographie.....	42
Résumé .....	44

## Liste des figures et des tableaux

Fig.1	La géométrie de la conduite coudée 90°.	24
Fig.2	(a) La géométrie du tube, (b) Le maillage de tube.	25
Fig.3	Section transversale avec un maillage grossier.	25
Fig.4	Sections transversales avec un maillage moyen.	26
Fig.5	Section transversale avec un maillage très raffiné (fin).	26
Fig.6	Les différentes géométries du tube.	27
Fig.7	Grille de calcul de la conduite coudée de section circulaire de longueur $L=8D$ .	27
Fig.8	Fenêtre principale de Gmsh.	28
Fig.9	La géométrie de la conduite coudée.	30
Fig.10	La génération du maillage de conduite coudée 90° 3D.	30
Fig.11	L'interface graphique de Code_ Saturne.	32
Fig.12	La plate-forme SALOME.	33
Fig.13	Les profils de vitesse moyenne dans un tube $L=2D$ .	35
Fig.14	Les profils de vitesses moyennes pour différentes distances $L$ (2D, 4D, ...).	36
Fig.15	Profil de vitesse moyenne à l'entrée de la conduite.	37
Fig.16	Champ de vitesse de l'écoulement moyen, (a) étude de cas (RANS) (b) Berrouk (LES).	37
Fig.17	Champ de pression de l'écoulement moyen, (a) étude de cas (RANS) (b) Berrouk (LES).	38
Fig.18	Lignes de courant de l'écoulement moyen, (a) étude de cas (RANS) (b) Berrouk (LES).	38
Fig.19	Lignes de courant de l'écoulement moyen près de la paroi de la conduite.	39
Fig.20	Vitesse axiale moyenne pour différentes sections de la conduite (a) calcul LES Berrouk (b) calcul RANS.	39
Tab.1	Valeurs des constantes du modèle SST.	21

## NOMENCLATURE

$R_e$	Le nombre adimensionnel de Reynolds.
$U$	Vitesse moyenne de l'écoulement, en [m/s].
$L$	Dimension caractéristique de la géométrie en [m].
$\rho$	Masse volumique, en [kg/m <sup>3</sup> ].
$\mu$	Viscosité dynamique, en Pascal. seconde [Pa .s].
$g$	Accélération de la pesanteur [m/s <sup>2</sup> ].
$U_i$	Composante de la vitesse moyenne suivant la direction i [m/s].
$u_i$	Composante de la vitesse fluctuante suivant la direction i [m/s].
$P$	Pression [Pa].
$\bar{P}$	La pression moyenne [Pa]
$\dot{p}$	La pression fluctuante [Pa]
$x_i$	Coordonnées.
$\kappa$	Constante de Von Karman.
$\Phi_{ij}$	Corrélation pression taux déformation.
$P_{ij}$	Les termes de production(modèle $R_{ij} - \varepsilon$ SSG).
$\epsilon_{ij}$	Les termes de dissipation(modèle $R_{ij} - \varepsilon$ SSG).
$d_{ijk}$	Les termes de diffusion(modèle $R_{ij} - \varepsilon$ SSG).
$C_\epsilon, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\epsilon 4}$	Constantes de turbulence (modèle $R_{ij} - \varepsilon$ SSG).
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	Nombres de Prandtl turbulent associés à $k$ et $\epsilon$ respectivement.
$y$	Distance par rapport à la paroi.
$S_{ij}$	Tenseur de déformation [1/s].
$\epsilon$	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente par unité de masse [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ].
$\underline{u}$	Vecteur vitesse [m/s] (modèle RNG).
$\underline{u}_i$	Fluctuations des vitesses dans les trois directions de l'espace [m/s].
$\omega$	Dissipation spécifique [1/s].
$\mu$	Viscosité dynamique [kg/m.s].
$\mu_t$	Viscosité dynamique turbulente [kg/m.s].
$\nu$	Viscosité cinématique, en m <sup>2</sup> /s.
$\nu_t$	Viscosité cinématique turbulente [m <sup>2</sup> /s].
$S$	Le terme source.
$\Gamma$	Le coefficient de diffusion.
$V$	Volume de contrôle [m <sup>3</sup> ].

## Indices

$div$  Divergence.

<i>grad</i>	Gradient.
<i>exp</i>	Exponentielle.
<i>D</i>	Diamètre hydraulique

### **Acronymes**

RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes.
DNS	Direct Numerical Simulation.
LES	Large Eddy Simulation.
CFD	Computational Fluid Dynamics.
SST	Shear Stress Transport.
SSG	Speziale, Sarkar & Gatski.
RNG	Renormalization Group.
RSM	Reynolds stress model.
PIV	Particle image velocimetry.

## Introduction générale

La dynamique des fluides est la prévision des écoulements turbulents, caractérisés par l'interaction entre deux différentes phases. La différence entre les phases peut être leur état thermodynamique, appelé la phase (gaz, liquide ou solide) ou leur composition chimique. De tels écoulements sont présents dans plusieurs applications industrielles, par exemples, le transport du pétrole par des tubes, dans très nombreuses machines comme les turbines, dans le système sanguin du corps humain, turbomachines fonctionnant dans des environnements pollués. Dans de tels processus, l'écoulement est turbulent et la turbulence joue un rôle très important dans le transport de masse, quantité de mouvement et d'énergie entre les phases liquides et solides.

Malgré ces diverses applications, ces écoulements sont mal interprétés à cause de nombreux problèmes non résolus ou partiellement résolus. Cela exige le développement de dispositifs qui permettent de surmonter les problèmes courants et peuvent aider à réaliser un environnement plus sain et plus sûr. Afin d'augmenter notre niveau de connaissances actuelles sur les écoulements turbulents pour la prévision des mouvements des écoulements, la chaleur de l'interphase, la masse et le transfert de quantité de mouvement.

La simulation numérique de la dynamique des fluides (CFD - Computational Fluid Dynamics) fait aujourd'hui partie intégrante de la recherche scientifique et de l'industrie, où elle est devenue un outil important dans la prédiction des fluides et de processus de conception en raison de son coût minime comparé au travail expérimental. Elle est apparue au cours des dernières décennies, grâce à l'avènement de l'informatique et notamment du calcul scientifique. Par ailleurs l'évolution de simulation numérique est due à plusieurs facteurs tels que l'augmentation massive des capacités d'ordinateur et l'amélioration de code de calcul. Elle constitue désormais un outil supplémentaire, aux côtés de l'expérimentation et de la théorie dans certains problèmes particuliers.

Le problème de turbulence est loin d'être résolu en raison de la nature de l'écoulement turbulent. La non-régularité et l'aspect aléatoire ont un effet important dans la physique d'écoulement, leurs représentations mathématiques deviennent plus compliquées et difficiles à résoudre. C'est pourquoi beaucoup d'efforts ont été fait par la communauté scientifique pour comprendre et modéliser exactement la turbulence. Par contre il n'est pas possible d'avoir un modèle universel qui pourra faire face à toutes les caractéristiques turbulentes pour un temps CPU raisonnable. En raison des limites de la CFD (Computational Fluid Dynamics), l'industrie exige l'exactitude et non la perfection [1].

Ce mémoire décrit une méthodologie efficace pour prévoir les écoulements turbulents par la modélisation numérique, qui sont de grande importance dans beaucoup d'applications. En outre, l'intérêt de calculer les études de mouvement de fluide dans les conduites coudées ont permis d'évaluer le dépôt des particules.



Ce mémoire de fin d'étude est constitué d'une introduction générale, quatre chapitres et d'une conclusion générale. Il est organisé comme suite:

- Le premier chapitre est consacré à l'étude de synthèse bibliographique de certains travaux passés.
- Le deuxième chapitre offre une vue générale de la turbulence, la formulation mathématique d'équation moyennée de Navier Stokes et les modèles de turbulence utilisés dans cette étude, une stratégie décrivant la modélisation de zone près de parois.
- Le troisième chapitre comprend une description du cas étudié et les logiciels utilisés dans ce travail, le code de calcul Code\_Saturne, le logiciel de maillage grid mesh (GMSH) et les logiciels de post-traitement SALOME/PARAVIEW/ ENSIGHT.
- Et finalement, le quatrième chapitre est dédié les résultats obtenus et ses discussions.

L'objectif du présent travail est l'étude numérique à l'aide du code de calcul Code\_Saturne de l'écoulement turbulent tridimensionnel incompressible et sans transfert de chaleur dans une conduite coudée 90° pour étudier les paramètres dynamiques de l'écoulement. Principalement, nous voulons montrer l'influence de ces derniers sur la perturbation de l'écoulement dans la conduite coudée.

L'effet de la turbulence sur l'écoulement a été pris en compte en utilisant quelques modèles de turbulence comme  $R_{ij} - \epsilon$  SSG et  $k - \omega$  SST.

**CHAPITRE 01 :**  
**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

## 1.1 Synthèse bibliographique

### Introduction

Le phénomène de mouvement des écoulements turbulents (La dynamique des fluides), qui se trouve fréquemment dans la nature et actuellement dans toutes les applications industrielles, par exemple dans : l'écoulement du vent autour les bâtiments et les écoulements dans les turbomachines.....etc. Donc, pour l'étude des caractéristiques des écoulements, on présente dans ce chapitre une synthèse bibliographique qui contient plusieurs travaux effectués dans ce domaine.

**Guinn gerald et al [2]** ont examiné les phénomènes d'écoulement du liquide dans la cavitation des coudes, et ont présenté une description des processus d'écoulement surtout ceux qui influence sur la cavitation et les distorsions d'écoulement en aval. Ils ont observé que ces distorsions d'écoulement provenant du coude sont de nature oscillatoire et persistent à une grande distance en aval avec une forte dépendance aux conditions d'entrée.

**Spalding et al [3]** ont étudié la prévision de l'écoulement turbulent dans les coudes. Ils ont utilisé la procédure des différences-finies, le modèle de turbulence utilisé qui est constitué de deux équations différentielles, la première pour l'énergie cinétique de la turbulence et la deuxième pour son taux de dissipation. Il a prédit le développement de la totalité de vitesse d'écoulement dans un coude de 180° et comparés avec les résultats expérimentaux, aussi présente des prédictions des profils de vitesse entièrement développée pour tuyaux par rapport aux mesures expérimentales.

**Anand et al [4]** ont mené une étude expérimentale et numérique d'un écoulement turbulent pour caractériser la pénétration des aérosols dans les coudes (45°), pour un nombre de Reynolds entre 3200 et 19800. Les résultats obtenus montrent que le modèle est valable pour les angles des coudes de 45° à 180°.

**Yoon chung et al [5]** ont réalisé une simulation numérique directe pour un écoulement turbulent de la conduite à  $Re_{Dh} = 8900$ . L'accent principal est mis sur l'effet de courbure transversale et des structures turbulentes dans la paroi. Les résultats numériques obtenus montrent que les structures turbulentes près de la paroi externe sont plus efficaces que ceux près de la paroi intérieure, ce qui peut être attribuée à la différence de processus de régénération de vortex entre les parois.

**Frankel et al [6]** ont mené une étude d'un écoulement turbulent dans les vaisseaux sténosés. La modélisation est réalisée par l'approche moyenne de Navier Stokes (RANS). Les résultats numériques sont obtenus à l'aide du code commercial FLUENT. Quatre modèles de turbulence ont été utilisés pour étudier leur influence sur le résultat. Il a été constaté que le modèle de turbulence  $k-\omega$  à faible nombre de Reynolds était en bon accord avec les mesures expérimentales et est meilleur que le modèle RNG à haut nombre de Reynolds ou le modèle  $k-\epsilon$  de turbulence, en ce qui concerne la prédiction d'écoulement moyen, y compris les aspects du processus de tourbillon et le champ d'écoulement turbulent.

**Ruppel et al [7]** ont mené une étude sur le développement d'une nouvelle sonde de pression qui détecte la direction de l'écoulement. Deux pressions sont mesurées et combinées à un coefficient de pression qui est proportionnel à la direction de l'écoulement dans une gamme de  $\pm 20^\circ$ , la sonde appliquée génère l'écoulement dans un coude 90 degré, avec d'excellents résultats. Ils ont identifié la paire de vortex et sa désintégration en aval.

**Pruvost et al [8]** ont étudié une simulation numérique dans une conduite coudées à  $90^\circ$  et  $180^\circ$  pour comprendre l'effet de turbulence dans un écoulement de coude. Des simulations numériques montrent différentes structures d'écoulement. Ils ont utilisé le code FLUENT et les différents modèles de turbulence  $k-\epsilon$  et tension de Reynolds (RSM). Les résultats prouvent que la croissance des tourbillons des perturbations est proportionnelle avec l'augmentation de l'intensité du tourbillon.

**Munch et Metais [9]** ont présenté des simulations des grandes échelles d'écoulements turbulents compressibles tridimensionnels se développant dans des conduites coudées de section rectangulaire. Ces écoulements sont caractérisés par la présence de flux secondaires intenses et de structures turbulentes responsables des transferts de masse et thermique. Le but de leur travail est d'évaluer l'influence du rapport d'aspect de la section sur ce type d'écoulements. Les résultats montrent que ce paramètre modifie l'intensité et la localisation des tourbillons et donc indirectement modifie le transfert de chaleur lorsqu'un chauffage est appliqué sur la paroi.

Par une simulation numérique d'écoulement turbulent dans différentes configurations géométriques composées de coudes incurvés (coude en U, S), en 2007 **Rudolf et Desova [10]** faire une étude sur les principales caractéristiques de champ d'écoulement dans un conduit courbe. Ils ont modélisées la position spatiale d'angle droit et la section transversale circulaire pour un nombre de Reynolds égale 60000. Ils ont appliquée l'uniformité d'écoulement par deux paires de tourbillons contrarotatifs et le plus grand coefficient de courbe en S. Enfin, ils ont conclu que le mouvement des écoulements est un processus assez lent (tourbillon massif) et que le débit caractérisé par un grand écart de vitesse.

**El marjani et al [11]** ont étudié une méthode de prédiction numérique d'un écoulement turbulent anisotrope tridimensionnel pour un fluide incompressible dans une conduite à section carrée. Les équations de Reynolds moyennées (RANS) qui gouvernent cet écoulement sont discrétisées spatialement à l'aide de la méthode des volumes finis. Le modèle de turbulence utilisé dans cette étude est le modèle classique  $k-\epsilon$ . Pour un nombre de  $Re = 4800$ , plusieurs tests ont été réalisés. Pour comprendre bien cette simulation, ils ont comparé les résultats de résolution des équations de Reynolds moyennées avec ceux d'une base de données obtenue par la simulation numérique directe (DNS). Ils ont trouve que, le champ des vitesses obtenu avec le modèle  $k-\epsilon$  est en bon accord avec la DNS.

**Rütten et al [12]** ont effectué une simulation numérique des grandes échelles (LES) pour étudier les écoulements turbulents dans un coude à  $90^\circ$ . Un coude unique avec des rayons de courbure d'un et trois le diamètre de la conduite est considéré avec les nombres de Reynolds de 5000 à 27000. Les distributions des vitesses moyennes temporelles et les composantes des contraintes de Reynolds sont calculées numériquement. Les résultats montrent les spectres au plus haut niveau dans la gamme de fréquence élevée séparée qui est attribuée à la formation de tourbillons sur le côté intérieur sur le coude et de la couche de cisaillement. Lorsque le nombre de Reynolds est grand les spectres présentent une oscillation de fréquence beaucoup plus faible que celle observé dans la séparation vortex.

**Sushanta et al [13]** ont effectué une recherche expérimentale sur l'écoulement en aval d'un cylindre carré sous un angle d'incidence. Pour visualiser l'écoulement, ils ont utilisé la méthode de PIV. Le nombre de Reynolds a été pris au-delà de 410. Les angles de cylindre d'orientations sont : 0, 22.5, 30, et 45 respectivement. Ils ont montré dans ce travail que la forme et la taille de la bulle de recyclage en aval du cylindre, sont principalement en fonction des angles d'orientations. Ils ont observé un minimum sur le coefficient de trainée et un maximum sur le nombre de Strouhal à un angle d'orientation de 22,5 .

**Ming-liang et Yong-ming [14]** ont présenté une étude de simulation numérique, tridimensionnel pour le calcul de l'écoulement en coordonnées non-curvilignes. Ils ont utilisé les équations de Navier-Stokes moyennées (RANS) et le modèle de turbulence RNG. Avec la méthode de volume finis .Les résultats obtenus sont comparés avec les champs donnés. Cette étude démontre que le modèle de turbulence RNG  $k-\epsilon$  peut être utilisé pour analyser les structures d'écoulement, ce modèle est applicable à des problèmes réalistes.

**Bounif et al [15]** ont présenté un écoulement d'un fluide viscoélastique de PhanThien-Tanner s'écoulant dans une conduite coudée en U ( $180^\circ$ ) de section carrée. Les simulations produites pour des nombres de Dean allant de 50 à 300 mettent en évidence l'influence des forces d'inertie et des forces centrifuges sur le développement de l'écoulement principal et montrent la présence de zones de stabilité intermédiaires le long de la conduite courbe.

**Khezzar et al [16]** ont mené une étude numérique des écoulements laminaires et turbulents d'un fluide traversant un coude  $90^\circ$  et  $180^\circ$  de sections carrées, tridimensionnel. La structure de l'écoulement obtenu a présenté des caractéristiques intéressantes. Ils ont comparé la performance des trois différents modèles de turbulence le modèle standard  $k-$ , le modèle  $k-\omega$  SST et le modèle des contraintes de Reynolds (RSM). Les résultats montrent que le modèle à plusieurs équations a donné de meilleurs résultats que les deux autres modèles d'équations.

**Seungjin et al [17]** ont effectué un travail expérimental et numérique d'un écoulement turbulent dans une conduite coudée à  $90^\circ$ . En utilisant la simulation numérique à l'aide du logiciel

OpenFOAM et le modèle de turbulence RNG k- $\epsilon$  pour évaluer la dépendance de la recirculation après le coude. Il a été trouvé à partir de cette étude qu'il existe une forte similitude des profils de vitesse dans la gamme de nombre de Reynolds 50.000 à 200.000. Ils ont constaté que l'intensité de tourbillonnement définie en termes de superficie moyenne diminue de la vitesse tangentielle à long de l'écoulement après le coude et dissipe plus rapidement lorsque le rayon de courbure est plus grand du coude.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre ont été présentées une synthèse bibliographique de quelques chercheurs qui ont réalisé leurs études sur la dynamique du fluide dans les écoulements dans des conduites coudées. Ce qui a permis de bien situer la problématique du sujet.

**CHAPITRE 02 :**  
**APERÇU DE LA FORMULATION**  
**MATHEMATIQUE**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les modèles physiques utilisés dans l'étude des écoulements turbulents incompressibles. Après avoir rappelé les équations de base ainsi que les diverses modélisations possibles, nous présenterons quelques modèles de turbulence.

### 2.1 Généralité de la turbulence

Le phénomène de la turbulence peut être décrit l'irrégularité du mouvement d'un fluide caractérisé par la formation de tourbillons. Le mouvement est aléatoire, imprévisible.

O. Métais a défini la turbulence par rapport à quatre caractéristiques importantes [18] :

- Mise en jeu de phénomènes instationnaires ;
- Écoulement imprévisible d'un point de vue déterministe ;
- Mise en jeu d'une grande gamme d'échelles spatiales et temporelles ;
- Propriétés de mélange accrues par rapport à la diffusion moléculaire ;

On retrouve ces phénomènes dans plusieurs domaines, telles que dans les applications industrielles par exemple dans l'aéronautique, l'hydraulique, l'aérodynamique interne dans les moteurs, le génie des procédés. Aussi dans la nature ou l'environnement, comme l'astrophysiques (circulation gazeuse autour des planètes, gaz de la photosphère du Soleil), les écoulements géophysiques (vent atmosphérique, courant fluviaux) et les fluides biologiques (sang).

Certain de ces phénomènes sont complexes et demandent une résolution numérique des équations de Navier-Stokes moyennées, avec des modèles de turbulence sophistiqués. Bien que les méthodes de calcul soient de plus en plus performantes, l'usage de tels modèles n'est pas encore répandu, parce qu'il pose souvent des difficultés de mise en œuvre, mais aussi parce que l'effort à fournir est très important compte tenu de l'incertitude d'obtenir de réelles améliorations des prévisions, les performances pratiques de nombreux modèles étant peu connues [19].

Les inconnues des équations de Navier-Stokes sont des quantités instantanées et locales :  $u_j$ ,  $\rho$ ,  $p$ ,  $h$ . Pour connaître la nature laminaire ou turbulente de l'écoulement [20].

En 1883, le physicien irlandais Reynolds montre l'existence de deux types d'écoulements lors de l'écoulement d'un fluide dans une conduite cylindrique rectiligne : l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent. En utilisant divers fluides, à viscosité différente, en faisant varier le diamètre et la longueur de la canalisation, Reynolds a montré l'existence d'un nombre sans dimension, qui, suivant sa valeur, permet de déterminer le caractère laminaire ou turbulent du fluide [21], le nombre de Reynolds  $R_e$  est défini par l'équation (1):

$$R_e = \frac{\rho U L}{\mu} = \frac{U L}{\nu} \quad (1)$$

Il est exprimé en fonction d'une vitesse caractéristique de l'écoulement  $U$ , d'une dimension caractéristique de la géométrie  $L$ , de la densité du fluide  $\rho$  et de sa viscosité dynamique  $\mu$ . Les deux dernières quantités peuvent toutefois être combinées pour former la viscosité cinématique  $\nu = \mu/\rho$ .



Un faible nombre de Reynolds caractérise un écoulement laminaire. A l’opposé, un grand nombre de Reynolds, dénote son caractère turbulent. Entre ces deux extrêmes se trouve une zone de transition laminaire-turbulent, qui s’étend autour de valeurs dépendant de la géométrie considérée (de l’ordre de quelques milliers pour un écoulement entre deux plaques planes par exemple).

## **2.2 Les méthodes principales de calcul de la turbulence**

Il existe trois principales méthodes pour étudier numériquement la turbulence et qui sont :

La Simulation Numérique Directe (DNS), dans laquelle on cherche à représenter la totalité des phénomènes physiques, la Simulation des Grandes Echelles (LES), dans laquelle on représente seulement les plus gros tourbillons en fonction du temps, et la modélisation moyenne dans laquelle on représente seulement l’écoulement moyen [22].

### **2.2.1 La simulation numérique directe (Direct Numerical Simulation(D.N.S))**

Résoudre directement le système d’équations de Navier- Stokes instationnaires, tridimensionnelles par la voie numérique. Cette résolution consiste à faire un calcul direct du mouvement turbulent pour capturer toutes les échelles, notamment les plus petites (les échelles dissipatives), et faire ensuite un traitement statistique sur les solutions obtenues. Actuellement, les simulations numériques directes sont limitées aux cas simples avec des nombres de Reynolds relativement modestes. Malgré leur nombre assez limité, les simulations numériques directes permettent cependant d’apporter des indications intéressantes quant à la validité des modèles de turbulence existants.

### **2.2.2 La simulation des grandes échelles (Large Eddy Simulation(L.E.S))**

La LES résout les équations pour les grandes échelles de l’écoulement en ne modélisant que les mouvements à petites échelles. Le temps de calcul est significatif, mais cette technique de calcul est moins onéreuse que la DNS. L’idée maitresse de ces simulations est d’identifier, par la résolution directe, les caractéristiques de grande taille de l’écoulement en modélisant que des mouvements de petite échelle. Pour tenir compte des phénomènes de taille inférieure à celle de maille, il faut utiliser un modèle de sous maille, le plus couramment utilisé est celle de Smagorinsky en 1963, qui repose sur une hypothèse de longueur de mélange. La méthode LES nécessite l’emploi des techniques numériques très précises, sans viscosité numérique et sans dissipation [23].

### **2.2.3 La modélisation (moyenne de Reynolds) des équations de Navier- Stokes (RANS)**

Cette méthode est basée sur l’approche moyennée des équations de Navier Stokes. Les équations moyennées de Navier-Stokes (RANS) représentent les équations de transport pour les grandeurs moyennes de l’écoulement seulement, avec une modélisation de toutes les échelles de turbulence. Les termes faisant intervenir les fluctuations sont soit modélisés, soit calculés en

utilisant des équations de transport. Les termes inconnus supplémentaires introduits doivent être modélisés pour assurer la fermeture du système [24].

Ce type d'approche (RANS) est couramment utilisé pour des applications industrielles à cause de son faible coût de calcul et de l'adéquation entre le niveau d'approximation et les résultats attendus. RANS est obtenue en moyennant en temps la continuité et les équations de Navier-Stokes régissant l'écoulement incompressible visqueux [1].

Dans le cas d'un fluide incompressible, les équations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement s'écrivent [25]:

Equation de continuité (conservation de la masse) :

$$\frac{\partial \rho U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

Equations de quantité de mouvement (Navier Stokes) :

$$\underbrace{\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j)}_1 = - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial x_i}}_2 + \underbrace{\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}}_3 + \underbrace{\rho g_i}_4 \quad (3)$$

1 : terme convectif.

2 : effet de la pression.

3 : terme diffusif.

4 : effet de la pesanteur (le terme est négligeable dans notre cas).

Pour résoudre ce système une approche statistique est utilisée. Les grandeurs caractéristiques instantanées de l'écoulement turbulent seront décomposées selon les règles de Reynolds comme suit [26]:

Le premier représente le mouvement moyen et le second le mouvement fluctuant, soit :

$$U_i = \bar{U}_i + u_i \quad \bar{u} = 0$$

$$P = \bar{P} + p \quad \bar{p} = 0$$

La moyenne de l'équation de continuité et celles de Navier-Stokes s'écrit [25] :

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = 0 \quad , \text{ (L'équation du champ moyen)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_i \bar{U}_j)}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \underbrace{\overline{u_i \cdot u_j}}_{\text{terme de Reynolds}} \right) \quad (5)$$

sont des équations de Reynolds. Elles ne diffèrent des équations de Navier-Stokes que par les termes  $-\overline{u_i \cdot u_j}$ , regroupés dans le membre droite avec les contraintes.

### 2.3 Les modèles de turbulence

Le système des équations moyennes d'écoulement (5), n'est pas fermée en raison des 6 inconnus supplémentaires qui ont tenseurs de Reynolds  $-\overline{u_i \cdot u_j}$ , qui ont besoins d'être modélisés. Celles-ci posent un problème dans la résolution des équations gouvernantes et pour résoudre ce

système, on passe par des "modèles de turbulence". Les trois modèles utilisés pour ce projet sont le modèle ( $R_{ij} - \varepsilon$  SSG), modèle ( $RNG k - \varepsilon$ ) et le modèle ( $k - \omega$  SST).

### 2.3.1 Le modèle de turbulence $R_{ij} - \varepsilon$ SSG (Speziale, Sarkar & Gatski) [27]

En 1991 Speziale et al. Proposent un modèle à élève nombres de Reynolds. En 1995 Chen à étendu ce modèle à bas Reynolds. Il s'agit de résoudre des équations de la forme suivante:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \overline{u_i u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_k} d_{ijk} + \rho (P_{ij} + \Phi_{ij} - \epsilon_{ij}) \quad (6)$$

Où les termes de corrélation pression-déformation ( $\Phi_{ij}$ ), de diffusion ( $d_{ijk}$ ) et de dissipation ( $\epsilon_{ij}$ ) seront modélisés, et les termes de production ( $P_{ij}$ ) et d'advection sont exacts. La diffusion est approximée par l'hypothèse de gradient de diffusion généralisé (GGDH=generalised gradient diffusion hypothesis) :

$$d_{ijk} = \left( \mu \delta_{kl} + C_s \frac{\rho k}{\epsilon} \overline{u_l u_j} \right) \frac{\partial}{\partial x_l} (\overline{u_i u_j}) \quad (7)$$

Avec  $C_s = 0.22$ . Quant à la dissipation, elle est exprimée par :

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \epsilon \delta_{ij} \quad (8)$$

La fermeture nécessite alors une équation de  $\epsilon$ . Le terme de pression-déformation est décomposé en terme lent (terme de retour à l'isotropie), terme rapide, et terme de paroi :

$$\Phi_{ij} = \Phi_{ij}^{(1)} + \Phi_{ij}^{(2)} + \Phi_{ij}^{(\omega)}$$

$$\frac{\Phi_{ij}^{(1)}}{\epsilon} = -C_1 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{C_1} \right) f_\omega \right] a - C'_1 (1 - f_\omega) \left( a^2 - \frac{1}{3} a_2 I \right) \quad (9)$$

$$\frac{\Phi_{ij}^{(2)}}{\epsilon} = C_{01} \left( \mathbf{S} - \frac{1}{3} S_1 \mathbf{I} \right) + C_{11} \left( \mathbf{S} \mathbf{a} + \mathbf{a} \mathbf{S} - \frac{2}{3} \{ a S \} I \right) + C_{12} (\mathbf{W} \mathbf{a} - \mathbf{a} \mathbf{W}) \quad (10)$$

$$\Phi_{ij}^{(\omega)} = f_\omega \left\{ 0.45 \left[ \mathbf{P} - \frac{2}{3} P I \right] - 0.03 \left[ \mathbf{Q} - \frac{2}{3} P I \right] + 0.08 k (2S) \right\} \quad (11)$$

$$\mathbf{P} = P_{ij} = - \left( \overline{u_l u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_l u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right) \quad (12)$$

$$\mathbf{Q} = Q_{ij} = - \left( \overline{u_l u_k} \frac{\partial U_K}{\partial x_j} + \overline{u_l u_k} \frac{\partial U_K}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

Avec :

$$C_1 = 1.7 + 0.9 \frac{P}{\epsilon} ;$$

$$C'_1 = -1.05 ;$$

$$C_{01} = 0.8 - 0.65 a_2^{1/2} ;$$

$$C_{11} = 0.625 ;$$

$$C_{12} = 0.2 ;$$

$$f_\omega = \exp \left[ - \left( 0.0184 \frac{\sqrt{ky}}{v} \right)^4 \right] ;$$

Les lettres en gras représentent des tenseurs:  $\mathbf{a} = a_{ij}$ ,  $\mathbf{I} = \delta_{ij}$ . Les symboles  $a_2, S_1, S_2$  et  $P$  sont des contractions des tenseurs associés :  $P = \frac{1}{2}P_{ii}$  ou  $P = \frac{1}{2}\sqrt{P_{ij}P_{ij}}$ ,  $a_2 = a_{ij}a_{ji}$ ,  $S_1 = S_{kk}$ ,  $S_2 = S_{ij}S_{ji}$ .

L'effet de la fonction d'amortissement s'atténue exponentiellement en s'éloignant de la surface solide, avec  $\Phi_{ij}^\omega = 0$  dans les régions pleinement turbulentes ; et on retrouve le modèle SSG à haut Reynolds dans le champ lointain.

En ce qui concerne la dissipation  $\epsilon$ , son équation s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (U_k \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} d_k^{(\epsilon)} + [C_{\epsilon 1}(1 + C_{\epsilon 4} f_\omega) \rho - C_{\epsilon 2} f_\epsilon \epsilon] \frac{\epsilon}{k} + \xi \quad (14)$$

Où :

$$d_k^{(\epsilon)} = \left( \nu \delta_{kl} + C_\epsilon \frac{k}{\epsilon} \overline{u_l u_l} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_l}$$

$$f_\epsilon = 1 - \frac{2}{9} \exp \left[ \left( \frac{R_t}{6} \right)^2 \right]$$

$$\xi = \left[ \left( -2 + \frac{7}{9} C_{\epsilon 2} \right) \frac{\epsilon \epsilon}{k} - \frac{\epsilon^2}{2k} \right] f_\omega$$

$$R_t = \frac{k^2}{\nu \epsilon} \quad \epsilon = \epsilon - 2 \frac{\nu k}{y^2}$$

Et les coefficients :  $(C_\epsilon, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\epsilon 4}) = (0.15, 1.35, 1.8, 1.0)$

### 2.3.2 Le modèle de turbulence SST k- $\omega$ (Shear Stress Transport)

Le modèle SST combine les avantages du modèle k- $\epsilon$  et k- $\omega$  pour parvenir à une formulation du modèle optimal pour un large éventail d'applications [28].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_i)}{\partial x_i} = \overline{P_k} - \beta \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega U_i)}{\partial x_j} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

Où la fonction de fusion  $F_1$  est définie par :

$$F_1 = \tan \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta \omega y}, \frac{5.00 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \quad (16)$$

Avec  $CD_{k\omega} = \max \left( 2 \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$ , et  $y$  est la distance la plus proche à la paroi.

$F_1$  est égal à zéro à distance de la surface (modèle k- $\epsilon$ ), et commute pour un intérieur de la couche limite (modèle k- $\omega$ ).

La viscosité turbulente est définie comme suit :

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (17)$$

Où  $S$  est la mesure invariante de la vitesse de déformation et  $F_2$  est une deuxième fonction de fusion définie par :

$$F_2 = \tan \left[ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta \omega y}, \frac{5.00 v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (18)$$

Un limiteur de production est utilisé dans le modèle  $k-\omega$  SST pour prévenir l'accumulation de la turbulence dans les régions de stagnation :

$$P_k = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \rightarrow \overline{P_k} = \min (P_k, 10. \beta \rho k \omega) \quad (19)$$

Les constantes du modèle SST ont pour valeur, Tab. 1.

**Tableau 1- Valeurs des constantes du modèle SST**

$\beta$	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\sigma_{k1}$	$\sigma_{\omega 1}$	$\alpha_2$	$\beta_2$	$\sigma_{k2}$	$\sigma_{\omega 2}$
0.09	$\frac{5}{9}$	$\frac{3}{40}$	0.85	0.5	0.44	0.0828	1	0.856

Avec :  $\alpha = \alpha_1 F + \alpha_2 (1 - F)$

Ce modèle a un avantage majeur: il peut traiter indifféremment des maillages bas et haut Reynolds. Ceci est très attrayant pour les configurations industrielles dans lesquelles on maîtrise difficilement les raffinements à la paroi [29].

### 2.3.3 Le modèle de turbulence RNG $k - \varepsilon$ [30]

Le modèle proposé par Orszag. La viscosité turbulente effective intervenant dans les équations de Navier-Stokes est représentée sous forme d'une somme des deux viscosités laminaire et turbulente, définie par :  $\mu = \mu_l + \mu_t$ , avec  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  la viscosité turbulente,  $\mu_l$  la viscosité laminaire,  $k$  l'énergie cinétique turbulente par unité de masse,  $\varepsilon$  la dissipation turbulente par unité de masse et  $C_\mu$  est une constante empirique qui vaut 0.085 dans notre cas. Ils ont rappelant les équations du transport des quantités et à résoudre :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \text{div} \left[ \rho \underline{u} k - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \underline{\text{grad}} k \right] = p - \rho \varepsilon + k \text{div}(\rho \underline{u}) \quad (20)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \text{div} \left[ \rho \underline{u} \varepsilon - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \underline{\text{grad}} \varepsilon \right] = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} p - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \varepsilon \text{div}(\rho \underline{u}) \quad (21)$$

$p$  est le terme de production par cisaillement moyen :

$$p = 2\mu_t S_{ij}^2 - \frac{2}{3} (\text{div} \underline{u})^2 - \frac{2}{3} k \text{div} \underline{u} \quad (22)$$

$S_{ij}$  Représente le tenseur de déformation.

Cette version se différencie de la version standard du modèle  $k - \varepsilon$  par la valeur du coefficient

$C_{\varepsilon 2}$  : ce dernier est considéré constant dans la version standard ( $C_{\varepsilon 2 \text{ standard}} = 1.62$ ), alors que dans la version *RNG* il est variable dans l'espace :

$$C_{\varepsilon 2} = C_{\varepsilon 2 \text{ standard}} + \frac{C_\mu \lambda^3 (1 - \frac{\lambda}{\lambda_0})}{1 + \beta \lambda^3}, \quad \lambda = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

On donne ici les valeurs des autres coefficients de fermeture intervenant dans les équations de transport de  $k$  et  $\varepsilon$  :

$$\sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon 1} = 1.4, \lambda_0 = 4.38, \beta = 0.012.$$

## 2.4 Méthode numérique

Lors d'études numériques en mécanique des fluides, ce sont les équations de Navier Stokes qui sont modélisées. De nombreuses méthodes existent pour résoudre ces équations à l'aide de techniques numériques.

Les méthodes numériques les plus utilisées sont :

- La méthode des différences finis.
- La méthode des éléments finis.
- La méthode des volumes finis.

Dans ce cas nous avons choisi la méthode des volumes finis, pour la résolution des différents termes intervenant dans les équations de Navier Stokes.

### 2.4.1 La méthode des volumes finis

Cette méthode est très utilisée dans les calculs numériques pour traiter des problèmes complexes notamment tridimensionnels. Ces méthodes ont été parmi les premières à atteindre un stade de développement avancé pour les calculs d'écoulements stationnaires et instationnaires. Elles ont permis une prise en compte complète des effets de non linéarité et de compressibilité ainsi que les effets de viscosité à l'aide des équations de Navier-Stokes, et de turbulence [31].

La méthode consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes, où chaque volume entoure un nœud. En utilisant différents schémas d'approximations on peut intégrer les termes des équations différentielles modélisant sur chaque volume de contrôle, où les valeurs et les quantités sont stockées aux nœuds du volume de contrôle [32].

Soit le problème de transport de la variable  $\Phi$  par diffusion régi par l'équation suivante [31] :

$$\text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S_{\Phi} = 0 \quad (23)$$

Où :

$\Gamma$  : Le coefficient de diffusion

$S$  : le terme source.

L'intégration de l'équation (23) sur le volume de contrôle de centre  $P$  donne [31]:

$$\int_{VC} \frac{d}{dx} \left( \Gamma \frac{d\Phi}{dx} \right) dv + \int_{VC} S dv = 0 \quad (24)$$

En général, la forme linéaire du terme source est :

$$\bar{S} V = S_u + S_p \Phi_p \quad (25)$$

### Conclusion

Pour faire une étude numérique d'écoulement incompressible turbulent par la modélisation d'équations moyennées de Reynolds (RANS), on peut utiliser plusieurs modèles de turbulence comme  $R_{ij} - \varepsilon$  SSG, RNG  $k - \varepsilon$ ,  $k-\omega$  SST pour résoudre cette l'équation.

# **CHAPITRE 03 :**

## **ÉTUDE DU CAS**

## Introduction

Ce chapitre est consacré à la conception de la géométrie du cas étudié, ce dernier est sous forme d'une conduite coudée à  $90^\circ$ . En plus de la génération du maillage, une présentation des outils numérique utilisés dans ce travail est donnée tel-que GMSH, Code\_Saturne et SALOME/ENSIGHT

### 3.1 Description du cas étudié

Dans ce cas, se présente une étude numérique pour montrer le développement d'écoulement dans une conduite coudée à  $90^\circ$  avec une section circulaire constante. Cet écoulement incompressible se fait en régime turbulent, sans transfert de chaleur.

La conduite coudée de diamètre  $D$ , est composé d'une section longitudinale de longueur  $L$  ( $L=2D, 4D, 8D, 16D, \dots$ ) qui est montée à l'entrée du coude  $90^\circ$ .

La sortie est prolongée en ajoutant un tube droit vertical avec une longueur de  $4D$ . Comme présenté dans la figure 1.

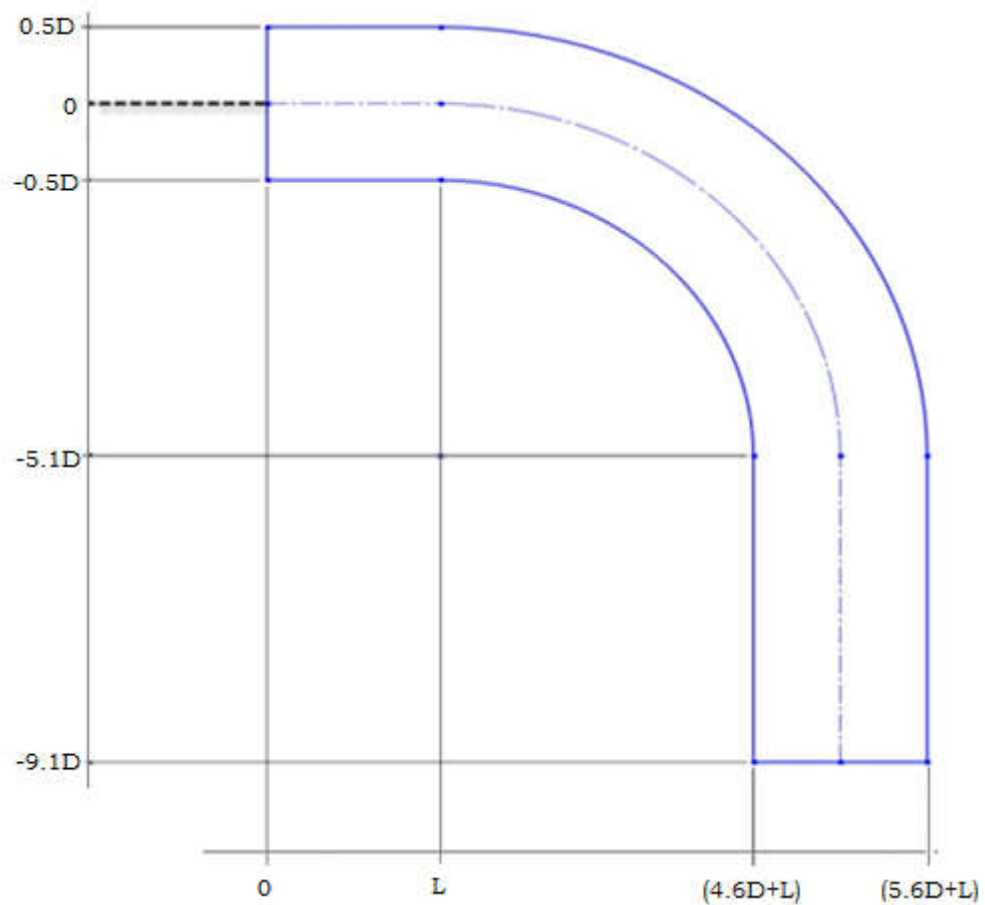
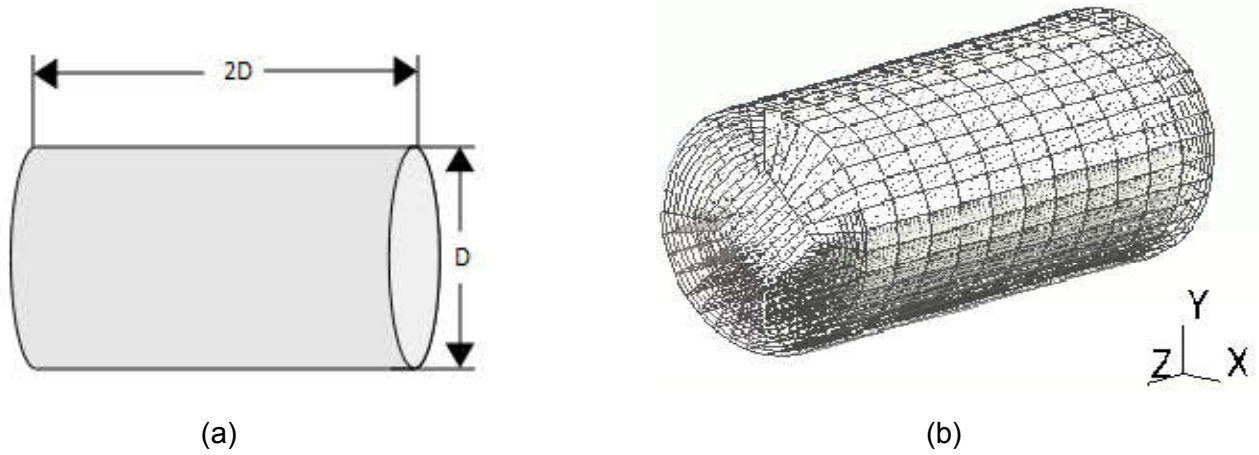


Fig.1- La géométrie de la conduite coudée à  $90^\circ$ .

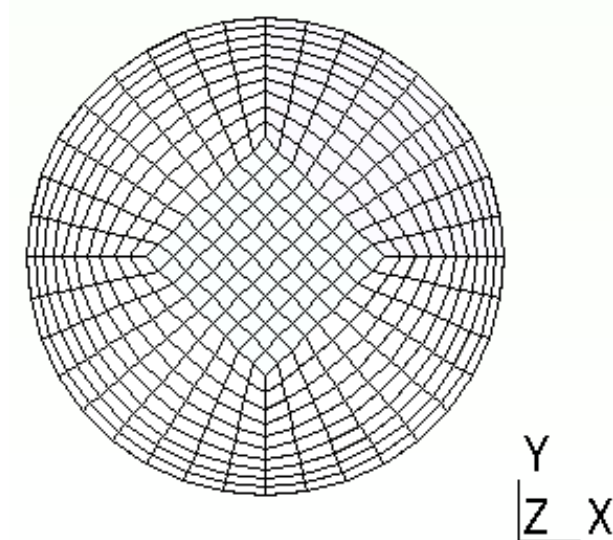


Pour le choix de la section transversale d'écoulement un test de sensibilité du maillage avec une comparaison de trois grilles (grossie, moyen, fin) a été réalisé. Pour ce test on a procédé une étude numérique dans un tube 2D (fig2), avec une variation de raffinement de maillage à l'intérieur de ce tube (proche de paroi), pour définir le meilleur maillage à utiliser pour les prochains calculs.

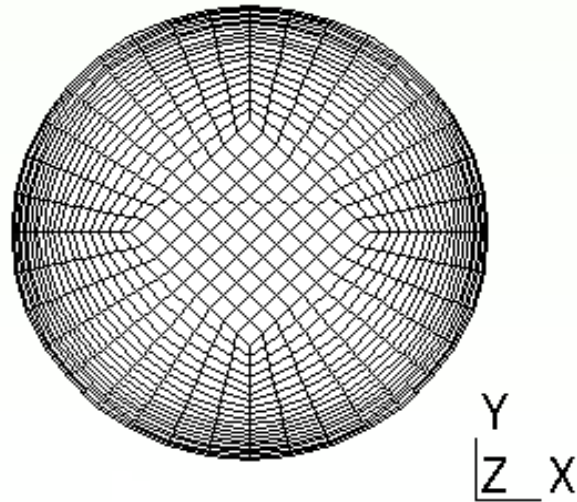


**Fig.2- (a) La géométrie du tube, (b) Le maillage de tube.**

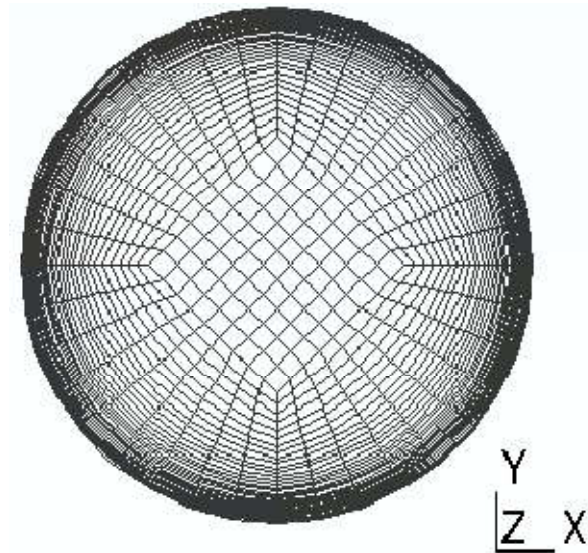
Les figures suivantes (3,4 et 5) montrent les différentes sections transversales avec variation de raffinement.



**Fig.3- Section transversale avec un maillage grossier.**



**Fig.4- Sections transversales avec un maillage moyenne.**



**Fig.5- Section transversale avec un maillage très raffiné (fin).**

Pour avoir un profil de vitesse pleinement développé et éviter l'utilisation des données artificielles à l'entrée qui répondent partiellement aux exigences physiques, on a étudié l'influence de la distance  $L$  de la conduite avant l'entrée du coude avec ( $L=2D, 4D, 8D, 16D$ ).

La longueur du tube est prolongé à l'avant de la conduite coudée avec le même diamètre  $D$ , pour obtenir un écoulement pleinement développé. Les différentes géométries du tube sont représentées sur la figure 6.

Les résultats obtenus assure que les conditions à l'entrée du coude sont physiquement correctes. Dans un nombre de Reynolds est égal 10000.

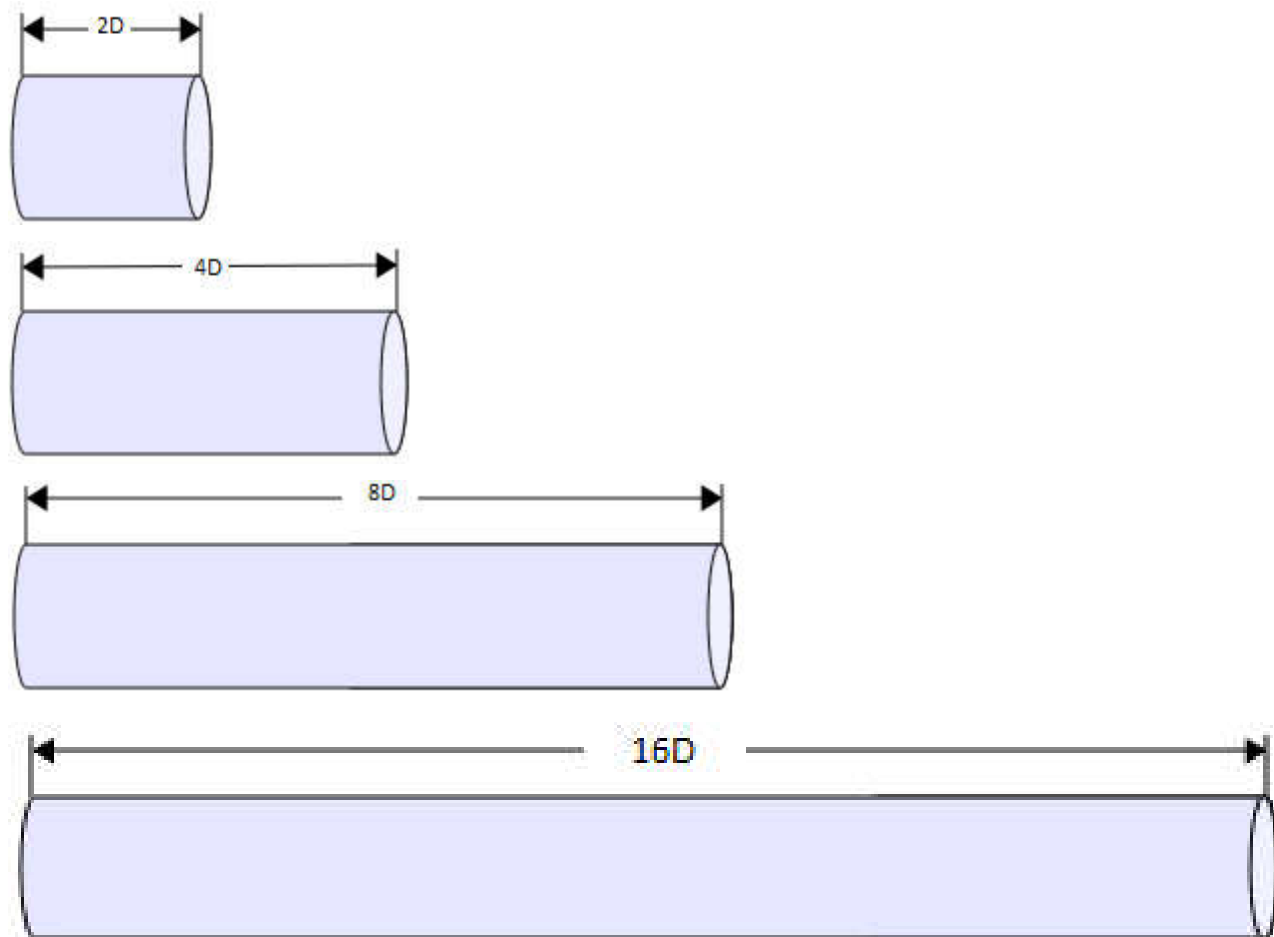


Fig.6- Les différentes géométries du tube.

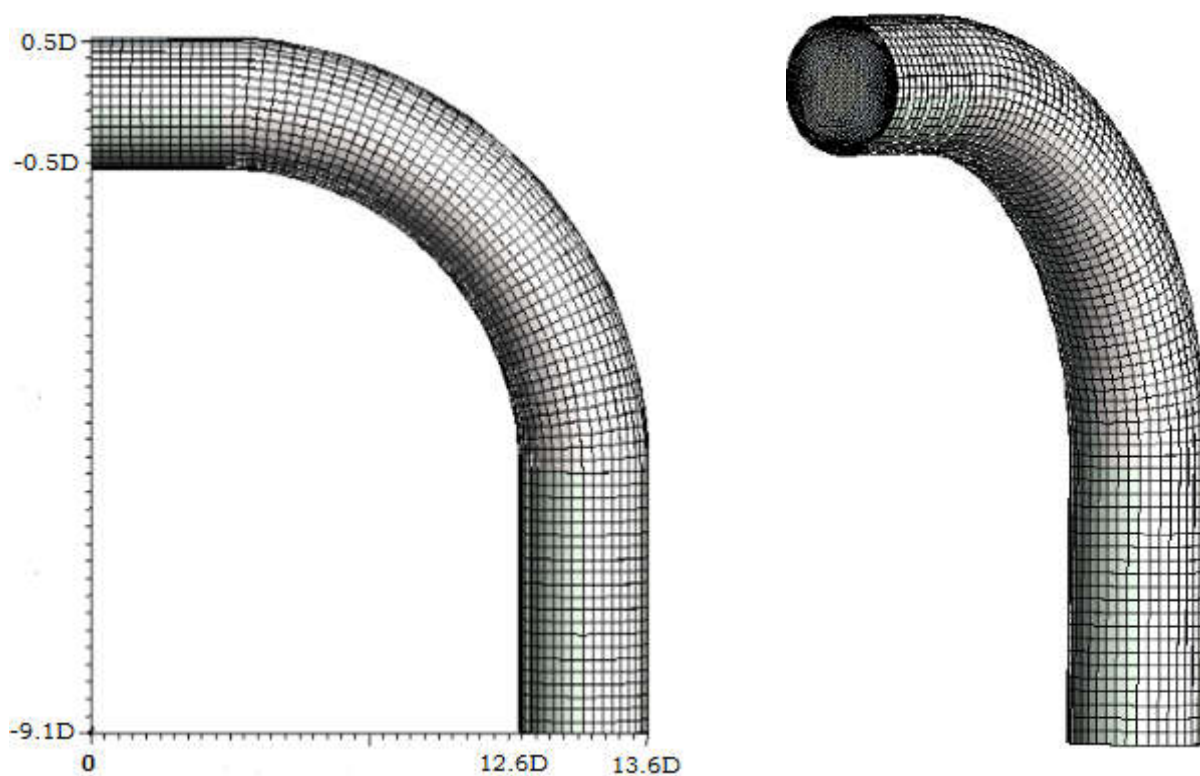


Fig.7- Grille de calcul de la conduite coudée de section circulaire de longueur  $L=8D$ .

La grille utilisée ici pour le calcul (conduite coudée de  $90^\circ$  de la longueur  $L=8D$ ) contient approximativement 181900 cellules et la section transversale est de 1700 cellules comme représenté sur la figure 7.

### 3.2 Résolution Numérique

La génération du maillage est réalisée par le logiciel GMSH. Pour le lancement de calcul (résolution des équations algébriques) on a employé le code de calcul Code\_Saturne. Finalement pour le traitement des résultats, on a utilisé le logiciel Salome et aussi Paraview/EnSight, ces logiciels sont gratuits (open source sous Linux).

#### 3.2.1 Présentation du maillage 'Grid Mesh' ou GMSH [33]

Ce logiciel est un générateur de maillage afin d'être utilisé ensuite par un logiciel de traitement (Fluent, Code\_Saturne, OpenFoam...), il permet de créer des géométries simples ou complexes (1D, 2D et 3D). Il est rapide et facile à utiliser (En utilisant des segments de ligne, les triangles et les tétraèdres). Les formats des fichiers du GMSH sont le format mesh (.msh) et le format universel (.unv).

GMSH possède une interface simple, proposant initialement quatre modules, une fenêtre principale présentée à la figure ci-dessous (Fig.8).

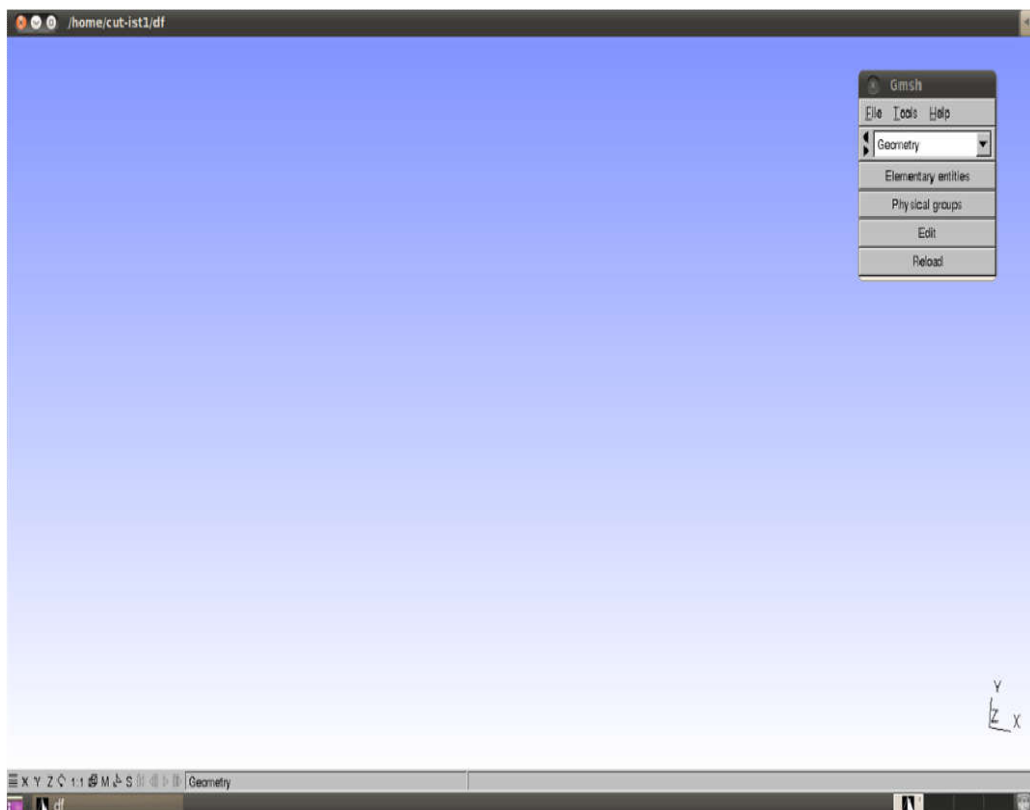


Fig.8- Fenêtre principale de Gmsh.

### - Le module geometry

Sont créés dans un flux ascendant en définissant successivement points, lignes orientées (segments de ligne, les triangles et les tétraèdres), surfaces orientées (raboter les surfaces, les surfaces réglées, les surfaces triangulées,...) et volume. Les groupes composés d'entités géométriques peuvent être définis, basé sur ces entités géométriques élémentaires. Langage de script de GMSH permet à toutes les entités géométriques d'être entièrement paramétrable.

### - Le module mesh

Une fois la surface géométrique définie, on va générer le maillage. Pour cela, on choisit le module mesh grâce à la liste de sélection. À partir de ce menu, on peut mailler les contours, surfaces et volumes par la précision d'ordre d'approximation des éléments finis, effectuer des opérations de partitionnement, de raffinement et d'homogénéisation des mailles. C'est ici également que l'on va sauvegarder le maillage au format msh.

### - Le module solver

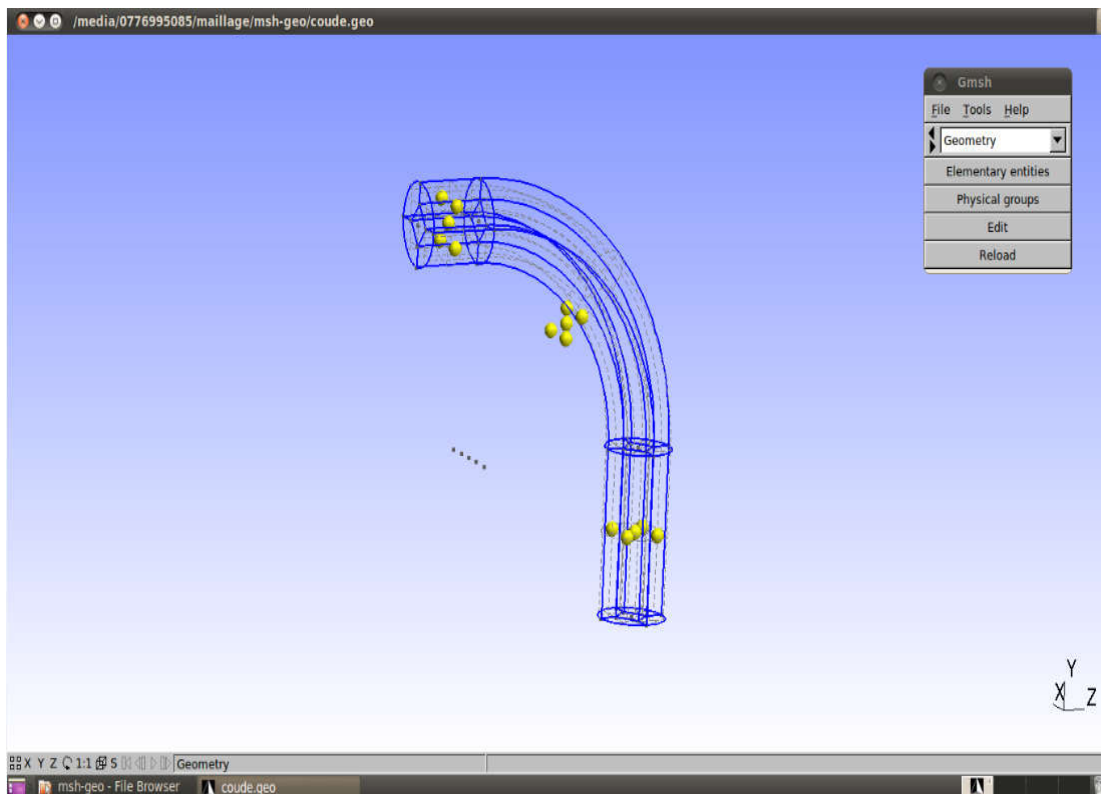
GMSH peut être interfacé avec un solveur C++ (un langage de programmation). Pour cela, il suffit d'inclure GmshSocket. dans le code. 5 solveurs peuvent être interfacés simultanément avec Gmsh.

### - Le module post-processing

Comme nous l'avons vu en présentant le format msh, il existe la possibilité de tracer des données à condition qu'elles soient données dans le bon format. Le module post-processing permet de tracer ces données et de les visualiser dans l'interface de Gmsh.

## 3.2.2 La géométrie

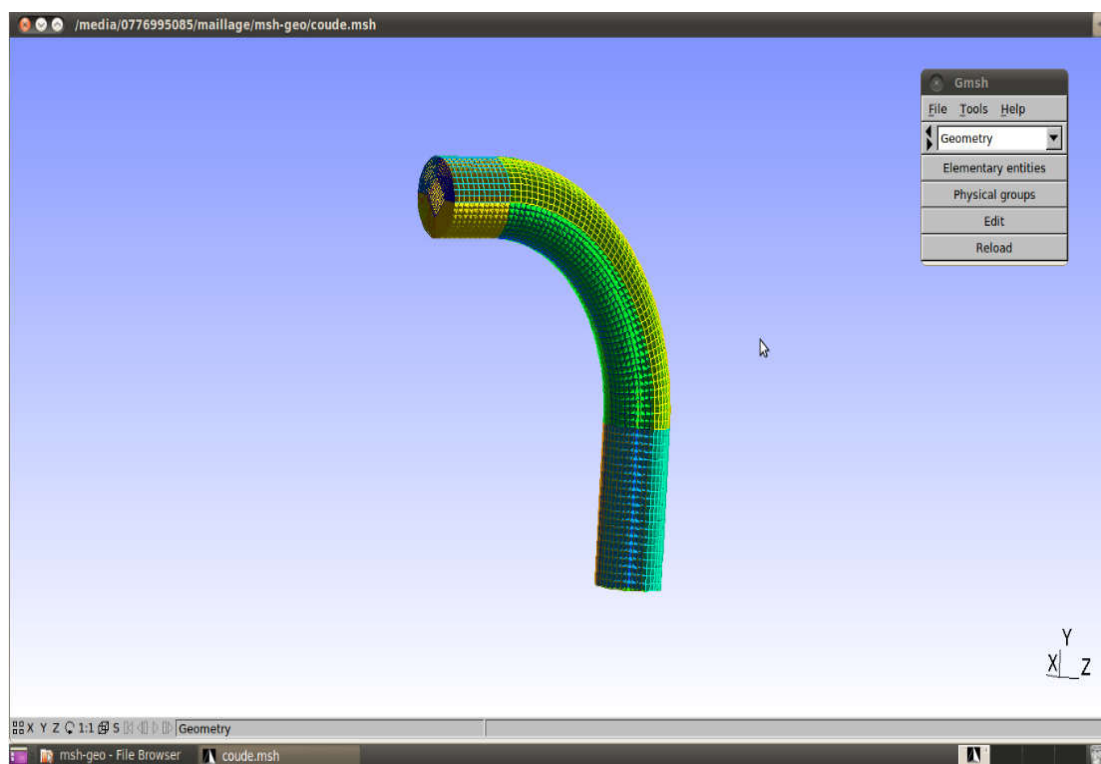
A l'aide du module géométrie, on va créer la géométrie conduite coudée à 90° qui se compose de trois parties, tube horizontal 2D, coude à 90° et l'autre vertical sa longueur est de 4D et de même diamètre. La géométrie créée est présentée ci-dessous (Fig.9).



**Fig.9- La géométrie du conduite coudée.**

### 3.2.3 La génération du maillage

Après la création de la géométrie nous générons le maillage avec le module mech (Fig.10).



**Fig.10- La génération du maillage de la conduite coudée à 90° 3D.**

Enfin, on définit les conditions aux limites à l'aide de la commande 'physical groupe'. Cette commande permet de définir les caractéristiques physiques et dans des régions spécifiques du modèle de simulation: wall (paroi), outlet (l'écoulement sortant), inlet (l'écoulement entrant).

### 3.2.4 Présentation de code de calcul Code \_ Saturne

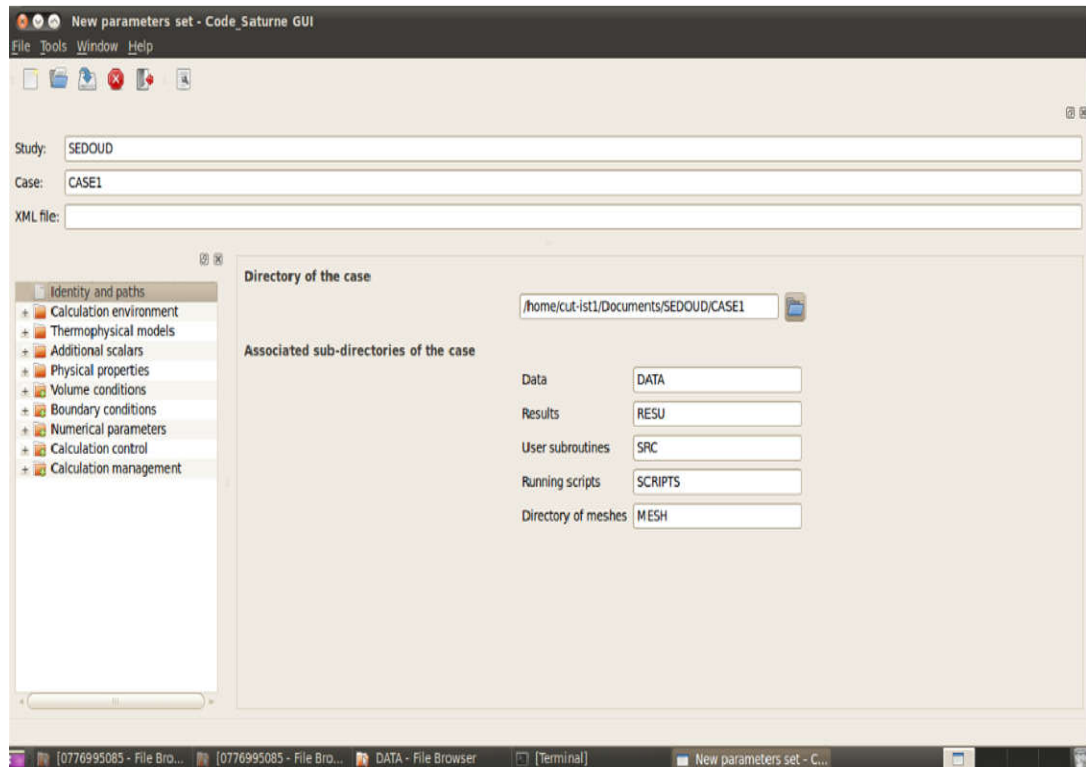
Code\_Saturne est un logiciel utilisé pour les calculs numériques dans le domaine de la mécanique des fluides. Code\_Saturne est développé par Electricité de France (EDF). Il résout les équations moyennées Navier-Stokes et est basé sur une approche volumes finis pour les différents types d'écoulements (laminaire ou turbulent, Incompressible, isotherme ...etc.). Plusieurs modèles de turbulence sont disponibles dans ce logiciel (Longueur de mélange, k-epsilon, k-Omega SST, Rij-epsilon standard (LRR), Rij-epsilon (SSG), LES (Dynamique), ...etc.) et d'autres différents modules physiques (écoulements atmosphériques, les arcs électriques,...etc.)[34].

Code\_Saturne accepte tous les types de maillages (Des mailles structurées, non structurées, hybrides, conformes, non conformes, ...) et contenant tout type d'élément (tétraèdre, hexaèdre, pyramide, polyèdre quelconque, ...).

Les formats des générateurs de la maille compatibles pris en charge comprennent [35] :

- SALOME SMES ;
- I-DEAS Nx ;
- GMSH ;
- Gambit (Fluent) ;
- SIMAIL Harpoon ;
- ICEM-CFD ;
- Star-CCM+;

La figure 11, ci-dessus représente l'interface graphique de Code \_ Saturne.



**Fig.11- Interface graphique de Code\_Saturne.**

### 3.2.5 Logiciel SALOME [36]

SALOME est un logiciel open-source qui fournit une plate-forme générique pour pré/post-traitement en simulation numérique développé entre autre par EDF (Électricité de France) et le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives). Il est basé sur une architecture ouverte et flexible.

SALOME peut-être installé sur plusieurs plateformes. Il peut être utilisé comme application autonome pour la génération de modèle CAO (conception assistée par ordinateur), de leur maillage et du post-traitement des résultats de calcul.

Ses fonctionnalités:

- Import/export de géométries, réparer/nettoyer, créer/modifier des géométries;
- Mailler des éléments géométriques;
- Manipuler des propriétés physiques ou numériques d'éléments géométriques;
- La supervision des workflows de calcul;
- La capacité à intégrer des solveurs spécifiques;
- Visualiser/post-traiter les champs résultats;

Deux interfaces sont systématiquement fournies:

- Une scène graphique 3D,
- Une interface texte basée sur le langage Python (programmation).



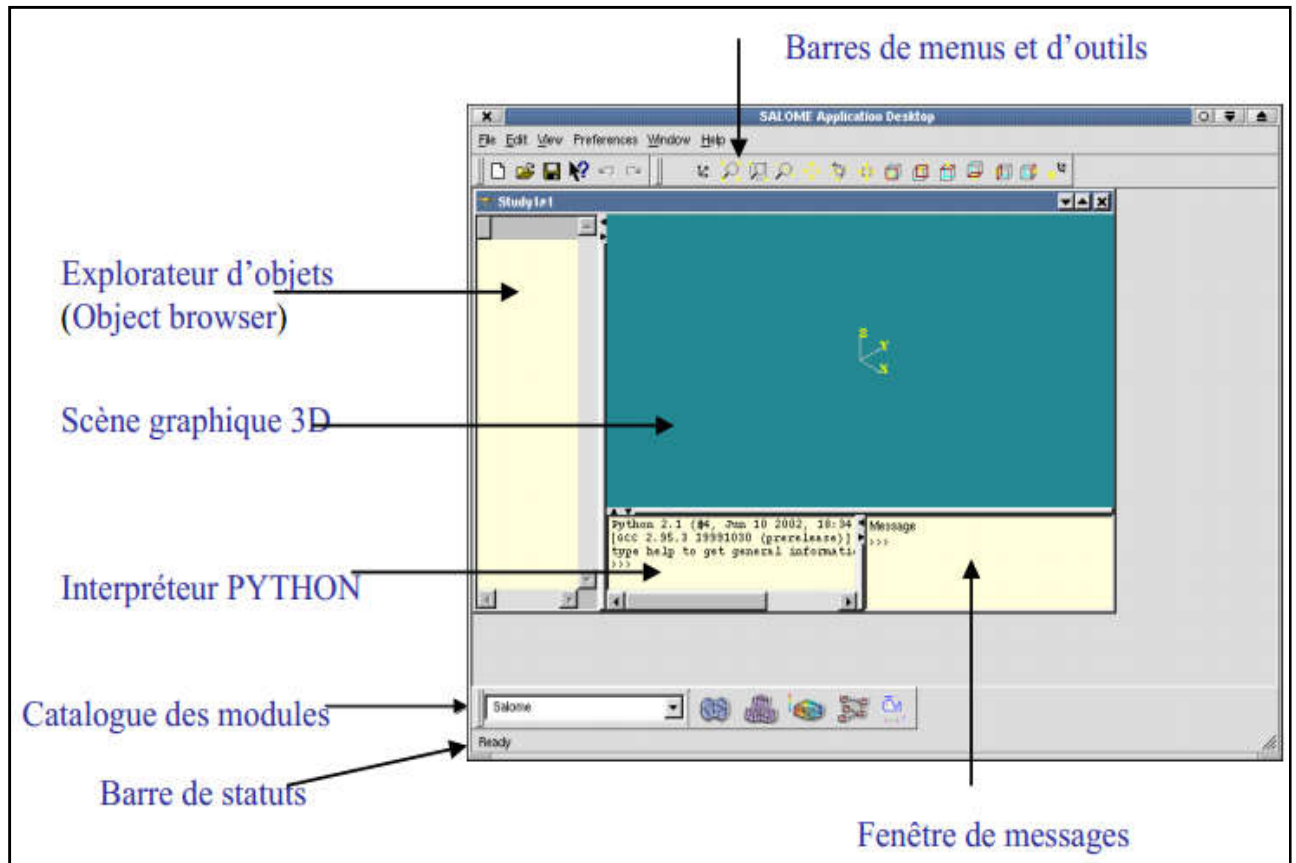


Fig.12- Plate-forme SALOME [37].

## Conclusion

Dans ce chapitre on a montré une description du cas étudié et ses différentes caractéristiques. Par la suite on a présenté les logiciels utilisés pour ce travail afin de réaliser notre étude numérique.

# **CHAPITRE 04 :**

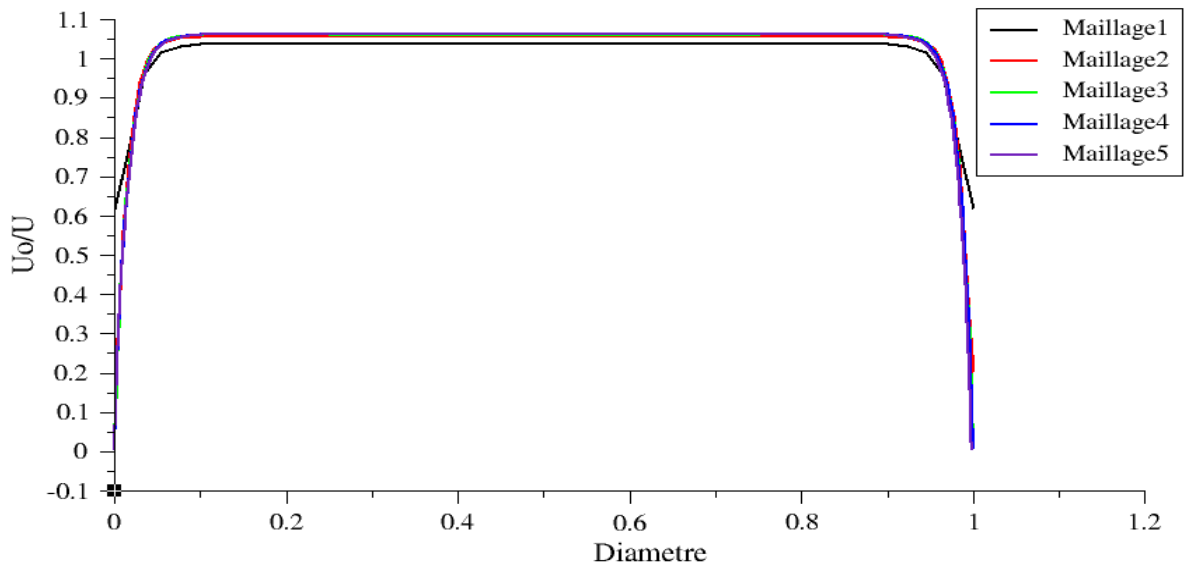
# **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

## Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse et discussion des résultats obtenus par la modélisation numérique d'un écoulement turbulent incompressible dans une conduite coudée circulaire, avec haut nombre de Reynolds  $Re = 10000$ , Et cela en comparaison avec les données numériques (LES Berrouk [38]).

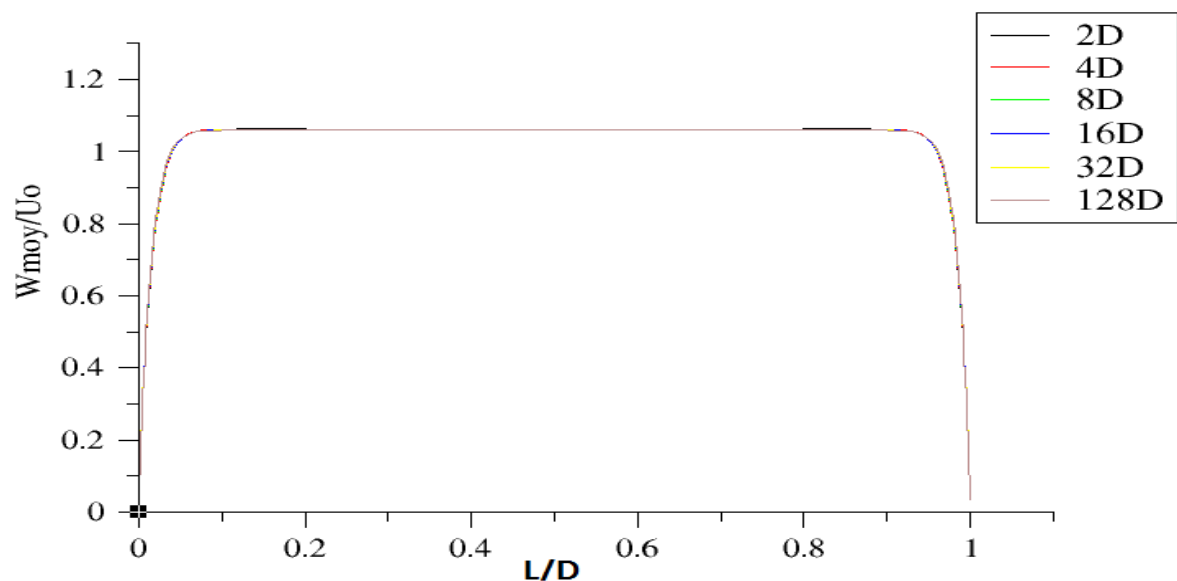
### 4.1 Analyse et discussion des résultats

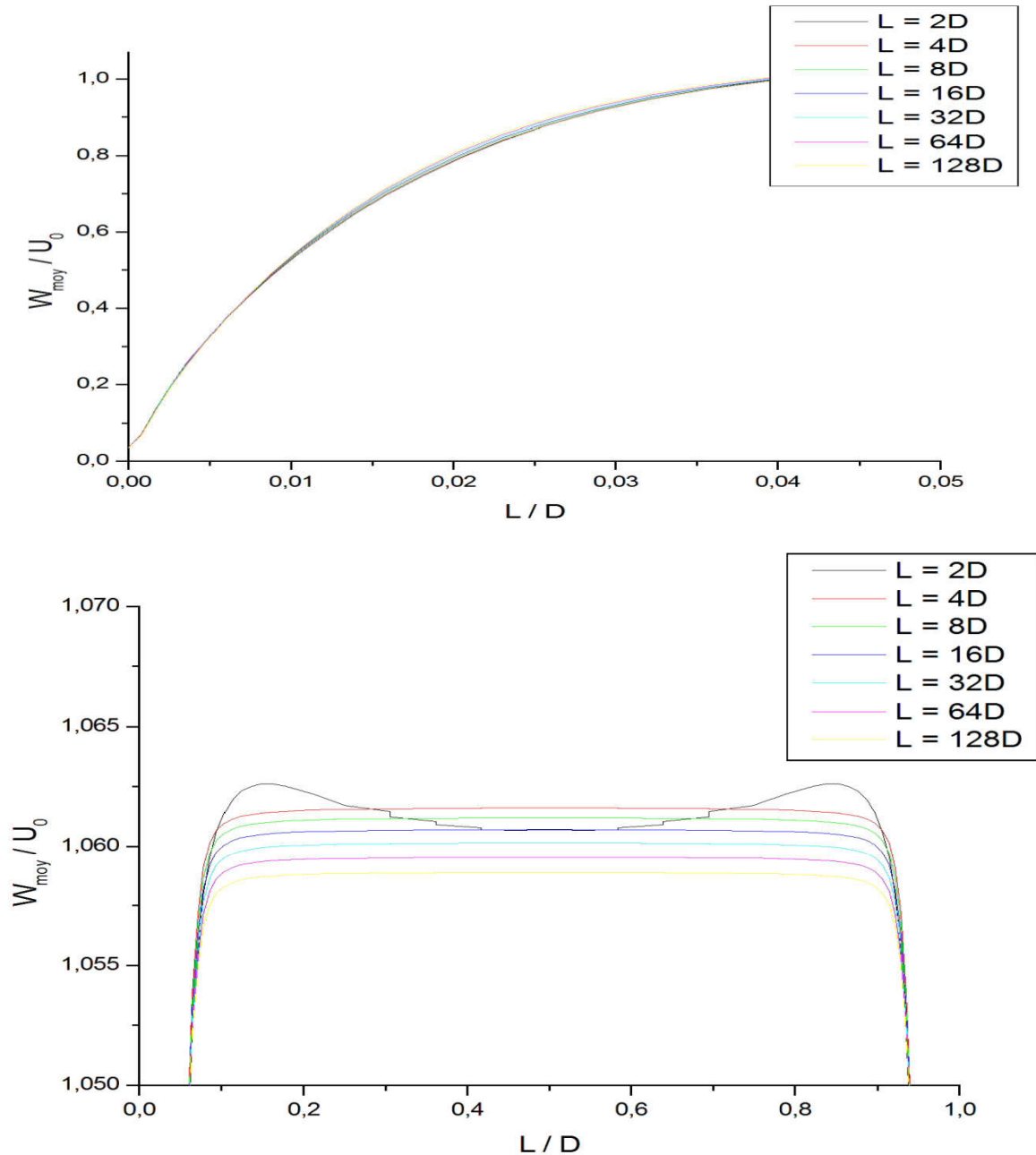
La simulation du champ continu d'écoulement turbulent en utilisant le calcul RANS comme on a discuté en (section-2) pour le calcul (conduite coudée circulaire).



**Fig.13-les profils de vitesse moyenne dans un tube L=2D.**

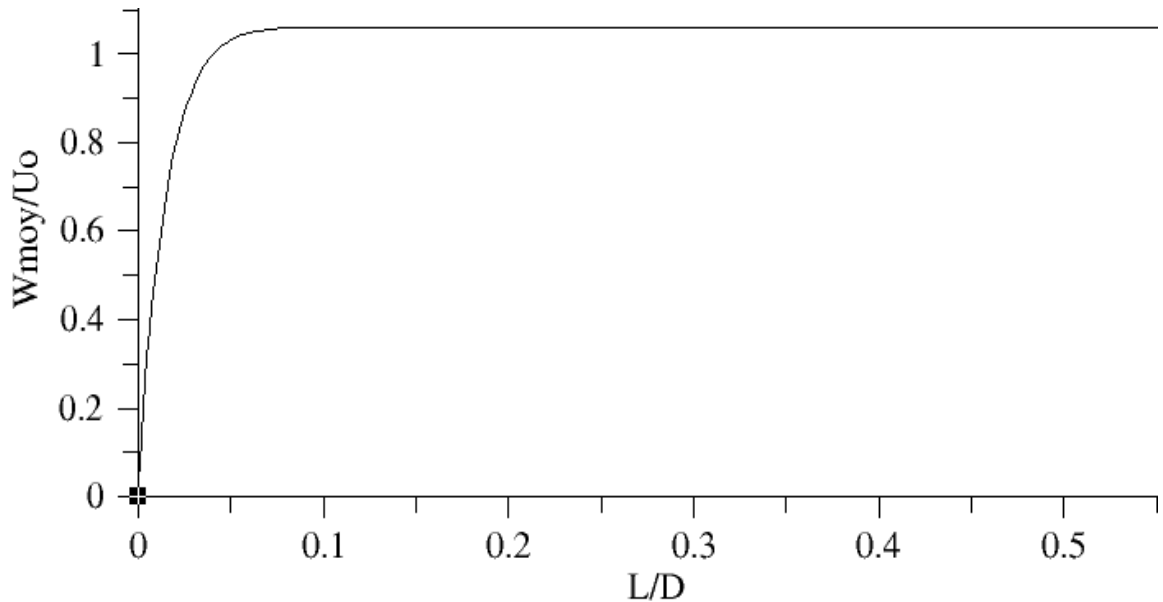
Sur la figure 13 on présente les profils de vitesse moyennée dans un tube droit avec la longueur  $L=2D$  et la variation de maillage proche de paroi (progression). D'après les graphes, on remarque qu'il n'y a pas de changement sur les profils de vitesses moyennes à partir du 3<sup>ème</sup> maillage (3, 4, 5 même profil), ce résultats qui montre la sensibilité du maillage pour différents raffinement nous permet de choisir le maillage 3 comme maillage de référence.





**Fig.14- les profils de vitesses moyennes pour différentes distances L (2D, 4D, 8D, ...).**

La figure (14.4) montre les profils des vitesses moyennes pour différentes distances L (2D, 4D, 8D, 16D, 32D, 64D, 128D), pour voir la différence et connaître la distance à laquelle notre écoulement devient pleinement développé. D'après les graphes, on remarque un petit changement sur les profils de vitesses moyennes entre  $L=4D$  jusqu'à 128D. Le graphe avec  $L=2D$  est complètement différent et ne représente pas le comportement physique ou réel de notre écoulement. D'après les résultats obtenus, pour avoir un écoulement pleinement développé on utilise à l'entrée du coude (avant coude) un tube droit avec une distance  $L=8D$ .

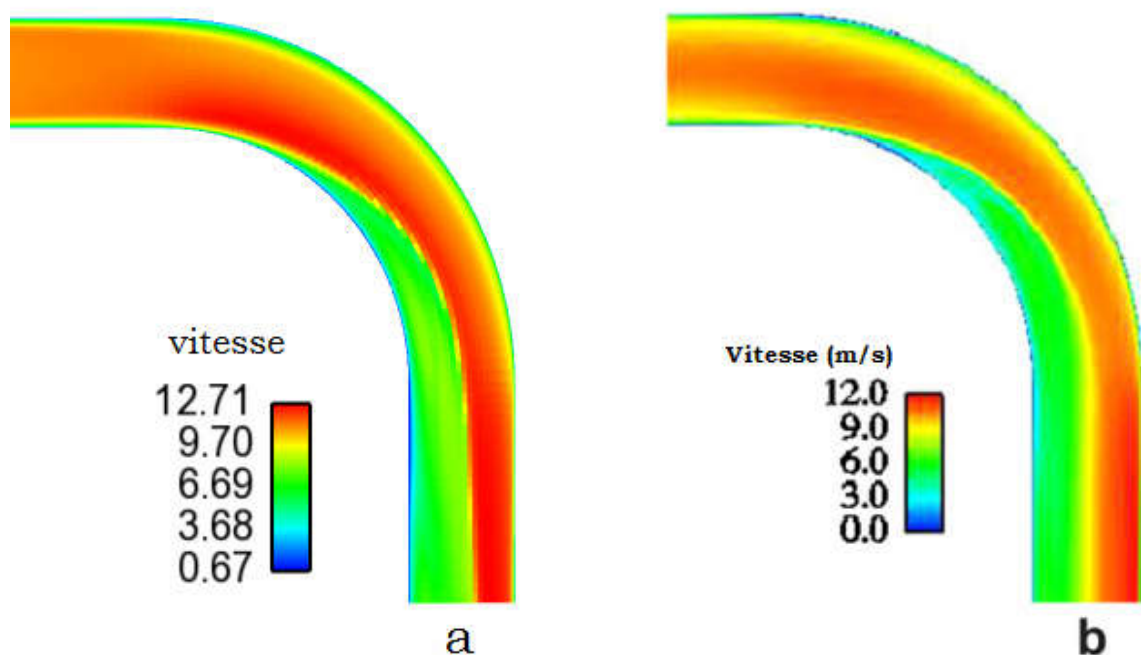


**Fig.15- Profil de vitesse moyenne a l'entré de conduite avec une distance  $L=8D$ .**

Dans la figure (15) on présente le profil de vitesse moyennée à la section d'entrée du tube droit (avant coude). Les résultats montrent que l'écoulement est pleinement développé, avec une vitesse quasiment nulle proche de la paroi et maximale loin de la paroi.

#### 4.2.1 Les différents champs de l'écoulement

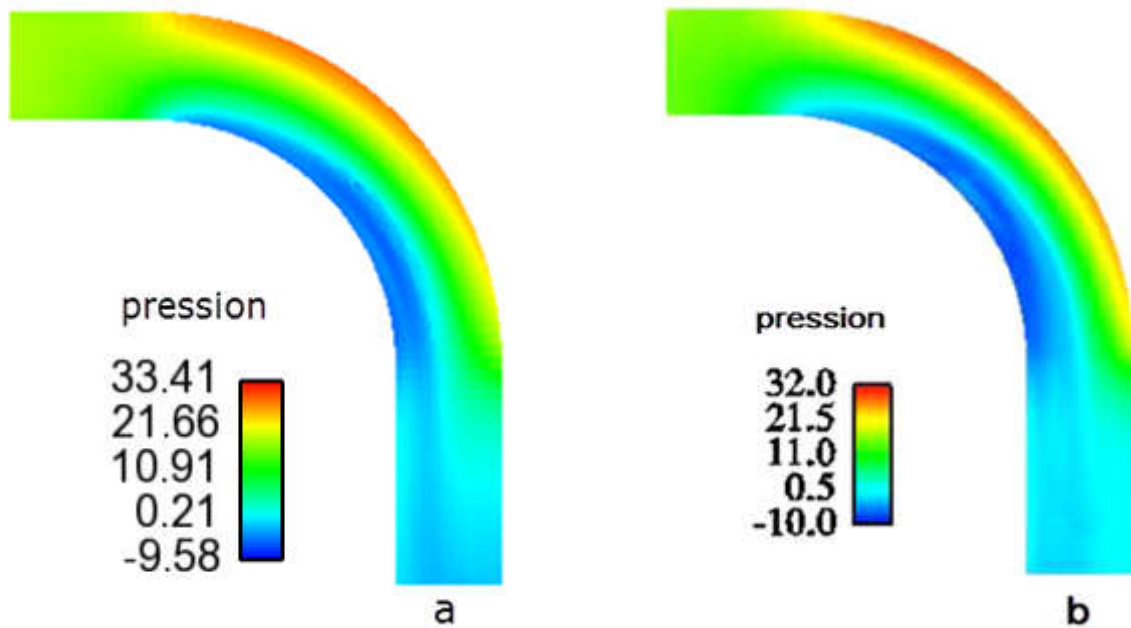
Pour la comparaison au plan central de la conduite coudée, les figures (16) et (17) montrent le champ de vitesse et de pression respectivement, et la fig.18 présente les lignes de courant au plan de symétrie ( $x=0$ ) et près des parois.



**Fig.16- Champ de vitesse de l'écoulement moyen, (a) Etude de cas (RANS) (b) Berrouk (LES)**

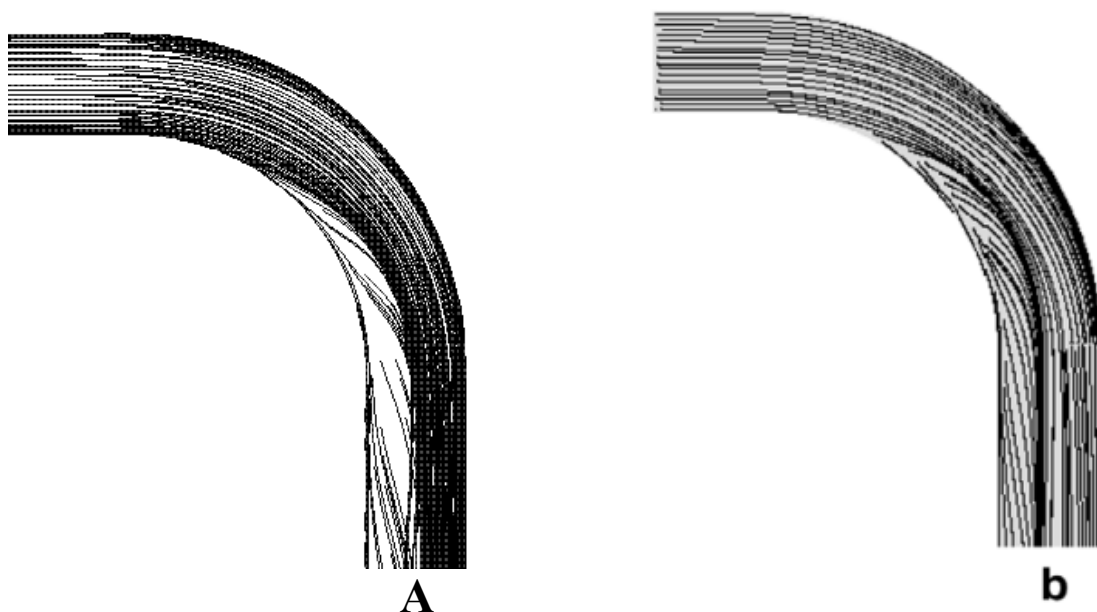
Selon les figure (16) : les champs de vitesse permettent d'avoir une vue générale sur l'écoulement à l'intérieur dans la conduite coudée. Les résultats obtenus dans le cadre de ce

travail (fig.16 (a)) montre qu'à l'entrée de coude, l'écoulement est pleinement développé, on observe à la paroi inférieure un déplacement d'écoulement jusqu'à la paroi supérieure du coude avec des séparations et rattachements dans différents points du coude ce résultat est en bon accord avec les résultats de Berrouk (fig.16 (b)).



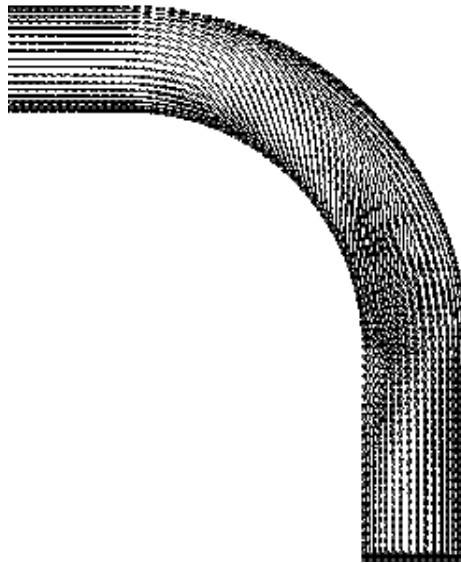
**Fig.17- Champ de pression de l'écoulement moyen, (a) Etude de cas (RANS) (b) Berrouk(LES)**

La figure ci-dessus montre les champ de la pression à la section centre de la conduite, les résultats obtenus dans ce travail (fig.17 (a)) sont comparable à ceux de Berrouk (fig.17 (b)) avec la même distribution radiale et axiale de la pression une ligne de stagnation caractérisée par une pression maximale est remarquée en paroi supérieur de la figure (17), la recirculation juste après la paroi droite de l'entrée de la conduite se traduit par une dépression, et la pression à la sortie se rétablie a une valeur quasiment constante et uniforme.



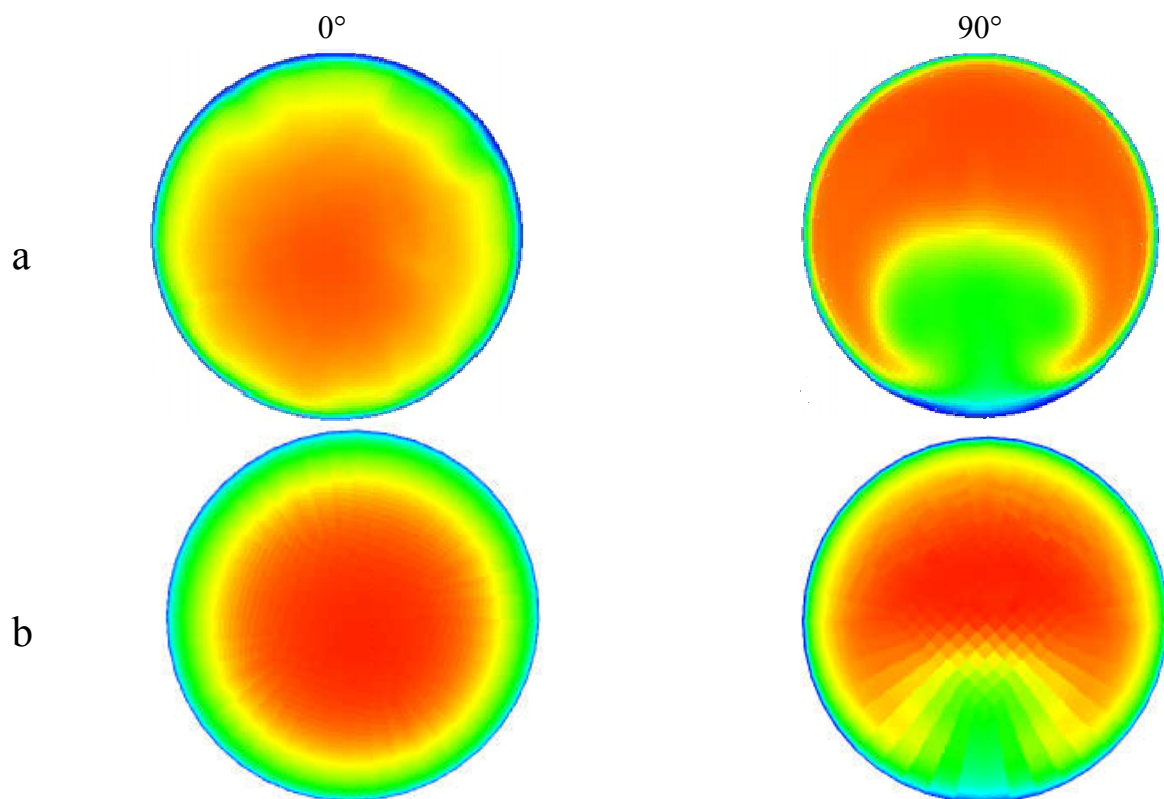
**Fig.18- Lignes de courant de l'écoulement moyen, (a) Etude de cas (RANS) (b) Berrouk (LES)**

On montre à la figure (18), les différentes lignes de courant de l'écoulement moyen entre cas étudié (RANS) et le cas (LES Berrouk). On remarque à la paroi inférieure que le détachement d'écoulement est bien montré.



**Fig.19- Lignes de courant de l'écoulement moyen près de la paroi de la conduite.**

La figure (20) montre une comparaison de la vitesse moyenne avec LES Berrouk pour deux sections de la conduite  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . La section  $0^\circ$  (b) qui présente un bon résultat de la vitesse moyenne nous permet de voir le comportement d'écoulement par rapport à la section  $0^\circ$  (a). Pour la section  $90^\circ$ , le mouvement d'écoulement en (b) est moins comparable à celui de (a).



**Fig .20- Vitesse moyenne pour différentes sections de la conduite (a) Berrouk LES (b) Etude de cas (RANS).**

## **Conclusion**

Après une étude de sensibilité de maillage, les résultats obtenus sont comparés aux données numériques de Berrouk. Les figures obtenues (RANS) montre un bon accord avec les résultats (LES) cette analyse nous a permit de détecter les différents phénomènes physiques.



## Conclusion générale

La simulation de la dynamique d'écoulement turbulent dans une conduite coudée à 90° est numériquement étudiée en utilisant une technique de simulation statistique des équations de Reynolds (RANS) pour calculer la phase continue d'écoulement. La réalisation de ce travail est faite à l'aide du code de calcul Code\_Saturne.

L'objectif de cette étude est la prédiction des phénomènes physiques induits par le mouvement d'écoulement dans une conduite coudée 90°.

D'après les résultats obtenus par la présente étude (RANS), on peut remarquer que :

- Les champs de vitesses et des pressions montrent les phénomènes physiques du mouvement d'écoulement.
- l'utilisation de modèle de turbulence SSG pour le calcul avec nombre de Reynolds élevé nous donne des bons résultats.
- la concordance entre les résultats de simulation obtenue par RANS et LES dans l'étude des phénomènes physiques de mouvement des fluides.
- Les résultats obtenus reflètent le sens physique des écoulements incompressible : la vitesse moyenne des fluides est faible en proches parois et augmente en s'éloignant de ces dernières pour atteindre son maximum au milieu de la conduite.
- L'approche numérique RANS nous a fourni une bonne initiation par la méthode des volumes finis qui est l'un des outils performants et beaucoup utilisés pour la discrétisation des équations aux dérivées partielles.

Finalement, on peut conclure à partir de la comparaison des résultats, que l'approche RANS permet d'obtenir de bon résultats plus au moins proche de l'approche LES.

## Bibliographique

- [1] Kahil, Y., 2007. Depot d'aerosol dans une conduite coudee a 90° pour un ecoulement turbulent avec une approche lagrangien-RANS. Université des Sciences et de la Technologie Mohammed Boudiaf, Oran, ALG ;
- [2] Gerald r. Guinn. A., 1964. Review of governing processes and liquid cavitation phenomena for flow in curved ducts;
- [3] Patankar, S. V., Prata, V. S., Spalding, D., 1974. Prediction of turbulent flow in curved pipes. *J. Fluid Mech.* 67 (3), pp. 583-595;
- [4] Mcfarland, A. R., Gong, H., Muyschondt, A., Wentz, W. B., Anand, N. K., 1997. Aerosol Deposition in Bends with Turbulent Flow. *Sci. Technol.* 31, pp. 3371-3377;
- [5] Chung S., Gwang, H., Hyung, J., 2002. Direct numerical simulation of turbulent concentric annular pipe flow Part 1: Flow field. *Int. J. Heat and Fluid Flow* (23) .pp. 426–440 ;
- [6] Varghese, S., Frankel, H., 2003. Numerical modeling of pulsatile turbulent flow in stenotic vessels. *Biomechanical Engineering*. Vol. 125, pp. 445-460 ;
- [7] Peters, F., Ruppel, C., 2004. A pressure probe for the detection of the flow direction close to walls. Case study: flow through a bend. *Experiments in Fluids* 36, pp. 813–818;
- [8] Pruvost, J., Legrand, J., Legentilhomme, P., 2004. Numerical investigation of bend and torus flows, part I: effect of swirl motion on flow structure in U-bend. *Chemical Engineering Science*, 59 .pp. 3345–3357 ;
- [8] Munch, C., Métais, O., 2005. Simulation des Grandes Echelles d'écoulements turbulents, compressibles dans des conduits courbes étude des transferts thermiques. *Mécanique & Industries*. 6, 275–278;
- [10] Rudolf, P., Desová, M., 2007. Flow Characteristics of Curved Ducts. *Applied and Computational Mechanics* .123-456 ;
- [11] Rechia, A., Naji, H., Mompean, G., El Marjani, A., 2007. Prédiction numérique d'un écoulement turbulent dans une conduite de section carrée. *Mécanique Appliquée et Théorique*, Vol. 1, 9. 681-692 ;
- [12] Rütten, F., Schröder, W., Meinke, M., 2005. Large-eddy simulations of low frequency oscillations of the Dean vortices in turbulent pipe bend flows. *Physics of Fluids*, 12;
- [13] Sushanta ,D., Panigrahi ,P. K., Muralidhar, K., 2008. Experimental Investigation of Flow Past a Square Cylinder at an Angle of Incidence. *Journal of engineering mechanics*. 788-803;
- [14] Ming-liang, Z., Yong-ming, S., 2008. Three-dimensional simulation of meandering river based on 3D RNG  $k-\epsilon$  turbulence model. *Journal of Hydrodynamics*, 20(4).pp.448-455;
- [15] Boutabaa, M., Mompean, G., Bounif, A., 2009. Etude de l'établissement de l'écoulement principal d'un fluide viscoélastique dans une conduite courbe de section carrée. 19ème Congrès Français de Mécanique. 6 ;
- [16] Gaci, F., Nemouchi , Z., Khezzar ,L., 2013. Contribution to the dynamics of the three-dimensional flows in square-sectioned curved ducts. *Sciences & Technologie B*. 37, pp. 14-30 ;
- [17] Jongtae, k., Yadav ,M., Seungjin, K., 2014. Characteristics of secondary flow induced by 90-degree elbow in turbulent pipe flow. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* Vol. 8, No. 2, pp. 229-239;
- [18] Métais, O., 'Turbulence : Modélisation et simulation numérique', Master mécanique des fluides et transferts, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004-2005;
- [19] Pierre, M., 1994. Etude de modèle turbulence pour les couches limites tridimensionnelles. L'écoulement national supérieur de l'aéronautique et de l'espace ;
- [20] Antoine devesa, M., 2006. Modélisation de paroi pour la simulation d'écoulements instationnaires non-isothermes. Université Montpellier II, sciences et techniques du Languedoc ;
- [21] Florian, A., Virgile, C., Simon, L., Aurélien, P., Bolun, Z., Maheu, N., 2012. Étude numérique d'écoulements dans un canal rectangulaire. Institut national des sciences appliquées de Rouen, STPI, Projet n°46 ;

- [22] Doris, L., 2005. Introduction à la simulation numérique des écoulements turbulents, direction de la Recherche et de l'Innovation Automobile, Peugeot Citroën, Note de cours, ENSTA - 3ème année ;
- [23] Mohamed, S., 2009. Modélisation numérique d'un multi-jet turbulent libre. Université Hassiba ben bouali, Chlef ;
- [24] Thomas, J., 2010. Modélisation et simulation des gaz de blow-by dans un décanteur automobile. Mechanics of the fluids. Arts et Métiers ParisTech, French ;
- [25] Zeghib, A., Comparaison des différents modèles de turbulence d'un écoulement aérodynamique dans un cyclone. Thèse de magister, thermo-fluides, Université mentouri, Constantine ;
- [26] Zeghibid, I., 2008. Simulation numérique en régime turbulent de l'influence du débit et du champ thermique sur le comportement du vortex d'un cyclone. Thèse de magister, Département de génie mécanique, Université mentouri, Constantine ;
- [27] Speziale, C.G., Sarkar, S., Gatski B., 1991. Modeling the pressure-strain correlation of turbulence, an invariant dynamical system approach. J. Fluid Mech., (227), 245–272;
- [28] Menter, F. R., Kuntz, M., Langtry, R., 2003. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. Turbulence, Heat and Mass Transfer. ANSYS – CFX, 83714 Otterfing, Germany;
- [29] Benhamadouche, S., 2010. Modélisation de la turbulence pour un écoulement incompressible en RANS et en LES. Cours de Turbulence. EDF R&D/MFEE/183 ;
- [30] Chebl, R., 2014. Simulation 2D et 3D des écoulements cavitants : développement d'un algorithme original dans Code Saturne et étude de l'influence de la modélisation de la turbulence. Génie mécanique, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers – ENSAM., Français ;
- [31] Gueraoui, K., 2010. Analyse numérique. Méthode des volumes finis. Faculté des sciences, Université Mohammed v– Agdal, Rabat ;
- [32] Bouhezza, A., 2007. Étude d'une couche limite laminaire en convection mixte : effet de l'inclinaison de la paroi. Mémoire de Magister, Université 20 Août 55, Skikda ;
- [33] Nicolas, K., 2013. Introduction à GMSH. [www.ensta-paristech.fr/~kielbasi/docs/gmsh.pdf](http://www.ensta-paristech.fr/~kielbasi/docs/gmsh.pdf). Date de la dernière consultation du site: 23-Oct-2013;
- [34] <http://code-saturne.org/cms/download/2.0>;
- [35] <http://code-saturne.org/cms/features/mesh>;
- [36] <http://free-cfd-workflow.blogspot.com/2015/09/presentation-de-salome.html>. Date de la dernière consultation du site: 8 août 2015 ;
- [37] Deville, E., 2004. Présentation de la plate-forme SALOME. [http://Présentation de la plate-forme SALOME.pdf](http://Présentation%20de%20la%20plate-forme%20SALOME.pdf). Date de la dernière consultation du site: 7 oct. 2004 ;
- [38] Berrouk, S., 2008. Stochastic modelling of aerosol deposition for LES of 90 bend turbulent flow. Int. J. Heat and Fluid Flow (29) , 1010–1028

## Résumé

L'étude numérique d'un écoulement turbulent tridimensionnel dans une conduite coudée à 90° peut être un moyen efficace pour la prévision du mouvement des fluides et du dépôt d'aérosol pharmaceutique dans les voies aériennes extra thoracique dans les études futures. Nous présentons dans ce travail une étude montrant le mouvement d'écoulement turbulent dans une conduite coudée à 90°.

L'étude de l'écoulement par l'approche RANS est réalisée à l'aide d'un code interne dénommé Code\_Saturne, le maillage tridimensionnel 3D est généré par le logiciel "Grid Mesh" qui est un logiciel open source sous le système d'exploitation "linux".

Les résultats obtenus de la présente simulation (RANS) et utilisant un modèle de turbulence à hauts nombres de Reynolds ( $R_{ij} - \epsilon SSG$ ) et comparé avec les données numériques LES de Berrouk.

**Mots Clés:** écoulement incompressible, dynamique des fluides, Turbulence, modélisation, simulation.

## ملخص

إن الدراسة الرقمية لتدفق المضطرب ثلاثي الأبعاد في أنبوب 90 درجة يمكن أن يكون وسيلة فعالة للتنبؤ بحركة السوائل و في الدراسات المستقبلية لتوقع ترسب الجزيئات الصيدلانية في الحنجرة. نقدم في هذه المذكرة دراسة تبين حركة لتدفق المضطرب في أنبوب 90 درجة.

يتم تنفيذ محاكاة تدفق الرقمية باستخدام برنامج "Grid Mesh" ورمز طراز مسمى "كود \_ ساتورن" للحساب, هذه البرمجيات مفتوحة المصدر في نظام التشغيل "لينكس".

النتائج المتحصل عليها من خلال هذه المحاكاة (RANS) و باستخدام نموذج الاضطراب للأعداد الكبيرة رينولدز ( $R_{ij} - \epsilon SSG$ ) تتم مقارنتها مع البيانات الرقمية لبروك (LES).

## Abstract

The numerical study of three-dimensional turbulent flow in a 90° bend can be an effective way to predict the movement of fluids and in future studies to predict the deposition of pharmaceutical aerosol in the extra thoracic airway. We present in this work a study showing the turbulent flow movements in a 90° bend.

The numerical study of the flow is performed using the "Grid Mesh" program, and the code name of "Code\_Saturne", these programs are open source under Linux operating system.

The results obtained through these simulations (RANS) and using a high Reynolds numbers model ( $R_{ij} - \epsilon SSG$ ), are compared with numerical data of (LES) Berrouk.

**Keywords:** incompressible flow, fluid dynamics, turbulence, modeling, simulation.